

УДК.697.1

МОНИТОРИНГ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОТДЕЛЬНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Пуговкин А.В., Петрова Н.И., Купреков С.В., Абрамчук С.И.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск*

Мониторинг теплового режима отдельных помещений и здания в целом на этапах ввода здания в эксплуатацию и самой эксплуатации является важной практической задачей. Данная задача включает в себя анализ теплового режима как отдельного помещения, так и здания в целом; анализ влияния на тепловой режим таких факторов, как эффективность работы отопительных приборов; влияния на тепловой режим помещения внешней среды, т.е. температуры воздуха внешней среды, ветровой нагрузки и пр. Решение этой задачи производится нами путем измерения в реальных условиях температур объектов и обработки результатов с помощью простой математической модели.

Математическому описанию тепловых режимов посвящено большое количество работ известных авторов [1–8]. Рассмотрим основные подходы.

1. Математическое моделирование тепловых процессов. Это сложная математическая модель, которая основана на решении уравнений теплопроводности, например, для отдельного помещения, когда учитываются граничные условия на стенах, конвекционные потоки внутри помещения. Данный подход, описанный в [1, 2], связан с большим объемом вычислений и поэтому может использоваться при проектировании систем теплоснабжения, но для систем мониторинга (энергоаудита) и учета потребляемой тепловой энергии данные алгоритмы являются сложными при технической реализации и дорогостоящими.

2. Математические модели, в которых оперируют средними температурами. Этот подход описан в [3, 4], но он недостаточно развит с точки зрения применимости в практике энергоаудита и учета тепловой энергии.

3. Анализ тепловых режимов зданий и помещений, основанный на применении стационарных уравнений, когда не учитывается развитие процессов во времени. Этот подход не позволяет учитывать динамические процессы, т.е. изменение температуры внешней среды, изменение параметров помещения [5–8].

Исходя из вышесказанного, можно сформулировать основное требование к математической модели, которое состоит в обеспечении быстродействия при ее реализации, что может быть достигнуто относительной простотой модели.

При математическом описании зданий в целом и отдельных помещений можно выделить следующие основные направления моделирования:

- моделирование теплового режима отдельного помещения, в котором учитываются процессы, поведение температуры воздуха внутри помещения, поведение температуры ограждений (стены, перекрытия) при заданных температурах источника и температурах внешней среды. Так же нужно учитывать заданные температуры смежных помещений;

- моделирование при учете состояния теплового источника, когда его параметры и его температуры меняются под воздействием внешних условий. Модель теплоисточника может быть объединена с моделью помещения.

Рассмотрим математическую модель отдельного помещения, которое содержит внутренние стены и перекрытия, составляющие внутреннее ограждение, внешнюю

стену с окном, тепловой источник (батарея или тепловентилятор), а также имеет смежные помещения. Прирост тепловой энергии происходит за счет отопительных приборов, а ее убыль — за счет поглощения стен, излучения смежных помещений (коридор), излучения во внешнюю среду через окно и внешнюю стену. Кроме того, необходимо учитывать перенос воздушных масс за счет вентиляции, щелей в окнах и дверях.

В основу математического моделирования положен метод дифференциальных балансных уравнений [4]. Принятый подход исключает из рассмотрения некоторые особенности происходящих процессов, но общая картина передачи и преобразования тепловой энергии позволяет проследить все механизмы теплообмена от подведения ее к объекту до условий сохранения и диссипации в окружающее пространство.

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = G_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_1) - G_{\text{огр}} \cdot (T_1 - T_2) - G_{\text{внеш}} \cdot (T_1 - T_{\text{внеш}}); \\ C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = G_{\text{огр}} \cdot (T_1 - T_2) - G_{\text{см}} \cdot (T_2 - T_{\text{см}}); \\ C_{\text{ист}} \cdot \frac{dT_3}{dt} = M \cdot \Delta T_{\text{ист}} - G_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_1), \end{cases} \quad (1)$$

где $Q_1 = C_1 \cdot T_1$ — количество тепловой энергии воздушной массы, Дж; C_1 — теплоемкость помещения; T_1 — температура воздуха в помещении, °С; $G_{\text{ист}}$ — коэффициент теплоотдачи отопительного прибора, Вт/°С; $T_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}$ — средняя температура поверхности отопительного прибора, °С; $T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{вых}}$ — температура теплоносителя подающего и обратного трубопровода соответственно, °С; $G_{\text{огр}}$ — коэффициент теплопередачи во внутренние ограждения, Вт/°С; T_2 — температура ограждения, °С; $G_{\text{внеш}}$ — коэффициент теплопередачи во внешнюю среду, Вт/°С; $T_{\text{внеш}}$ — температура внешней среды, °С; $Q_2 = C_2 \cdot T_2$ — количество тепловой энергии ограждений помещения, Дж; C_2 — теплоемкость внутренних ограждений; $G_{\text{см}}$ — коэффициент теплопередачи из внутреннего ограждения в соседнее помещение, Вт/°С; $T_{\text{см}}$ — температура воздуха смежного помещения, °С. $Q_3 = C_{\text{ист}} \cdot T_{\text{ист}}$ — количество тепловой энергии отопительного прибора, Дж; $C_{\text{ист}}$ — теплоемкость отопительного прибора; $M = c_3 \cdot m$ — расход теплоносителя, Вт/°С; c_3 — удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С); m — массовый расход теплоносителя, кг/с; $\Delta T_{\text{ист}} = T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}$ — срабатываемый температурный напор теплоносителя, °С; t — текущее время, сек.

В системе уравнений (1) первое уравнение описывает изменение тепловой энергии воздушной массы Q_1 , заключенной в комнате объемом V . Аналогичным образом выглядит второе уравнение для системы ограждений, в которую входят стены, перекрытия и смежные помещения. Учтем, что температура смежных помещений не совпадает с температурой ограждений рассматриваемого помещения. Третье уравнение описывает динамику поведения теплового источника и учитывает его инерционные свойства, скорость подачи теплоносителя и другие параметры. Данную систему уравнений можно применить для расчета теплового режима системы помещений как в стационарном, так и в динамическом режиме.

Для проверки адекватности математической модели (1) и исследования тепловых процессов в помещении было проведено моделирование с использованием

справочных значений параметров, учитывающих фактические теплотехнические характеристики наружных ограждений (приведенное сопротивление теплопередачи и воздухопроницания) [7]. Также были заданы следующие значения:

$$G_{\text{ист}}/C_1 = 5,15 \cdot 10^{-5}, \text{с}^{-1}; \quad G_{\text{внеш}}/C_1 = 2,78 \cdot 10^{-5}, \text{с}^{-1}; \quad G_{\text{огр}}/C_1 = 0,56 \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1};$$

$G_{\text{см}}/C_1 = 0,49 \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$; температура теплового источника 45°C , температура внешней среды – 17°C , температура смежных помещений 17°C .

При решении системы (1) можно сделать некоторые приближения.

1. Инерционные свойства отопительного прибора характеризуются постоянной времени $\tau_{\text{ист}} = C_{\text{ист}}/G_{\text{ист}}$. Вводя коэффициент $R_{\text{ист}}$, обратный коэффициенту $C_{\text{ист}}$, получим выражение для постоянной времени $\tau_{\text{ист}} = R_{\text{ист}} \cdot C_{\text{ист}}$. Постоянная времени $\tau_{\text{ист}}$ много меньше постоянных времени для воздуха помещений $\tau_{\text{внеш}} = C_1/G_{\text{внеш}}$ и для ограждений $\tau_{\text{огр}} = C_2/G_{\text{огр}}$. Поэтому уравнение для отопительного прибора можно решать независимо, полагая T_1 и T_2 постоянными.

2. Уравнения для воздуха и ограждений можно решать совместно без учета третьего уравнения, если температура отопительного прибора поддерживается постоянной.

Наибольший интерес данная математическая модель представляет при решении обратной задачи, когда тепловой режим приводится в нестационарное состояние путем нагревания или охлаждения помещения. При обработке полученной температурной зависимости находятся искомые параметры уравнений — коэффициенты теплоотдачи отопительных приборов, коэффициенты теплопередачи через внешние и внутренние ограждения, теплоемкости элементов помещения.

Рассмотрим возможность исследования и измерения коэффициента теплоотдачи в динамическом режиме, когда изменяются как тепловая мощность, так и температура поверхности отопительного прибора. Для этого рассмотрим третье уравнение теплового баланса отопительного прибора системы (1). В качестве допущения полагаем в первом приближении, что коэффициенты $G_{\text{ист}}$ и $C_{\text{ист}}$ являются константами, хотя на практике они могут быть функциями температуры $T_{\text{ист}}$.

Если прекратить подачу теплоносителя ($M = 0$), то из третьего уравнения системы (1) можно найти коэффициент теплоотдачи:

$$G_{\text{ист}} = \frac{C_{\text{ист}} \cdot \frac{dT_{\text{ист}}}{dt}}{T_{\text{ист}}^{\kappa} - T_1^{\kappa}}. \quad (2)$$

Процедура измерения заключается в следующих действиях:

- нахождение температуры остывающего отопительного прибора как функции времени $T_{\text{ист}} = f(t)$;
- измерение температуры воздуха, которая в пределах интервала наблюдения является постоянной величиной;
- нахождение скорости изменения температуры отопительного прибора во времени $dT_{\text{ист}}/dt$ в заданной точке, с последующим вычислением коэффициента

теплоотдачи (2) при известной теплоемкости отопительного прибора (задается справочно, либо измеряется в лаборатории).

В данном случае коэффициент теплоотдачи измеряется для каждого отопительного прибора с учетом его индивидуальных особенностей. Алгоритм реализуется в условиях эксплуатации при прекращении подачи теплоносителя в стояке системы отопления. Еще одним достоинством такого является то, что он учитывает зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора ($T_{ист} - T_1$), учитывается конвекция и др. Это следует из дифференциального характера уравнения (2). При решении обратной задачи (нахождение $G_{ист}$) нелинейность будет учитываться.

Проверка предложенного метода осуществлялась на экспериментальной установке (рис. 1).

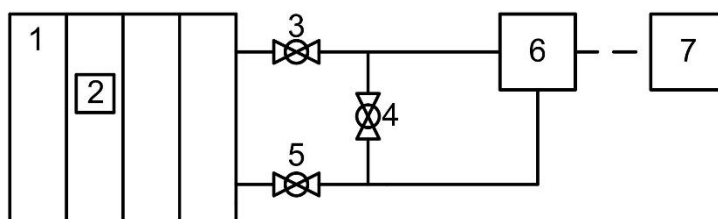


Рис. 1. — Структурная схема экспериментальной установки.

1 — исследуемый отопительный прибор, 2 — термоматчик,
3,4,5 — запорная арматура, 6 — водонагреватель, 7 — электросчетчик.

Здесь тепловая энергия поступает в исследуемый отопительный прибор от водонагревателя через систему водопроводных труб. Запорная арматура с помощью моста позволяет отключать отопительный прибор или включать его на полную нагрузку. Измерение потребляемой электрической мощности осуществляется электросчетчиком, а измерение температур – термоматчиками на основе термпар или полупроводниковых приборов. Тепловая мощность, поступающая в отопительный прибор, находится с помощью методики, упомянутой в [9]. Для этого из полной электрической мощности вычитается мощность, идущая на нагревание водонагревателя и подводящих труб. Результаты экспериментов приведены на (рис. 2).

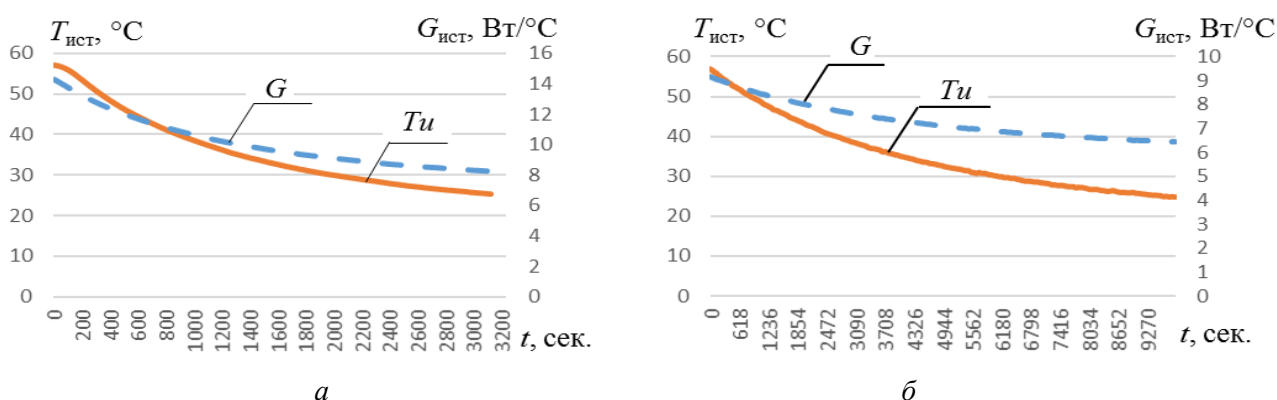


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований различных типов радиаторов:
а — алюминиевого; б — чугунного радиатора.

На рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости остывания двух отопительных приборов: чугунного радиатора из четырех секций и алюминиевого

радиатора из восьми секций. Для устранения случайных выбросов произведена операция сглаживания.

Как видно из графиков, остывание происходит по закону, близкому к экспоненциальному, причем алюминиевый радиатор остывает быстрее, чем чугунный. Время остывания до температуры 25 °С для чугунного прибора составила 153 мин., для алюминиевого — 52 минуты.

Нахождение коэффициента $G_{ист}$ проводилось по формуле (2). При этом теплоемкость прибора находилась как сумма теплоемкостей теплоносителя (воды) и металлического корпуса (чугун или алюминий).

Результаты вычислений приведены на (рис. 2а и 2б), соответственно, и в (табл. 1). Экспериментальные значения снимались через 10 секунд. Как видно (рис. 2а и 2б), коэффициент теплоотдачи не является постоянной величиной, для чугунного радиатора он изменяется в диапазоне 6,5–9 Вт/°С при температурах отопительного прибора от 25°С до 57 °С (25% по отношению к среднему значению); для алюминиевого радиатора – от 8 Вт/°С до 14 Вт/°С (37% по отношению к среднему значению). Кроме этого, экспериментально были найдены значения коэффициентов теплоотдачи для температуры $T_{ист} = 57$ °С, вычисленные по классической методике [9]. Для чугунного радиатора $G_{ист} = 8,32$ Вт/°С, для алюминиевого $G_{ист} = 14,59$ Вт/°С.

Таблица 1. — Основные результаты эксперимента.

Тип прибора	$C_{ист}$, теплоемкость, Дж/°С	$G_{ист}$, коэфф. теплоотдачи, Вт/°С
Чугунный радиатор, 4 секции	36054	6,5-9
Алюминиевый радиатор 8 секций	17700	8-14
Труба ¾ дюйма 3 м	6441	2,8

Коэффициент теплоотдачи приводится (табл. 1) для температурного напора от 5°С до 37°С.

В ходе проведения эксперимента было также рассмотрено влияние расположения отопительного прибора на коэффициент $G_{ист}$:

- Алюминиевая батарея: влияние стены – 6%;
- Алюминиевая батарея: влияние пола – 9%;
- Алюминиевая батарея: влияние мебели (стол) – 12,5%;
- Труба: влияние мебели и штор – 9,4%.

Таким образом можно сделать вывод, что теплоотдача алюминиевой батареи зависит от ее расположения и окружающей мебели в пределах 12,5%, теплоотдача стояков зависит от окружения в пределах 9,4%.

Зная коэффициент $G_{ист}$ нетрудно вычислить тепловую мощность и количество тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором согласно третьему уравнению системы (1).

При этом стоит учесть, что основной вклад в погрешность нахождения коэффициента $G_{ист}$ вносит аддитивная составляющая погрешности определения температурного напора ΔT . Поскольку разность температур находится с помощью одного температурного датчика, влияние аддитивной составляющей близко к нулю. Мультипликативная составляющая ошибки нахождения производной по формуле (2)

$\frac{dT_u}{dt}$ будет мала, поскольку такая же ошибка присуща измерению температурного напора ΔT . При выполнении операции деления, согласно (2), эти ошибки компенсируют друг друга.

При вычислении количества тепловой энергии Q_3 происходит суммирование случайной величины, флуктуирующей относительно величины $(T_{ист} - T_{i1})$. При этом происходит дальнейшее уменьшение погрешности измерений.

Для сравнения энергии, посчитанной предложенным методом, и энергии, зафиксированной электросчетчиком для обеих батарей, провели эксперименты в рабочем режиме (скорость и температура теплоносителя изменялись в процессе измерений) (табл. 2).

Таблица 2. — Тепловая энергия и погрешность ее измерения

Тип прибора	Тепловая энергия, Вт·ч	Вычисленная энергия, Вт·ч	Погрешность измерения, %
Алюминиевая батарея	3100	3319	6-7
Чугунная батарея	3300	3331	1-2

Известное значение $G_{ист}$ позволяет нам решить задачу нахождения остальных параметров уравнения (1). Для этого нами были проведены натурные эксперименты в жилом помещении объемом 20 м^3 с одним тепловым источником – водяным радиатором отопления (МС-140) из 8-ми секций. Помещение содержит внутренние ограждения, внешнее ограждение, окно, а также имеет смежные помещения. При проведении экспериментов с помощью нескольких температурных датчиков измерялись средние температуры воздуха и внутренних ограждений, а также температуры внешней среды и поверхности батареи в стационарных и динамических режимах. Для описанных выше экспериментов, которые повторялись 3 раза, при усреднении получены следующие значения параметров (при средней квадратической погрешности результата измерений не превышающей 1,8 %):

$$G_{ист} = 27 \text{ Вт/}^\circ\text{C}, G_{огр} = 170,41 \text{ Вт/}^\circ\text{C}, G_{внеш} = 15,22 \text{ Вт/}^\circ\text{C}.$$

Выводы

1. Система уравнений (1) устанавливает взаимосвязь коэффициентов теплопередачи во всей цепочке подведения, преобразования и рассеяния тепловой энергии, а именно: теплоноситель — отопительный прибор — воздух — ограждения. Реальная оценка каждого из этих соотношений в конкретных условиях работы позволяет определить влияние различных параметров на процесс теплообмена.

2. Предложенная математическая модель может служить основой для создания алгоритма и программного обеспечения АСУ теплоснабжением, как отдельных помещений, так и целых зданий (сооружений).

3. Нахождение тепловых параметров из экспериментальных исследований позволит учесть индивидуальные особенности помещения, такие как тип и состояние источников тепла, состояние внешнего ограждения, реальное состояние внутреннего ограждения.

4. Предложенный метод нахождения тепловой энергии позволяет сократить погрешность измерения (меньше 5%) за счет экспериментального нахождения коэффициента теплоотдачи, компенсации ошибки измерения за счет калибровки, статистического усреднения при нахождении тепловой энергии.

5. Непрерывный внутренний энергоаудит помещения возможно сочетать с измерением потребляемой тепловой энергии с помощью одних и тех же температурных датчиков.

6. Предложенный метод позволяет организовать мониторинг теплового режима отдельных помещений и здания в целом на этапах ввода здания в эксплуатацию и самой эксплуатации.

Литература

1. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2012.
2. Табунщиков Ю.А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений / Ю.А. Табунщиков Д.Ю. Хромец, Ю.А. Матросов. – М. : Стройиздат, 1986. – 382 с.
3. Федюк Р.С. Математическая модель управления тепловым балансом энергосберегающего здания / Р.С. Федюк // Конференция 2010 — Экономические аспекты экологической безопасности, Дальневосточный государственный технический университет, г. Владивосток, Россия [Электронный ресурс]. — Режим доступа:
http://ecology.ostu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=240:2010-12-20-10-21-35&catid=61:2010-11-01-09-42-55&Itemid=63.
4. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения / А.В. Пуговкин [и др.] // Докл. ТУСУР. – Томск : В-Спектр, 2010. – № 2 (22).
5. Инженерное оборудование зданий и сооружений : энцикл. / под ред. С.В. Яковлева. – М. : Стройиздат, 1994. – 512 с.
6. МГСН 2.01–99. Энергосбережение в зданиях. Нормы по тепловодозлектроснабжению для вновь строящихся зданий. – Введ. 1999–02–23.
7. Щекин Р.В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Кн. 1 / Р.В. Щекин, С.М. Корневский, Г.Е. Бем. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев : Будівельник, 1976. – 416 с.
8. Отопление и вентиляция: в 2 ч. / П.Н. Каменев [и др.]. – Ч. I. Отопление. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1975. – 483 с.
9. Действующая методика испытания отопительных приборов / В.И. Сасин, Г.А. Бершидский, Т.Н. Прокопенко, Б.В. Швецов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pkf-sk.ru/artic-les.php?id=365.html>, свободный (дата обращения: 22.11.2014).