

С.П. Кундас,
д.т.н., профессор,
Белорусский национальный
технический университет



Е.В. Кресова,
Международный государственный
экологический университет
имени А.Д. Сахарова



МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА

Аннотация

Разработана 3D-тепловая модель энергоэффективного дома, и с ее помощью проведен анализ эффективности применения различных вариантов ограждающих конструкций, созданных на основе местных материалов. Результаты исследований показали, что более предпочтительным является вариант утепления с помощью смеси глины со щепой и с расположением тростникового слоя с наружной стороны стены.

Abstract

3D thermal model of energy efficient building was developed. And using this model effectiveness analysis of application of different envelope options on the base of local materials was done. Results of studies have shown that more preferred option of heat insulation is one created by means of a mixture of clay with chips and reed layer location on the outside of wall.

Современное состояние развития народного хозяйства характеризуется все возрастающей ролью задач энергосбережения и энергоэффективности [1]. Особое внимание в настоящее время уделяется разработкам, обеспечивающим снижение энергопотребления как при возведении жилых домов, так и в процессе их эксплуатации. Большой резерв в этой области имеется в строительной индустрии, жилищном секторе. В связи с развитием в нашей стране направления по энергоэффективному строительству актуальной задачей является оптимальный выбор строительных материалов и конструкций, обеспечивающих необходимые теплоизоляционные свойства, прочность при оптимальном соотношении цена-качество.

Сложившиеся тенденции в области энерго- и ресурсосбережения требуют разработки и освоения производства новых конструкций, технологий и инженерного оборудования, базирующихся на прогрессивных достижениях строительной науки и техники. Важнейшим направлением, позволяющим снизить энергопотери жилых домов и, следовательно, потребление тепловой энергии на отопление, является повышение теплозащиты зданий за счет увеличения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и применения энергоэффективных инженерных систем.

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 [2].

Математическая модель процессов переноса тепла

Существуют различные методы анализа процессов переноса тепла. Основными из них являются экспериментальный, инженерный и аналитический. Аналитический метод в настоящее время рассматривается как один из самых перспективных, потому что наличие вы-

сопроизводительной компьютерной техники позволяет избежать трудностей, связанных с практическим применением этого метода. Поэтому актуальной является задача разработки аналитических, численных моделей, которые можно реализовать на общедоступной вычислительной технике и применять в условиях производства.

Процесс переноса тепла в теле с учетом конвекции можно описать следующим уравнением (1) [3]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = Q + \rho c_p \mathbf{u} \nabla T$$

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

ρ – плотность материала, кг/м³;

T – температура, °С;

\mathbf{u} – поле скоростей, м/с;

Q – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³;

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

t – 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 теле, обладающих следующими свойствами [4,5]:

1. тело однородно и изотропно;
2. деформация рассматриваемого объема, связанная с изменением температуры, очень мала по сравнению с самим объемом;
3. внутренние источники теплоты в теле, которые в общем случае могут быть заданы как $q_n = f(x, y, z, t)$, распределены равномерно.

Характеристика объекта моделирования

В качестве объекта исследований выбран строящийся энергоэффективный дом учебного комплекса «Волма» Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова (разработка МБОО «Экодом») [6], вид которого приведен на рисунке 1. Отапливаемая площадь здания составляет 283,1 м², отапливаемый объем – 315,2 м³.



Рис. 1. Энергоэффективный дом

Для заполнения стен в качестве внутреннего утеплителя в типовом проекте энергоэффективного дома использовалась специально приготовленная смесь из глины и щепы (процентное соотношение: глина – 30%, щепа – 70%, таблица 1).

В качестве утепляющего материала использовались также тростниковые маты, характеристика которых приведена в таблице 1.

Сопротивление теплопередаче окон принималось равным 1,0 м² °С/Вт (двухслойный стеклопакет), дверей – 0,4 м² °С/Вт.

Моделирование тепловых режимов

Для проведения исследований на основе модели теплопереноса, представленной в общем виде выше, разработаны конструктивная, конечно-элементная и расчетно-аналитические модели, которые практически реализованы в программных комплексах SolidWorks и COMSOL Multiphysics [7, 8].

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

Предварительные численные исследования разработанных моделей показали, что для проведения расчетов всего дома требуется применение специальной высокопроизводительной вычислительной техники. Поэтому в рамках

Таблица 1. Характеристики утеплительных и конструкционных материалов

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

настоящей работы проведен численный анализ только одной комнаты дома, что позволило реализовать модели на персональном компьютере.

Для обоснованного использования разработанных моделей проведена их экспериментальная верификация, с использованием результатов экспериментальных исследований, проведенных МБОУ «Экодом» [9]. Контролировалось изменение температуры внутри дома после его прогрева до температуры 25°C, с последующим отключением отопления и естественным охлаждением (температура окружающей среды составляла минус 30°C). Размеры ограждающих конструкций дома представлены на рисунке 2.

Исследования показали, что в течение трех суток температура внутри дома снизилась с 25 до 16°C. Результаты моделирования изменения температуры внутри дома для аналогичной конструкции и начальных условий показали, что через трое суток температура снизилась до 14,5°C. 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.

С учетом вышеизложенной информации проведены следующие численные исследования:

- 1) динамики изменения температуры внутри комнаты при включении отопления;
- 2) динамики изменения температуры внутри комнаты при отключении отопления;
- 3) распределение температуры в поперечном сечении стен и крыши дома;
- 4) сравнительные исследования изменения температуры на внутренней границе ограждающей конструкции при различном расположении утепляющих материалов.

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. Мощность батареи принималась из условий, что на 1 м³ необходимо 41 Ватт тепловой мощности [10]. Начальная температура воздуха в

помещении задавалась равной 5°C, стен – 12°C. Температура на внешней стороне ограждающей конструкции принималась равной минус 30°C в течение всего времени численных исследований, температура с внешней стороны комнаты, выходящей внутрь дома, условно принималась 14°C, пол и потолок изолированы. В модели были учтены теплообмен с окружающей средой и конвекция воздуха в помещении. Полученные значения распределения температуры во всем объеме помещения для различных моментов времени приведены ниже (рисунок 3). Из графика 4 видно, что температура воздуха в центре комнаты составит примерно 11,5°C, 16°C, 20°C и 27,5°C через соответственно 1 час, 3 часа, 5 часов и 10 часов, т.е. для заданных условий в течение 6 часов после включения источника тепла температура в помещении становится комфортной (22°C).

Результаты моделирования динамики изменения температуры внутри комнаты после отключения отопления. Начальные и граничные условия: температура воздуха в помещении задавалась равной 22°C, стен – 12°C. Температура на внешней стороне ограждающей конструкции принималась равной минус 30°C в течение всего периода моделирования (сутки).

Результаты моделирования приведены на рисунке 5. Как видно, примерно через 7,5–8 часов температура в комнате снижается только до 18°C, т.е. будет находиться в диапазоне, близком к комфортной температуре.

Рис. 3. Результаты расчета температуры в центре комнаты
 а) через 1 час;
 б) через 3 часа;
 в) через 5 часов;
 г) через 10 часов

Примечание: температурные шкалы на каждом рисунке отличаются.

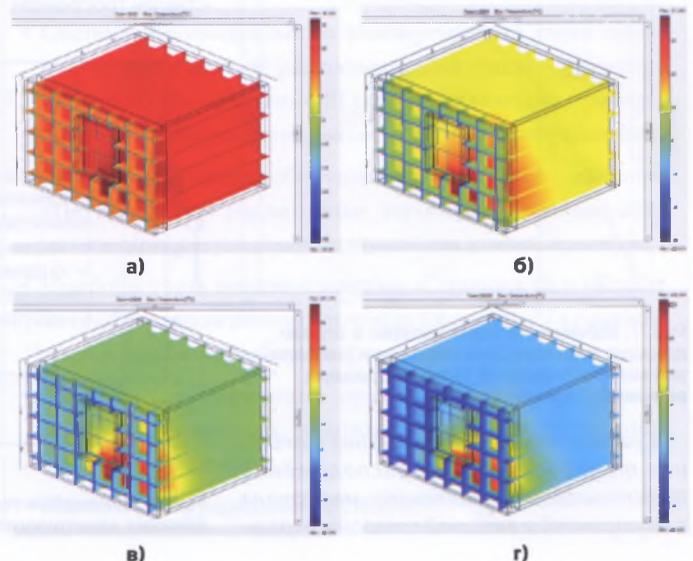


Рис. 2. Конструкция стены дома

- 1 – штукатурка, армированная смесями «Забудова»;
- 2 – плита тростниковая 50 мм (горизонтальное расположение стебля);
- 3 – пароизоляционная пленка;
- 4 – плита тростниковая 50 мм (вертикальное расположение стебля);
- 5 – брусок 50x50 выносной (сосна);
- 6 – заполнение смесью щепа+глина (300 мм);
- 7 – стойка каркаса 120x120 мм (сосна);
- 8 – штукатурка глиняным раствором

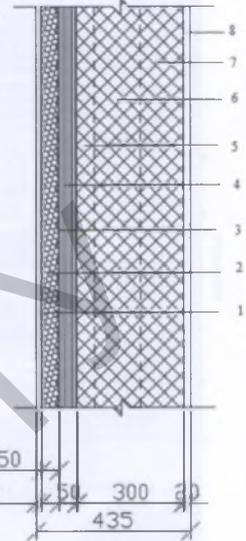


Рис. 4. Изменение температуры в центре комнаты при нагреве

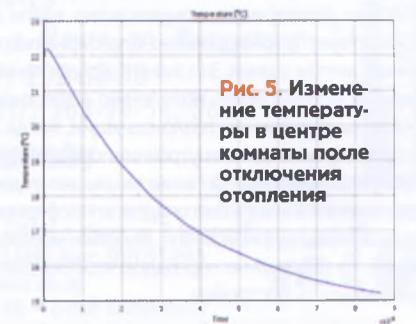


Рис. 5. Изменение температуры в центре комнаты после отключения отопления

Моделирование распределения температур в поперечном сечении стен дома в течение суток при отключении отопления. Начальная температура на внутренней стороне ограждающих конструкций принималась равной 18°C, а на внешней границе – в соответствии с усредненным изменением температуры в течение суток в зимний период [11] (рисунок 6).

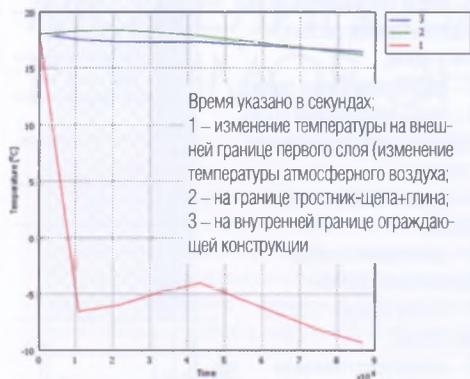


Рис. 6. Изменение температуры в сечении стен дома

дающих конструкций принималась равной 18°C, а на внешней границе – в соответствии с усредненным изменением температуры в течение суток в зимний период [11] (рисунок 6). Исследовалась конструкция утепления стен тростник-щепанглина.

Как следует из рисунка 6, применение тростника в качестве теплоизоляционного материала оказывает положительное влияние на тепловой режим дома. Видно, что тепловой ноль (рисунок 7) находится внутри тростникового теплоизоляционного слоя, что позволяет демпфировать тепловые расширения, конденсацию влаги и способствует формированию благоприятного климата внутри здания. Это значит, что 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, что повышает долговечность постройки.

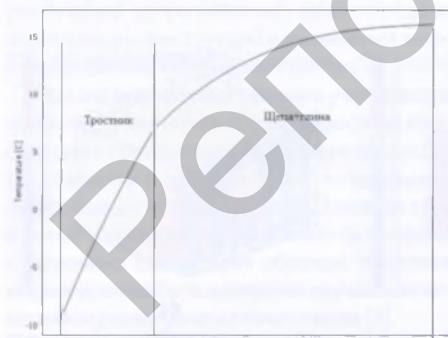


Рис. 7. Изменение температуры в ограждающих конструкциях стены при расположении тростникового теплоизоляционного материала с внешней стороны стены

Сравнительные исследования изменения температуры при расположении тростникового утепляющего материала с внутренней и внешней стороны ограждающих конструкций (начальные и граничные условия не изменялись). Как следует из рисунка 8, при расположении тростникового утепляющего материала с внутренней стороны ограждающей конструкции температурный ноль расположен внутри слоя «щепанглина». При промерзании этого слоя и термоциклировании в нем могут возникать трещины, что приведет к снижению теплового сопротивления и несущей способности.

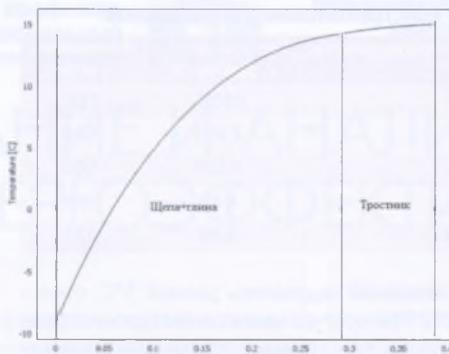


Рис. 8. Изменение температуры в ограждающих конструкциях стены при расположении тростникового теплоизоляционного материала с внутренней стороны стены

дающей конструкции (начальные и граничные условия не изменялись). Как следует из рисунка 8, при расположении тростникового утепляющего материала с внутренней стороны ограждающей конструкции температурный ноль расположен внутри слоя «щепанглина». При промерзании этого слоя и термоциклировании в нем могут возникать трещины, что приведет к снижению теплового сопротивления и несущей способности.

Анализ изменения температуры в сечении ограждающей конструкции крыши в течение суток при отключении отопления. Начальные и граничные условия принимались такие же, как и в предыдущем случае. Перекрытие крыши утеплено минеральной ватой (8 см) и тростниковыми матами толщиной 25 см. Крыша накрыта металлочерепицей. Обычно металлочерепица производится из рулонной стали толщиной 0,4, 0,45 или 0,5 мм. Так как она хорошо проводит тепло и ее толщина очень мала, то при моделировании теплопереноса эти условия не учитывались.

Как видно из рисунка 9, в конструкции крыши температурный ноль также находится внутри слоя теплоизоляции, который представлен тростником.

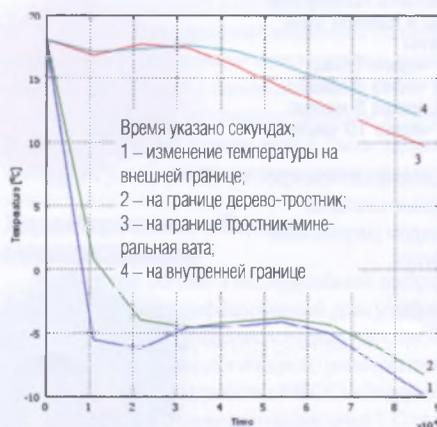


Рис. 9. Изменение температуры в ограждающих конструкциях крыши дома

Заключение

С использованием созданных тепловых 3D-моделей проведен анализ процесса переноса тепла для различных вариантов ограждающих конструкций энергоэффективного дома, изготавливаемых на основе местных материалов. Показано, что более предпочтительным является вариант утепления с помощью смеси «глина-щепанглина» и тростниковых матов с их расположением с наружной стороны стены. Все резкие колебания наружной температуры воспринимаются тростниковым утеплителем, имеющим высокие демпфирующие свойства, и поэтому увеличивается срок службы основного утеплителя (смесь глины и щепы) в конструкции стен благодаря уменьшению возникающих температурных деформаций. Полученные результаты, а также результаты верификации моделей подтверждают их работоспособность и возможность использования для решения задач анализа тепловых режимов зданий и оптимизации ограждающих конструкций.

Литература

1. Республиканская программа энергосбережения на 2011–2015 годы (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24 декабря 2010 г. № 1882).
2. Кундас С.П., Кашко Т.А. Компьютерное моделирование технологических систем. – Мн.: БГУИР, 2002. – 164 с.
3. Четчин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника, учеб. для хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 344 с.
4. Кресова Е.В., Кундас С.П. Моделирование одномерного нестационарного переноса тепла в ограждающих конструкциях зданий. // Сахаровские чтения 2013 года: Экологические проблемы XXI века: материалы 13-й междунар. науч. конф., 16–17 мая 2013 г., г. Минск, Республика Беларусь / под ред. С.П. Кундаса, С.С. Позняка. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2013. – 359 с.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 427 с.
6. Кундас С.П., Артеменков И.В., Пашинский В.А., Вайцехович Н.Н. Энергоэффективный дом УНХ «Волма»: применение возобновляемых источников энергии в системе энергоснабжения // Возобновляемые источники энергии: потенциал, достижения, перспективы: материалы международного семинара экспертов. 3–4 окт. / Институт энергетики НАНБ. – Минск, 2013. – С. 68–78.
7. Кресова Е.В., Кундас С.П. Методика создания тепловой модели энергоэффективных домов для сельской местности // Сахаровские чтения 2014 года: экологические проблемы XXI века: материалы 14-й междунар. науч. конф., 29–30 мая 2014 года, г. Минск, Республика Беларусь / под ред. В.И. Дуная, С.С. Позняка, Н.А. Лысухо. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2014. – с. 214.
8. Kresova E., Kundas S. Modeling of three-dimensional heat transfer in building envelopes / Conferința Științifică Internațională a doctoranzilor "Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători. Culegere de teze. – Chișinău, Moldova: Artpoligraf, 2014. – P. 12
9. Строительство дома, бани, коттеджа / Дома из органического сырья. Строительство, ремонт, стройматериалы. ForumHouse [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.forumhouse.ru/threads/244526/> – Дата доступа : 24.11.2014
10. СНиП 2.04.05-91. Строительные нормы и правила. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
11. Республиканский гидрометеоцентр [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.pogoda.by/> – Дата доступа : 24.11.2014.

Статья поступила в редакцию 5.12.2014