

Определение времени остывания жилого дома при отключении теплоснабжения и планировании ремонта в зимний период

В.Л. Титов,
начальник ФГУ «Мосгосэнергонадзор»,
к. т. н.

Б.М. Апарцев,
начальник Тепловой инспекции
ФГУ «Мосгосэнергонадзор»

Т.Е. Троицкий-Марков,
президент Технологического института
энергетических обследований, диагностики
и неразрушающего контроля «ВЕМО»

М.Н. Слитков,
к. т. н.

В.И. Сучков,
генеральный директор Технологического
института энергетических обследований,
диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО»

Одной из крайне важных характеристик жилых зданий является интервал времени, в течение которого жилой дом может находиться без отопления, например, при отключении системы теплоснабжения вследствие ее аварии. В течение планового эксплуатационного интервала времени необходимо успеть провести ремонтные работы или провести дренирование систем теплоснабжения для исключения размораживания.

В настоящей работе описана технология определения теплового состояния жилого дома при отключении системы теплоснабжения. В основе технологии лежит математическая модель, описывающая процесс нестационарной теплопередачи в наружных ограждающих и внутренних конструкциях, цокольном этаже и чердачном помещении жилого дома с учетом граничных и начальных условий и внутренних источников энергии. В предлагаемой постановке тепловое состояние жилого дома при возможной аварии в зимний период определяется расчетно-экспериментальным методом.

Подробное описание общей методики и математической модели теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений по определению теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций в реальных условиях их эксплуатации, т.е. в условиях процесса нестационарной теплопередачи, приведено в [1, 2]. Ниже приведены особенности математичес-

кого описания, дополняющие общую методику [1, 2], присущие конкретной решаемой задаче, а именно: определению теплового состояния жилого дома при отключении теплоснабжения.

Теоретическая часть включает совместное решение системы «n» дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности в частных производных и связывающей их системы (n-1) обыкновенных дифференциальных уравнений теплового баланса с учетом соответствующих граничных и начальных условий.

Например, первая система дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности описывает процесс распределения температуры во времени **в наружных стенах** дома, вторая система дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности описывает процесс изменения температуры во времени **в цокольной части** дома и т.п. Размерность системы – количество дифференциальных уравнений, определяется сложностью обследуемой строительной конструкции и требуемой точностью получения результатов.

Ниже, в качестве примера, приведена система одномерных дифференциальных уравнений:

$$(c_m \rho_m)_l \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_l = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right]_l, \quad ml=1..nl, \quad t>0; \quad 0 < x < \delta_m; \quad (1)$$

граничные условия на наружной поверхности:

$$\lambda_{m1} \frac{\partial T(x = \delta_{m1})}{\partial x} = \alpha_c [T_c - T(x = \delta_{m1})] \quad ; \quad (2)$$

граничные условия на внутренней поверхности:

$$\lambda_{11} \frac{\partial T(x = \delta_{11})}{\partial x} = \alpha_s [T_s - T(x = \delta_{11})] \quad ; \quad (3)$$

условия теплового сопряжения на границах слоев материалов, входящих в состав наружной стены:

$$\lambda_{m1} \frac{\partial T(x = \delta_{m1} - 0)}{\partial x} = \lambda_{m1+1} \frac{\partial T(x = \delta_{m1} + 0)}{\partial x} \quad ; \quad (4)$$

$$T(x = \delta_{m1} - 0) = T(x = \delta_{m1} + 0) \quad ; \quad (5)$$

начальное распределение температуры по толщине стены:

$$T(t=0) = T_0(x) \quad (6)$$

С точки зрения математического описания дифференциальные уравнения для различных элементов строительной конструкции однотипны и отличаются только вторыми индексами.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений является системой уравнений текущего теплового баланса воздуха во внутреннем объеме дома и элементов его конструкции с учетом внутренних источников энергии, например, нагревательных элементов.

$$\left[(C) \frac{\partial T}{\partial t} \right]_q = \sum_{j=1}^L P_{jq} + \sum_{q=1}^Q \alpha_q H (T_{bq} - T_{cq})$$

T, t, x – текущая температура, текущее время, координата с началом на внутренней поверхности элемента конструкций дома (наружной стены, цокольной части, крыши и т.п.), направленная перпендикулярно слоям материалов конструкции;

$\lambda_{mi}, \rho_{mi}, c_{mi}$ – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала m -ного слоя i -той ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) конструкции;

κ – количество рассматриваемых конструкций (размерность систем дифференциальных уравнений);

$T_c(t)$ – температура окружающей среды;

α_c, α_s – коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхности каждой из трех ограждающей конструкции;

H – коэффициент, учитывающий интенсивность воздухообмена в здании, определяется СНиПом либо конкретными конструктивными особенностями исследуемого строения (наличием вентиляционных конструкций, форточек и т.п.);

L – количество внутренних источников энергии мощностью P_j , в q -й конструкции. Мощность внутренних источников может определяться простым суммированием всех L внутренних источников, по косвенным параметрам – по изменению мощности электроэнергии в период отключения теплоснабжения, по изменению расхода газа и т.п.

Q – количество строительных конструкций, для которых строится уравнение теплового баланса;

q – номер строительной конструкции в составе обследуемого здания;

индексы c и b определяют принадлежность параметра наружной или внутренней поверхности, соответственно.

Начальное распределение температуры по толщине каждой из ограждающих конструкций рассчитывается по формуле, полученной из решения уравнения стационарной теплопроводности для многослойной плоской стены:

на внешней поверхности:

$$T_n = T(x = \delta_n) = T_c + \frac{q}{\alpha_c} \quad ; \quad (13)$$

на внутренней поверхности:

$$T_0 = T(x = 0) = T_s - \frac{q}{\alpha_s} \quad ; \quad (14)$$

на границах слоев материалов между слоями $m-1$ и m :

$$T_m = T_c + q \left(\frac{1}{\alpha_c} + \sum_{j=m}^{j=n} \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right) \quad ; \quad (15)$$

в которых плотность стационарного теплового потока рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{T_s - T_c}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_c} + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\delta_j}{\lambda_j}} \quad (16)$$

Распределение температуры по толщине отдельно взятого слоя рассчитывается по формуле:

$$T_k = T_m - \frac{T_m - T_{m-1}}{\delta_m} k \Delta \delta \quad ; \quad (17)$$

Δd – шаг разбиения слоя.

Теплофизические характеристики строительных конструкций (сопротивления теплопередаче по всей поверхности ограждающей конструкции и приведенное сопротивление теплопередаче), используемые в проводимых расчетах, определяются на основе основного теплового контроля зданий по утвержденным методикам [3-5].

Экспериментальная часть включает:

- априорные значения температур в интервал времени, когда теплоснабжение дома будет отключено. В качестве этих значений может быть принят официальный прогноз погоды, минимальное допустимое значение температуры окружающего воздуха и т.п.;
- фактическое значение сопротивлений теплопередачи наружных ограждающих конструкций, цокольного этажа, окон и т.п.; при этом необходимо иметь как приведенное значение этих параметров, так и фактическое их значение во всех точках строительных конструкций. Эти величины определяются заранее по разработанным методикам [3-5], с использованием мобильной тепловизионной лаборатории ВЕМО-2000;
- характеристики рассматриваемой строительной конструкции.

После обработки результатов измерений в соответствии с приведенной выше методикой определяется **номограмма остывания конкретного жилого дома**, т.е. зависимость температуры наиболее холодного помещения здания от времени, внешних и внутренних температурных условий и конструкции здания.

Экспериментальное подтверждение правомерности использования описанной методики и погрешности производимых вычислений проведено на примере остывания жилого девятиэтажного дома, имеющего 6 подъездов. За месяц до аварии теплоснабжения этот дом был обследован тепловым (тепловизионным) методом по методике [3] и определены реальные величины сопротивления теплопередаче его конструкций. Длина дома составляет 84 м, высота – 27,3 м, ширина – 12,7 м.

Крыша дома выполнена в виде перекрытия с мягкой кровлей, т.е. по железобетонному перекрытию уложена керамзитовая засыпка толщиной 0,3 м, затем – цементно-песчаная стяжка толщиной 0,05 м и по ней несколько слоев рубероида на

битумной мастике общей толщиной 0,05 м. Площадь крыши составляет 1066,8 м².

Наружные стены дома имеют трехслойную конструкцию: наружные слои – из железобетона толщиной по 0,1 м, внутренний (теплоизолирующий) слой – из пенополиуретана толщиной 0,15 м. Площадь стен составляет 3460,6 м².

Цокольная часть дома выполнена из железобетонных блоков толщиной 0,5 м. Площадь поверхности цокольной части дома равна 386,8 м².

Площадь окон составляет 1239 м². Окна имеют термическое сопротивление 0,44 м²К/Вт (двойное остекление в спаренных деревянных переплетах). Коэффициент, увеличивающий коэффициент теплопередачи окон за счет воздухопроницаемости, принят в данном примере равным 2.

Объем внутренних конструкций (из бетона) составляет 2242 м³, площадь поверхности конструкций, участвующая в теплообмене с воздухом внутри дома, составляет 18452 м². Объем воздуха внутри дома составляет 22950 м³.

На рис. 1. приведена термограмма и фотография здания до отключения теплоснабжения.



Рис. 1. Термограмма и фотография наружной стены здания

На рис. 2. приведен вкладыш к энергетическому паспорту на данное здание, оформленный по результатам тепловизионного обследования. Приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций составляет 2,6 м²К/Вт.

Результаты расчета представлены на рис. 3. Для упрощения анализа при проведении расчетов

Вкладыш к энергетическому паспорту здания (п. 6.8 МГСН 2.01-99)
Адрес:

Общая часть: 6-ти подъездный жилой дом . Наружные слои – из железобетона толщиной по 0,1 м; внутренний, теплоизолирующий слой – из пенополиуретана толщиной 0,15 м.

Результаты натуральных обследований (существующего здания)

Позиция Энергетического паспорта	Наименование показателей и характеристик (раздел 2)	Обозначение	Единица измерения	Количество	
				По проекту	По результатам натурных испытаний
1	2	3	4	5	6
2.2.1	Приведенное сопротивление теплопередаче СТЕН:	R^T_w	кв. м°С/Вт	3,08	2,6
2.2.1	Приведенное сопротивление теплопередаче ОКОН И БАЛКОННЫХ ДВЕРЕЙ	R^T_F	кв. м° С/Вт	0,56	0,57

Дата проведения обследования: 03 марта 2003 г.

Выводы и рекомендации: Здание соответствует требованиям 2-го этапа энергосбережения по стенам и окнам. Источников дополнительных утечек тепла не выявлено.

Организация-исполнитель обследования: Технологический институт энергетических обследований, диагностики неразрушающего контроля «ВЕМО». 113162, г. Москва, ул. Люсиновская, 62.

Полномочия исполнителя: Аккредитация Департамента Госэнергонадзора Минэнерго РФ (на данный вид обследований) № 017-110 от 12.11.2001, Аккредитация Госстроя РФ (на данный вид обследований) № 50 от 22.10.2001, Лицензия Мосгосэнергонадзора (с перечнем данных видов работ) № Г 822805 от 05.03.2001.

Организация – соисполнитель обследования:
Полномочия соисполнителя:
Должность, Ф.И.О., исполнителей:

Директор

_____ М.П.

Начальник лаборатории

Должность, Ф.И.О., соисполнителей:

Инженер НТО

_____ М.П.

Ст. оператор

серия 77 № 00000

Рис. 2. Вкладыш к энергетическому паспорту

температура наружного воздуха принималась постоянной и равной – 26°С.

Из рис. 3. видно, например, что наиболее «опасным» (с точки зрения охлаждения) является цокольный этаж и при дальнейшем анализе теплового состояния жилого дома этому участку следует уделить особое внимание.

Для оценки достоверности и определения погрешности результатов расчетов необходимо их

сравнить с результатами экспериментальных измерений температуры внутреннего объема цокольного этажа. Для этого после отключения теплоснабжения вследствие аварии во внутреннее помещение цокольного этажа поместили автоматические датчики измерений температуры, которые в автономном режиме регистрировали температуру в течение 16 часов (время ликвидации аварии) с периодом 5 минут. Погрешность измерения сред-

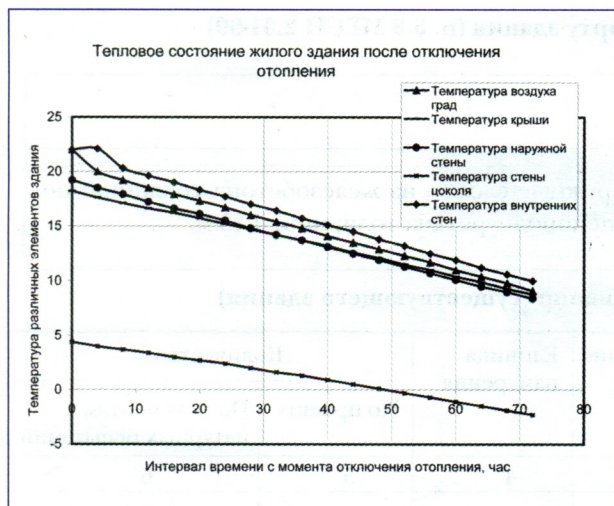


Рис. 3. Тепловое состояние здания (результаты расчетов) в процессе остывания здания

ней по датчикам и по объему помещения температуры с учетом погрешности измерения самих датчиков (инструментальная погрешность) составляет $\pm 2,2^\circ\text{C}$.



Рис. 4. Температурная «история»

Температурная «история» (зависимость температуры от времени суток) при проведении расчетов принималась согласно данным метеобюро на последующие трое суток после отключения теплоснабжения (рис. 4).

В качестве этого параметра можно использовать, например, температурные истории за предшествующие сутки, которые применяются при проведении теплового контроля для определения приведенного сопротивления теплопередаче.

На рис. 5. приведены расчетная и экспериментальная (с интервалом погрешности) зависимости значений температуры цокольного помещения от времени.



Рис. 5. Теоретические и экспериментальные значения температуры воздуха цокольного этажа в процессе остывания здания

Проведенный корреляционный анализ теоретических и экспериментальных результатов показал, что между ними коэффициент корреляции $r = 0,87$, позволяющий тесноту связи считать хорошей [6]; при этом с доверительной вероятностью 0,95 можно утверждать о наличии линейной корреляции между ними [7]. Интервал разброса значений экспериментальных результатов с доверительной вероятностью 0,98 равен $4,8^\circ\text{C}$,

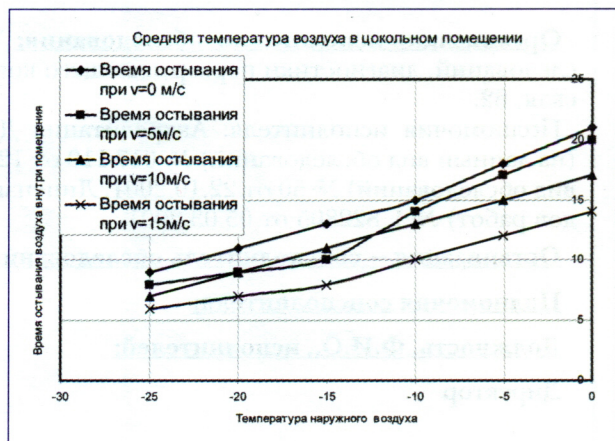


Рис. 6. Зависимость времени остывания воздуха цокольного помещения от скорости ветра и температуры наружного воздуха

следовательно, разность теоретических и экспериментальных результатов укладывается в интервал доверительной вероятности. Вышесказанное свидетельствует об адекватности описания процесса остывания здания разработанной моделью и возможности применения соответствующей методики для определения допустимого интервала времени отключения теплоснабжения с учетом реальных условий эксплуатации здания и его реальных теплотехнических характеристик.

В качестве примера на рис. 6. приведены графики зависимости времени остывания помещений цокольного этажа при различ-

ной скорости ветра и постоянной температуры окружающего воздуха.

Пользуясь описанным выше методом, рассчитывается номограмма теплового состояния строительной конструкции и ее отдельных частей для различных климатических условий при отключении теплоснабжения. На основании номограммы определяется возможность проведения контроля до размораживания разводки системы отопления.

Разработана технология определения теплового состояния жилого дома в реальных условиях его эксплуатации при отключении теплоснабжения, позволяющая рассчитывать величину

изменения температуры в наиболее опасном, с точки зрения «замерзания», участке здания и определять допустимый интервал времени, в течение которого система теплоснабжения может быть отключена. Технология основана на решении прямой и обратной задач нестационарной теплопроводности с учетом реальных характеристик строительной конструкции и климатических параметров окружающей среды и включает математическое моделирование процесса контроля, методику съема и обработку информации с реального объекта контроля посредством комплекса ВЕМО-2000.

Титов Владимир Леонтьевич.

Окончил МИРЭА в 1978 г, в 1986 г. – МИУ им. С. Орджоникидзе по специальности «Организация управления в энергетике». С 1997 года начальник ФГУ «Мосгосэнергонадзор». Стаж в энергетике – 24 года.

Апарцев Борис Моисеевич.

Окончил МЭИ по специальности «Промышленная энергетика». С 1981 года работает в органах энергонадзора. С 1998 года начальник Тепловой инспекции ФГУ «Мосгосэнергонадзор». Стаж в энергетике – 24 года.

Сучков Виталий Иванович.

Генеральный директор Технологического института энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО».

Троицкий-Марков Тимур Евгеньевич.

президент Технологического института энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО»

Слитков Михаил Николаевич.

Окончил Ленинградский механический институт в 1972 г. по специальности инженер-механик и Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана в 1991 г. по специальности инженер-математик. Кандидат технических наук. Имеет более 70 научных работ и 4 авторских свидетельства и патентов.

Литература

1. А.И.Потапов, Т.Е.Троицкий-Марков, В.И.Колганов Тепловой неразрушающий контроль изделий.– Наука.– М., 2002 г.
2. О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова и др. Патент № 2151388. Способ неразрушающего контроля качества объекта.– Заявл. 22.12.99, № 99126444/28, опубл. 20.06.2000, бюлл. № 17.
3. О.Н. Будадин, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций и строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом.– Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО».– 2001 г.
4. Свидетельство об аттестации Госстандарта РФ № 09/442-2001 от 09.07.2001 г. методики «диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом».
5. Т.Е. Троицкий-Марков, О.Н. Будадин, В.И. Сучков, В.Ю. Скоборев Энергетические обследования – способ реального энергосбережения и получения дополнительной прибыли: методическое пособие (нормативные документы, информационно-справочные материалы).– Изд. СК.– М., 2002 г.
6. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа.– ТИИЭР. – 1981. – № 11.
7. Румшинский В.З. Математическая обработка результатов экспериментов.– Наука.– М., 1971 г.

Энергоназор и энергоэффективность



1

2004

