

Способ определения динамики остывания полого замкнутого многослойного объекта при отключении систем поддержания заданной температуры воздуха внутри объекта.

Д.В. Ким-Серебряков, В. Г. Авраменко, О. В. Лебедев, О. Н. Будадин, Д. В. Киржанов
Технологический институт энергетических исследований, диагностики
и неразрушающего контроля «ВЕМО», Россия, 113162, Москва, Люсиновская ул., д. 62
Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Россия, Малый Харитоньевский пер., д. 4.

Введение

В настоящее время существенная часть аппаратного обеспечения ЖКХ находится в предаварийном состоянии. Это связано с тем, что значительная часть основных фондов производственных строительных конструкций превысила допустимый ресурс эксплуатации, что привело к увеличению расхода энергоносителей. Нормальной практикой на территории России являются показатели удельного потребления условного топлива на человека, превышающие в несколько раз аналогичные западные [1]. Также это связано с несоблюдением условий эксплуатации оборудования и отсутствием профилактических работ. Нередки случаи, когда в результате аварии системы теплоснабжения оборудование системы охлаждается до отрицательной температуры. В этом случае неизбежно разрушение указанного оборудования[2].

В связи со сказанным актуальна разработка метода оценки времени, доступного коммунальным службам для осуществления ремонта вышедшего из строя оборудования. Это время будем называть остаточным ресурсом теплового состояния критически опасного объема строительных конструкций.

Было бы крайне полезно снабдить метод возможностями оценки этого времени при различных условиях, в том числе, и при условиях установки в замерзающих помещениях дополнительных обогревающих устройств, например, электрических.

Из всех помещений жилого здания, замерзающего в связи с отключением системы отопления, наиболее актуальным становится оценка состояния для подвального помещения, так как оно остывает быстрее всего вследствие различных факторов. Одним из таких факторов является установка пользовательских климатических систем в жилых помещениях здания.

Кроме того, подвальные помещения содержат оборудование системы теплоснабжения, наиболее подверженное неисправностям в случае промерзания. Замена этого оборудования в случае выхода из строя – дорогостоящее мероприятие, которое может потребовать вывода здания из эксплуатации.

Метод успешно апробирован на крупнейших конференциях, посвящённых методам неразрушающего контроля, включая международные конференции [3].

Описание метода

Предлагаемый способ позволяет рассчитать временную зависимость температуры воздуха внутри объекта, а также внутри слоев ограждающей конструкции объекта при отключении системы поддержания заданного температурного режима воздуха внутри объекта. Примером может служить помещение внутри жилого дома в случае отключения системы обогрева. Метод расчета динамики остывания основывается на решении уравнений теплового баланса для воздуха и различных предметов внутри рассматриваемого объекта

совместно с решением нестационарного уравнения теплопроводности внутри многослойных ограждающих конструкций объекта.

Алгоритм расчета

Для определения полного теплового потока $Q(t)$ через внутренние поверхности ограждающих конструкций в момент времени t необходимо мысленно разбить ограждающие конструкции на фрагменты с однородной структурой. Обозначим площадь внутренней поверхности i го фрагмента через A_i , а плотность теплового потока через его внутреннюю поверхность в момент времени t через $q_i(t)$. Полный тепловой поток $Q(t)$ через внутренние поверхности ограждающих конструкций объекта в момент времени t задается соотношением:

$$Q(t) = \sum_i A_i q_i(t), \quad (1)$$

где

i - номер фрагмента ограждающих конструкций.

Суммирование производится по всем фрагментам.

Плотности теплового потока $q_i(t)$ через внутреннюю поверхность i го фрагмента в момент времени t определяется из решения уравнения нестационарной теплопроводности внутри каждого слоя j го фрагмента ограждающих конструкций:

$$C_j^i \frac{\partial T^i(x^i, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\lambda_j^i \frac{\partial T^i(x^i, t)}{\partial x^i} \right) \quad (2)$$

где:

j - номер слоя i го фрагмента,

C_j^i - произведение $c_j^i \rho_j^i$, где c_j^i - удельная теплоемкость j го слоя i го фрагмента, ρ_j^i - плотность j го слоя i го фрагмента,

$T^i(x^i, t)$ - температура внутри i го фрагмента в точке с координатой x^i в момент времени t ,

x^i - координата точки внутри i го фрагмента ограждающих конструкций, равная расстоянию от данной точки до внутренней поверхности i го фрагмента

t - момент времени,

λ_j^i - коэффициент теплопроводности j го слоя i го фрагмента.

При решении уравнения (2) необходимо использовать граничные условия

$$\begin{aligned} \lambda_{\sigma}^i \frac{\partial T^i(x^i, t)}{\partial x^i} \Big|_{x=0} &= \alpha_{\sigma}^i [T^{ig}(0, t) - T(t)] \\ \lambda_{\mu}^i \frac{\partial T^i(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} &= \alpha_{\mu}^i [T_i(t) - T(L, t)] \end{aligned} \quad (3)$$

где:

λ_{σ}^i - коэффициент теплопроводности внутреннего слоя i го фрагмента,

α_{σ}^i - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности i го фрагмента

λ_{μ}^i - коэффициент теплопроводности внешнего слоя i го фрагмента,

L - координата внешней поверхности i го фрагмента.

α_{μ}^i - коэффициент теплоотдачи наружной поверхности i го фрагмента,

$T_i^n(t)$ - измеренное значение температуры воздуха вблизи наружной поверхности i го фрагмента в момент времени t .

Если i й фрагмент граничит с фундаментом, то для него необходимо использовать следующие граничные условия:

$$\lambda_{\epsilon}^i \frac{\partial T^i(x^i, t)}{\partial x^i} \Big|_{x=0} = \alpha_{\epsilon}^i [T^{i\epsilon}(0, t) - T(t)]$$

$$\lambda_n^i \frac{\partial T^i(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{T^{\epsilon}(t_{нач}) - T_i^n(t_{нач})}{R^i} \quad (4)$$

где

R^i - эффективное значение сопротивления теплопередаче i го фрагмента,

$T^{\epsilon}(t_{нач})$ - температура воздуха окружающей среды, с которой граничит рассматриваемый объект.

Начальное распределение температуры внутри i го фрагмента ограждающих конструкций определяется из решения уравнения стационарной теплопроводности в каждом слое i го фрагмента:

$$\frac{\partial}{\partial x^i} \left(\lambda_j^i \frac{\partial T^i(x^i)}{\partial x^i} \right) = 0 \quad (5)$$

с граничными условиями

$$\lambda_{\epsilon}^i \frac{\partial T^i(x^i, t_{нач})}{\partial x^i} \Big|_{x=0} = \alpha_{\epsilon}^i [T^{i\epsilon}(0, t_{нач}) - T(t_{нач})]$$

$$\lambda_n^i \frac{\partial T^i(x, t_{нач})}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_n^i [T_i^n(t_{нач}) - T(L, t_{нач})] \quad (6)$$

Для фрагментов, граничащих с фундаментом, граничные условия имеют следующий вид

$$\lambda_{\epsilon}^i \frac{\partial T^i(x^i, t_{нач})}{\partial x^i} \Big|_{x=0} = \alpha_{\epsilon}^i [T^{i\epsilon}(0, t_{нач}) - T(t_{нач})]$$

$$\lambda_n^i \frac{\partial T^{i\epsilon}(x, t_{нач})}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{T(t_{нач}) - T_i^n(t_{нач})}{R^i} \quad (7)$$

Из уравнений (1) -(7) следует, что температура внутреннего воздуха $T^{\epsilon}(t)$ в момент времени t может быть рассчитана для произвольного набора теплотехнических параметров θ объекта всех фрагментов ограждающих конструкций объекта. Набор параметров θ включает в себя совокупность значений $C_j^i, \lambda_j^i, \alpha_{\epsilon}^i, \alpha_n^i, R^i, C^{\epsilon}, C^n$ и K_w^a .

Измеренная и рассчитанная температуры воздуха сравнивают на основании зависимости:

$$G(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (T^{\epsilon}(t_n, \theta) - \bar{T}^{\epsilon}(t_n))^2 \quad (8)$$

где:

N - полное число замеров температуры воздуха внутри объекта,

t_n - момент n го замера температуры воздуха внутри объекта,

$T^{\epsilon}(t_n, \theta)$ - рассчитанная температура воздуха внутри объекта в момент времени t_n для значений теплотехнических параметров θ ,

$\bar{T}^e(t_n)$ - измеренная температура воздуха внутри объекта в момент времени t_n .

Выбранные значения теплотехнических параметров объекта обеспечивают минимальное значение зависимости $G(\theta)$.

На основании выбранных значений параметров строят график зависимости температуры $T^e(t)$ воздуха внутри замкнутого объекта от времени при отключенной системе поддержания заданной температуры воздуха внутри объекта, используя систему уравнений теплового баланса (1). Для этого произвольно задают температуру воздуха внутри объекта $T_{нач}^e$ в момент отключения системы поддержания заданной температуры воздуха внутри объекта и температуры $T_i''(t)$ воздуха вблизи всех наружных поверхностей всех однородных фрагментов ограждающих конструкций объекта в произвольный момент времени t , а мощность тепловой пушки $P^e(t)$ полагают равной нулю.

Пример расчета

Рассмотрим пример определения зависимости температуры внутри замкнутого объекта от времени при отключении системы поддержания заданной температуры воздуха внутри объекта

В качестве объекта было выбрано гаражное помещение. Гараж имеет следующие размеры: длина – 6,0 м, ширина – 3,6 м, высота – 2,15 м. Стены гаража сложены из силикатного кирпича. Крыша выполнена железобетонными плитами. Ворота гаража имеют размеры 2,4x1,8 м, изготовлены из досок и обиты снаружи стальным листом. Пол гаража бетонный.

Ограждающие конструкции гаража были разбиты на 7 фрагментов с однородной структурой. Расположение фрагментов разбивки и их нумерация указаны на рис.1.

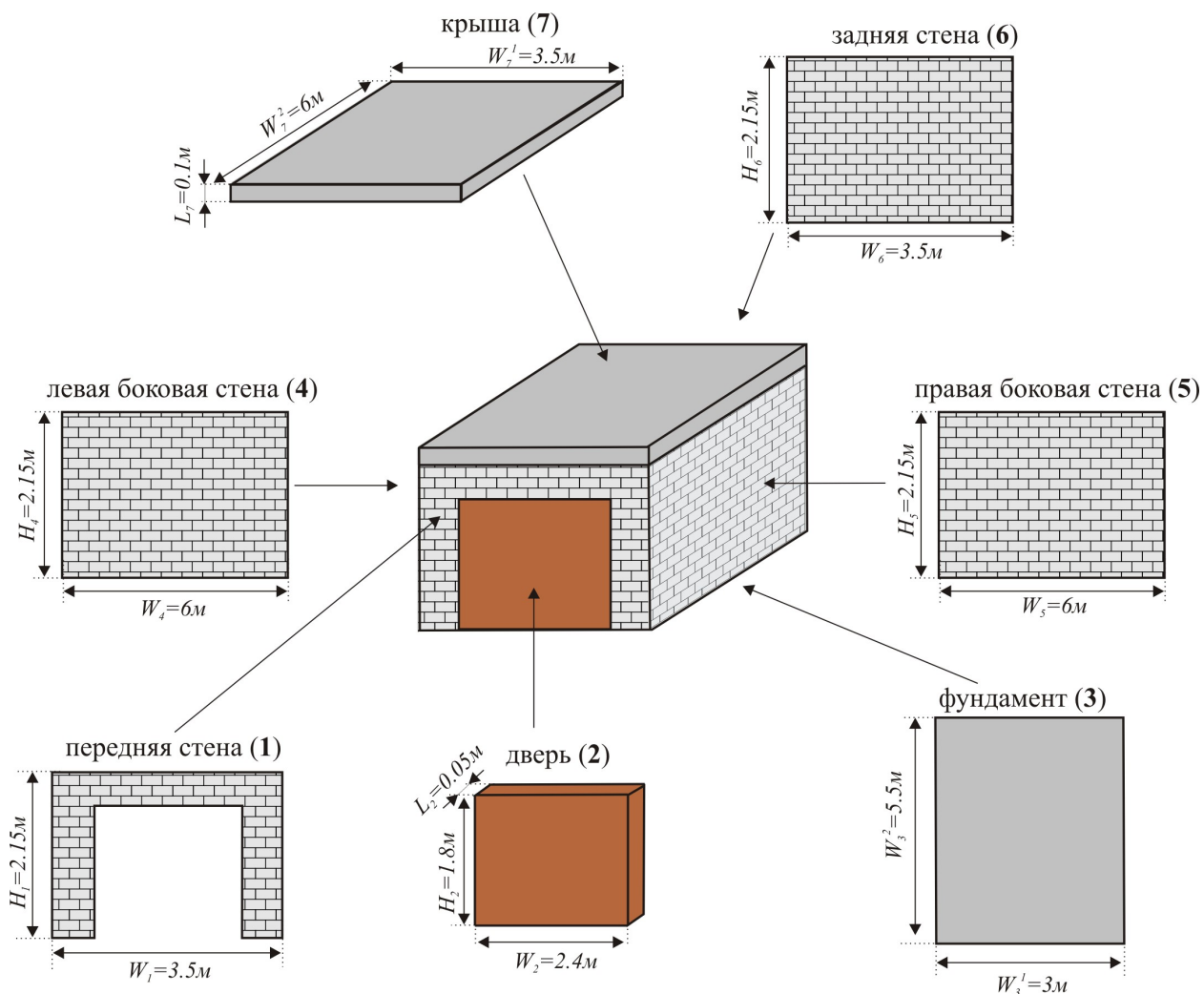


Рис. 1. Схема объекта исследования (гараж) с указанием размеров ограждающих конструкций, схемы разбивки ограждающих конструкций на фрагменты с однородной структурой и нумерацией фрагментов (обозначены цифрами в скобках рядом с названием фрагмента). Размеры всех фрагментов, кроме фундамента, определялись при измерении внешней поверхности фрагментов. Для фундамента приведены размеры области, ограниченной внутренними поверхностями стенок гаража.

Указанные на Рис. 1 размеры были определены с точностью до 1 мм.

По результатам измерений были рассчитаны толщины всех фрагментов ограждающих конструкций (кроме фундамента), а также площади этих фрагментов. Результаты расчетов представлены в Таб. 1.

Фрагмент	Толщина	Площадь
Передняя стена	$L_1 = 0.25 \text{ м}$	$A_1 = 2.13 \text{ м}^2$
Дверь	$L_2 = 0.05 \text{ м}$	$A_2 = 4.32 \text{ м}^2$
Фундамент	L_3 не известно	$A_3 = 16.5 \text{ м}^2$
Боковые стены	$L_4 = L_5 = 0.25 \text{ м}$	$A_4 = A_5 = 11.825 \text{ м}^2$
Задняя стена	$L_6 = 0.25 \text{ м}$	$A_6 = 6.45 \text{ м}^2$
Крыша	$L_7 = 0.1 \text{ м}$	$A_7 = 16.5 \text{ м}^2$

Таблица 1. Толщины и площади фрагментов ограждающих конструкций с однородной структурой.

При расчетах толщин и площадей фрагментов использовались следующие формулы:

$$L_1 = L_2 = (W_4 - W_3) / 2, \quad (9)$$

$$L_4 = L_5 = (W_1 - H_3) / 2, \quad (10)$$

$$A_2 = H_2 \uparrow L_2, \quad (11)$$

$$A_1 = H_1 \uparrow W_3^1 - A_2, \quad (12)$$

$$A_3 = W_3^1 \uparrow W_3^2, \quad (13)$$

$$A_4 = A_5 = H_4 \uparrow W_3^2, \quad (14)$$

$$A_6 = H_6 \uparrow W_3^1, \quad (15)$$

$$A_7 = A_3, \quad (16)$$

при выводе которых предполагались равенства $L_1 = L_2$ и $L_4 = L_5$.

Внутри гаража был установлен самописец с подключенным датчиком температуры воздуха, способный регистрировать температуру воздуха с точностью до 0.5°C в течение 5 суток с интервалом между последовательными измерениями, равным 300 сек. Все ограждающие конструкции, кроме фундамента, граничили с атмосферным воздухом, поэтому температура воздуха вблизи наружных поверхностей всех фрагментов ограждающих конструкций (за исключением фундамента) была одинаковой. Для регистрации температуры внешнего воздуха использовался такой же самописец, при этом, датчик был установлен вблизи крыши гаража (на расстоянии 10 см от поверхности крыши).

Для нагрева гаража использовались два калорифера; мощность каждого составляла 2 кВт. В момент включения калориферов температура воздуха внутри гаража была равна 2°C, а температура воздуха снаружи гаража была равна 0.5°C. Нагрев проводился в течение 36 часов. К этому моменту температура внутри гаража повысилась на 11.5 °C. Затем калориферы отключались и гараж остывал в течение 36 часов. За это время температура понизилась на 8 °C.

Полная продолжительность измерений составила 72 часа, в течение которых фиксировались температуры внутреннего и внешнего воздуха с помощью установленных самописцев показаний датчиков температуры. Графики зависимости температур от времени представлены на Рис.2.

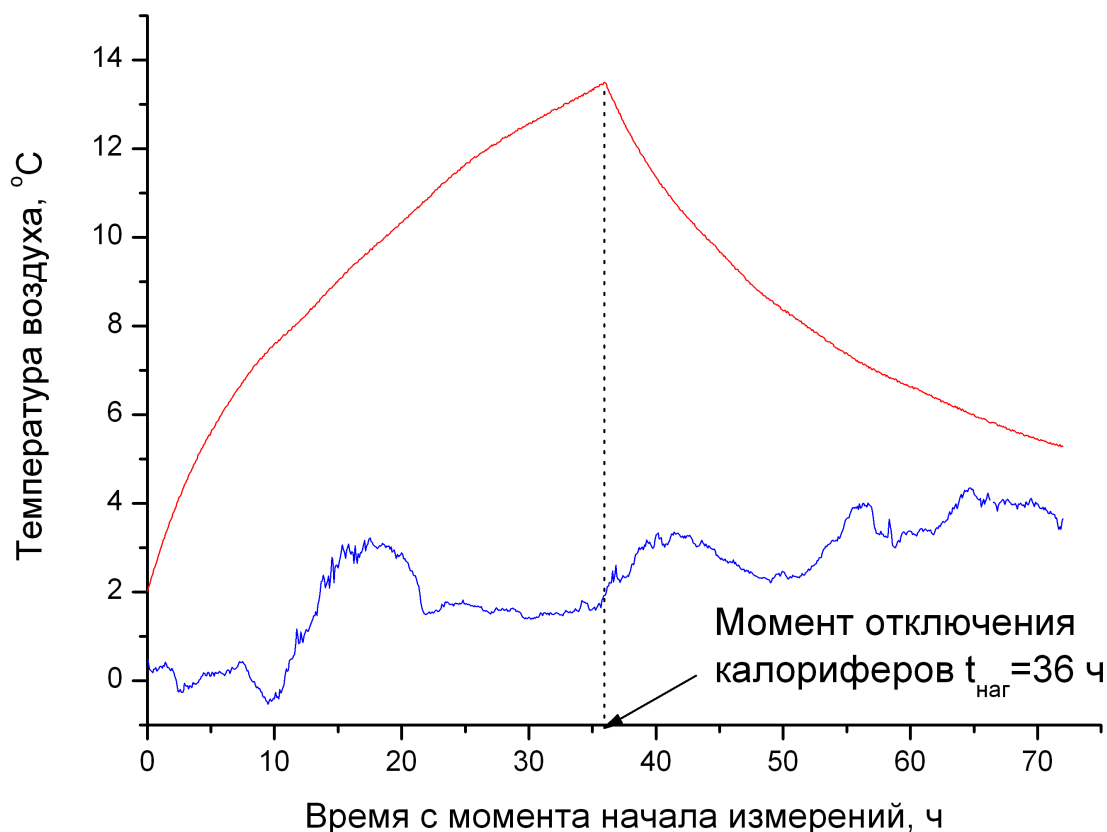


Рис 2. Графики зависимости температур внутреннего (красная кривая) и внешнего (синяя кривая) воздуха от времени.

Так как передняя, задняя и боковые стенки имеют одинаковую структуру, то при расчетах использовались одинаковые значения коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и коэффициентов теплоотдачи для фрагментов 1,4,5 и 6. Таким образом, для расчета зависимости температуры внутреннего воздуха от времени необходимо определить значения 18 параметров, название которых перечислены в первой колонке Таблицы 2.

Название параметра	Минимальное значение	Максимальное значение	Пробное значение	Выбранное значение
коэффициент теплопроводности передней, задней и боковой стенок	0.35 Вт/м ² °С	1.4 Вт/м ² °С	0.7 Вт/м ² °С	0.6 Вт/м ² °С
теплоемкость передней, задней и боковой стенок	0.8x10 ⁶ Дж/м ³ °С	3.2x10 ⁶ Дж/м ³ °С	1.6x10 ⁶ Дж/м ³ °С	1.7 Дж/м ³ °С
коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности передней, задней и боковой стенок	4 Вт/м ² °С	16 Вт/м ² °С	8 Вт/м ² °С	8.7 Вт/м ² °С
коэффициент теплоотдачи внешней поверхности передней, задней и боковой стенок	6 Вт/м ² °С	24 Вт/м ² °С	12 Вт/м ² °С	14 Вт/м ² °С

коэффициент теплопроводности двери		0.09 Вт/м ⁰ С	0.36 Вт/м ⁰ С	0.18 Вт/м ⁰ С	0.19 Вт/м ⁰ С
теплоемкость двери		0.5x10 ⁶ Дж/м ³ С	2x10 ⁶ Дж/м ³ С	1x10 ⁶ Дж/м ³ С	1.2 Дж/м ³ С
коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности двери		4 Вт/м ² С	16 Вт/м ² С	8 Вт/м ² С	8.7 Вт/м ² С
коэффициент теплоотдачи внешней поверхности двери		6 Вт/м ² С	24 Вт/м ² С	12 Вт/м ² С	15 Вт/м ² С
коэффициент теплопроводности фундамента		1.02 Вт/м ⁰ С	4.08 Вт/м ⁰ С	2.04 Вт/м ⁰ С	2.25 Вт/м ⁰ С
теплоемкость фундамента		1x10 ⁶ Дж/м ³ С	4.2x10 ⁶ Дж/м ³ С	2.1x10 ⁶ Дж/м ³ С	2.4 Дж/м ³ С
коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности фундамента		4 Вт/м ² С	16 Вт/м ² С	8 Вт/м ² С	9.2 Вт/м ² С
толщина фундамента		0.3 м	1.4 м	0.7 м	0.65 м
эффективное значение сопротивления теплопередаче фундамента		0.25 м ² °С /Вт	1 м ² °С /Вт	0.5 м ² °С /Вт	0.75 м ² °С /Вт
коэффициент теплопроводности крыши		1.02 Вт/м ⁰ С	4.08 Вт/м ⁰ С	2.04 Вт/м ⁰ С	1.97 Вт/м ⁰ С
теплоемкость крыши		1x10 ⁶ Дж/м ³ С	4.2x10 ⁶ Дж/м ³ С	2.1x10 ⁶ Дж/м ³ С	2 Дж/м ³ С
коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности крыши		4 Вт/м ² С	16 Вт/м ² С	8 Вт/м ² С	7.1 Вт/м ² С
коэффициент теплоотдачи внешней поверхности крыши		6 Вт/м ² С	24 Вт/м ² С	12 Вт/м ² С	13.2 Вт/м ² С
Теплоемкость воздуха	внутреннего	3x10 ⁴ Дж/°С	12x10 ⁴ Дж/°С	6x10 ⁴ Дж/°С	6.2x10 ⁴ Дж/°С
Теплоемкость расположенных гаража	предметов, внутри	1x10 ⁴ Дж/°С	4x10 ⁴ Дж/°С	2x10 ⁴ Дж/°С	2.5x10 ⁴ Дж/°С

Таблица 2. Список теплотехнических параметров, подлежащих определению.

Значения перечисленных параметров определялись с помощью сравнения измеренной зависимости температуры воздуха внутри гаража с зависимостью, рассчитанной на основе решения уравнения теплового баланса (1). Квадратичная невязка (9) минимизировалась методом градиентного спуска. При этом значения параметров варьировались от минимального значения, указанного во второй колонке Таблицы 2, до максимального значения, указанного в третьей колонке Таблицы 3. Пробные значения параметров, задание которых необходимо в методе градиентного спуска, принимались равными проектным значениям. Пробные значения указаны в четвертой колонке Таблицы 2.

В результате процедуры минимизации были выбраны значения параметров, указанные в пятой колонке Таблицы 2.

На основе выбранных значений теплотехнических параметров в качестве примера была рассчитана зависимость температуры воздуха внутри гаража от времени в течение 24 часов с момента отключения системы поддержания заданной температуры воздуха внутри

гаража. При этом начальная температура воздуха внутри гаража считалась равной $T_{нач}^e = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура воздуха снаружи гаража считалось постоянной и равной $T_i^H(t) = -5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчета зависимости температуры от времени представлены на Рис.3.

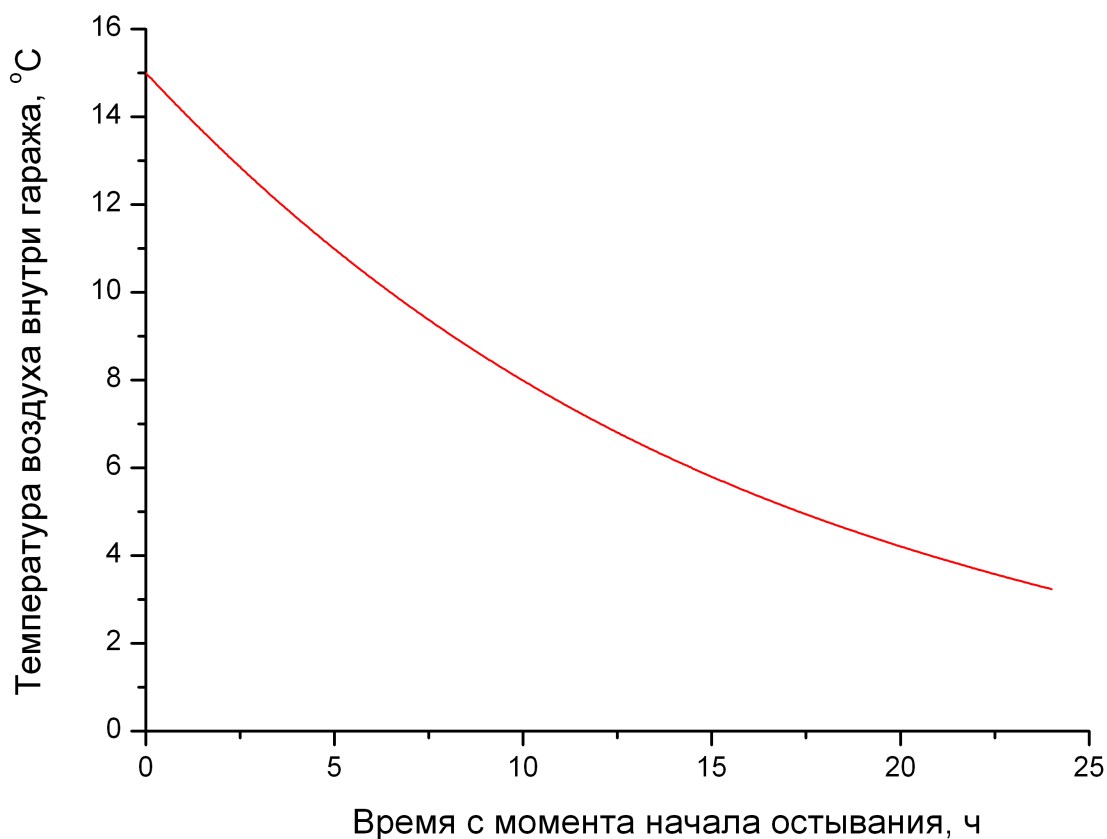


Рис 3. Зависимость температуры воздуха внутри гаража от времени.

Выводы

Таким образом, в данной статье описан порядок проведения теплотехнических обследований для определения динамики изменения температурного поля внутри зданий и строительных сооружений при отключении системы теплоснабжения этих объектов. Разработанная методика дает возможность определить временную зависимость температуры в произвольной реперной зоне внутри исследуемого строительного объекта при известной начальной температуре внутри объекта и известной температуре окружающей среды. Методика также позволяет сделать качественный вывод о соответствии теплотехнических характеристик здания проектным значениям на основе сравнения кривой остывания, рассчитанной с помощью предлагаемой методики с кривой, рассчитанной, исходя из проектных значений теплотехнических характеристик материалов, составляющих исследуемый объект.

Теплотехническое обследование строительных объектов для определения динамики их остывания включает в себя:

- анализ структуры исследуемого строительного объекта и выбранной реперной зоны внутри него и выбор соответствующей тепловой схемы, моделирующей теплотехнические свойства объекта;

- измерение и запись в компьютер температур окружающей среды, а также температур и тепловых потоков в специально выбираемых реперных зонах внутри исследуемого объекта;

- расчет семейства кривых остывания здания при различных начальных значениях температур воздуха внутри здания и температур окружающей среды для заполнения энергетического паспорта здания в графе "по результатам натурных обследований";
- составление протокола результатов проведенных исследований.

Кривые остывания рассчитываются для определенной реперной зоны внутри исследуемого объекта. Как правило, в качестве выбирается такое помещение, от температуры внутри которого функционирование систем теплоснабжения зависит в первую очередь.

Если необходимо прогнозирование динамики остывания нескольких помещений внутри здания, то каждое из этих помещений обследуется по отдельности. Данная методика регламентирует проведение обследования лишь в одной из реперных зон. Остальные реперные зоны, в случае, если необходимо также провести и их обследование, исследуются аналогично. Обработка результатов обследования проводится по специальной программе на персональном компьютере.

Разработанный метод обладает существенным экономическим и техническим эффектом.

Достоверность и надежность эксплуатации методики подтверждается обследованиями на практике строительных объектов на территории Москвы. Разработанные математические методы и требования к аппаратному обеспечению реализованы в виде методик и аппаратно-программных комплексов, использующих стандартные измерительные и вычислительные средства. Созданные методики обеспечивают определение показателей назначения с погрешностью не более 15 %

Литература

- 1 Дмитриев А.Н. Управление энергосберегающими инновациями в строительстве зданий: Учебное пособие.- М.: АСВ 2000. – 320 с.
2. Защита панельных зданий от воздействия перепада температуры при аварийном отключении отопления. №"Промышленное и гражданское строительство" 12.08.2002, <http://www.stroi.ru/tsch/d916dr70220m428.html>.
3. O. Lebedev, D. Kirzhanov, V. Avramenko and O. Budadin, THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF BUILDINGS IN PRACTICE // Proceedings of 16th WCNDT – 2004, № 609, 1-8.