

Динамический метод измерения эффективности нагревательных приборов.

А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, В.А. Медведев, Н.И. Муслимова, В.С. Степной

Эффективность нагревательных приборов характеризуется коэффициентом теплоотдачи G , суть которого следует из уравнения для тепловой мощности $P_{\text{метл}}$, отдаваемой прибором:

$$P_{\text{метл}} = G \cdot (T_u - T_в), \quad (1)$$

где T_u – средняя температура поверхности отопительного прибора (источника тепла), $T_в$ – средняя температура окружающего воздуха.

Исследованию эффективности нагревательных (отопительных) приборов посвящено значительное количество статей и патентов, например [1-4]. Все эти работы основаны на применении уравнения (1). При этом измеряется подаваемая тепловая мощность и температуры. Так в [1] дается сравнительный анализ различных методик измерения эффективности отопительных приборов, как в России, так и за рубежом. Основной вывод, который следует из этой работы, заключается в том, что показатели эффективности существенно зависят от условий эксплуатации и большого количества параметров. К таким параметрам относятся скорость подачи теплоносителя, диапазон рабочих температур, схемы теплоснабжения (одно- или двухтрубная), давление в системе и т.д.

Для минимизации этих неопределенностей разработаны специальные изотермические измерительные камеры, которые являются довольно сложными, громоздкими и дорогостоящими устройствами и требуют хорошо обученного персонала. Тем не менее, эти камеры не позволяют в полной мере устранить неоднозначность измерений. Поскольку системы теплоснабжения в России и Европе существенно отличаются, то сопоставить их эффективность не всегда удастся. Еще один фактор неопределенности заключается в том, что процессы теплоотдачи содержат составляющую теплопереноса из металла в воздух и конвективную составляющую. Поскольку эффективность конвективного теплообмена характеризуется существенной нелинейной зависимостью от температурного напора $(T_u - T_в)$, то эффективность нужно характеризовать либо функцией, либо какой-то характеристикой этой функции. Современные же методики оперируют значениями эффективности, как правило, в одной точке.

В работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента теплоотдачи на специальной установке, работающей в стационарном режиме. В соответствии с выражением (1) измерялись входная тепловая мощность и

температурный напор. Были получены зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры отопительного прибора, температуры воздуха, скорости подачи теплоносителя. Однако, количество полученных экспериментальных точек явно недостаточно, а точностные характеристики (погрешности измерения) не обсуждаются.

В нашей работе [5] рассмотрен динамический способ нахождения тепловых параметров помещения и, в том числе, коэффициента теплоотдачи отопительного прибора. Этот метод позволяет учесть индивидуальные особенности, как помещения, так и отопительного прибора, но требует большого количества термодатчиков и не позволяет получить высокую точность измерений.

Нами рассмотрена другая возможность исследования и измерения коэффициента теплоотдачи в динамическом режиме, когда изменяются как тепловая мощность, так и температура поверхности отопительного прибора. Для этого рассмотрим нестационарное уравнение теплового баланса отопительного прибора:

$$C \cdot \frac{dT_u}{dt} = P_{ex.} - G \cdot (T_u - T_e), \quad (2)$$

где $C_{уст.}$ – теплоемкость отопительного прибора, [Дж/°С];

t – текущее время [сек.].

В данном уравнении прибыль тепловой энергии происходит за счет тепловой мощности, поступающей в отопительный прибор $P_{ex.}$, а расход за счет теплоотдачи батареи в воздушную среду $G \cdot (T_u - T_e)$. В качестве допущения, полагаем в первом приближении коэффициенты G и $C_{уст.}$ являются константами, хотя на практике они могут быть функциями температуры T_u .

Для проверки модели рассмотрим режим остывания отопительного прибора. В этом случае прекращается подача теплоносителя и $P_{ex.} = 0$ в начальный момент времени ($t = 0$).

Результаты моделирования приведены на рисунке 1, где параметром является величина теплоемкости отопительного прибора $C_{уст.}$. При моделировании полагали $C_{уст.} = 78,273$ кДж/°С., $G = 20$ Вт/°С.

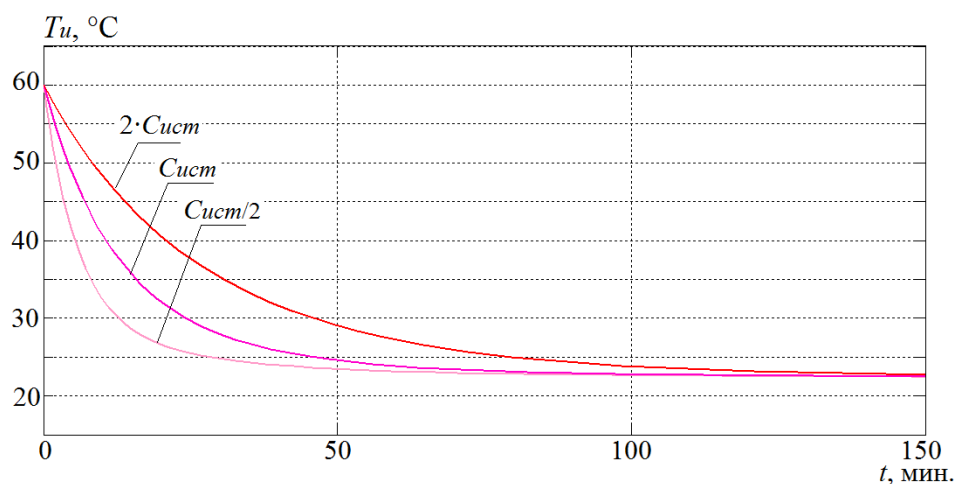


Рисунок 1 – Остывание температуры батареи при различных $C_{уст.}$

Анализ полученных результатов приводит к очевидным выводам: уменьшение температуры происходит по экспоненциальному закону, причем постоянная времени экспоненты (скорость затухания) зависит от G и $C_{уст.}$.

Если прекратить подачу теплоносителя ($G = 0$), то из уравнения (2) можно найти коэффициент теплоотдачи:

$$G = \frac{C_{уст.} \cdot \frac{dT_u}{dt}}{T_{u.}^{\kappa} - T_{\epsilon}^{\kappa}}, [\text{Вт}/^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

Процедура измерения заключается в следующих действиях:

- нахождение температуры остывающего отопительного прибора как функции времени $T_u = f(t)$;
- измерение температуры воздуха, которая в пределах интервала наблюдения является постоянной величиной;
- нахождение скорости изменения температуры отопительного прибора во времени

$\frac{dT_u}{dt}$ в заданной точке, с последующим вычислением коэффициента теплоотдачи (3) при известной теплоемкости отопительного прибора. В первом приближении значение теплоемкости находится как сумма теплоемкостей теплоносителя и металлического корпуса. В дальнейшем это значение может уточняться.

В данном случае коэффициент теплоотдачи измеряется для каждого отопительного прибора с учетом его индивидуальных особенностей. Еще одним достоинством такого метода измерения коэффициента теплоотдачи является то, что он учитывает зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры отопительного прибора. Это следует из дифференциального характера уравнения (2). При решении обратной задачи (нахождение G) нелинейность будет учитываться.

Оценим погрешность предложенного метода. Будем учитывать только значение систематической погрешности, поскольку случайная составляющая погрешности исключается при обработке экспериментальных результатов путем применений операций усреднения и сглаживания.

Значение погрешности измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора можно найти как сумму погрешностей определения отдельных величин, входящих в выражение (3): $C_{уст}, \frac{dT_u}{dt}$ и $\Delta T = (T_u - T_6)$.

Относительная погрешность определения полной теплоемкости отопительного прибора с водой:

$$\delta_{C_{уст}} = \delta_{C_1} + \delta_{V_1} + \delta_{C_2} + \delta_{P_2} \approx 1\% , \text{ где}$$

C_1 – теплоемкость теплоносителя (воды) в отопительном приборе;

V_1 – объем воды в отопительном приборе;

C_2 – теплоемкость материала, из которого изготовлен отопительный прибор (металл);

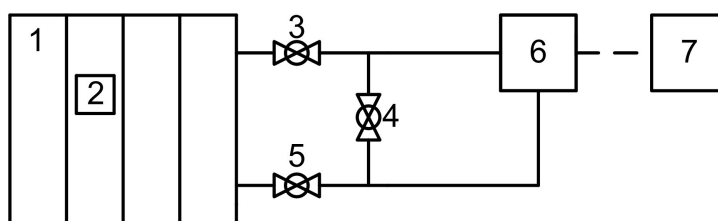
P_2 – вес металла.

Предполагаем, что значение погрешности $\delta_{C_{уст}}$ не превышает 1% в силу стабильности этой характеристики.

При вычислении погрешности нахождения производной $\frac{dT_u}{dt}$ будем учитывать, что ошибка измерения температуры содержит аддитивную и мультипликативную составляющие. Поскольку разность температур находится с помощью одного температурного датчика, влияние аддитивной составляющей близко к нулю. Мультипликативная составляющая ошибки так же будет мала, поскольку такая же ошибка присуща измерению температурного напора ΔT . При выполнении операции деления, согласно (3), эти ошибки компенсируют друг друга. Проведенные оценки показывают, что погрешность вычисления градиента температуры не превышает 1 %.

Таким образом, основной вклад в погрешность нахождения коэффициента G вносит аддитивная составляющая погрешности определения температурного напора ΔT . При точности измерения температуры в 0,2 °С и величине $\Delta T = 20$ °С, максимальная погрешность нахождения температурного напора составляет 2%, а общая погрешность нахождения коэффициента теплоотдачи не превышает 3–4 %.

Проверка предложенного метода осуществлялась на экспериментальной установке, структурная схема которой представлена на рисунке 2.



1 – исследуемый отопительный прибор; 2 – термодатчик;
3,4,5 – запорная арматура, 6 – водонагреватель; 7 – электросчетчик.

Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки

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 – термодатчиками на основе термопар или полупроводниковых приборов. Тепловая мощность, поступающая в отопительный прибор, находится с помощью методики, упомянутой в [1]. Для этого из полной электрической мощности вычитается мощность, идущая на нагревание водонагревателя и подводящих труб. Данная установка позволяет измерить коэффициент теплоотдачи как с помощью метода по формуле (1) (когда известна тепловая мощность и температурный напор), так и с помощью предложенного метода (формула 3) и сравнить их.

Результаты экспериментов приведены на рисунке 3.

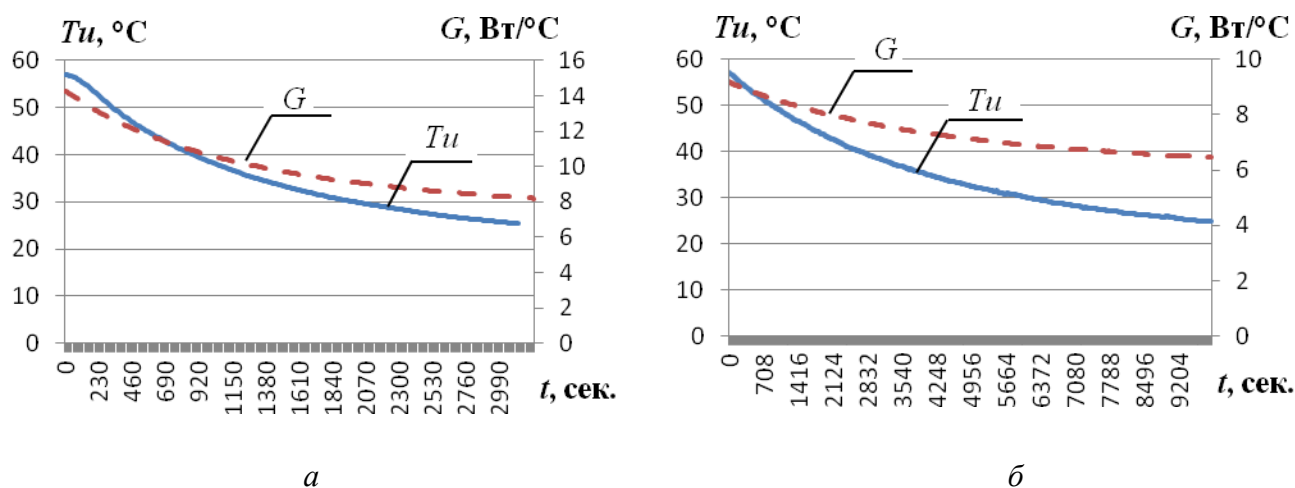


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований различных типов радиаторов:

a – алюминиевого; *б* – чугунного радиатора

На рисунке 3 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 проводилось по формуле (3). При этом теплоемкость прибора находилась как сумма теплоемкостей теплоносителя (воды) и металлического корпуса (чугун или алюминий). Для чугунного радиатора $C_{уст} = 36054$ Дж/°С, для алюминиевого – $C_{уст} = 17700$ Дж/°С.

Результаты вычислений приведены на рисунках 3а и 3б, соответственно. Экспериментальные значения снимались через 10 секунд. Как видно из рисунков 3а и 3б, 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, вычисленные согласно формуле (1) по классической методике, для температуры $T_u = 57$ °С. Для чугунного радиатора $G = 8,32$ Вт/°С, для алюминиевого $G = 14,59$ Вт/°С.

По полученным экспериментальным результатам можно сделать выводы:

1. Алюминиевый радиатор остывает быстрее, поскольку имеет меньшую теплоемкость и больший коэффициент теплоотдачи.
2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора содержит как постоянную, так и переменную составляющие. Постоянная составляющая характеризует процесс теплопереноса. Переменная составляющая отвечает за конвективный обмен и инфракрасное излучение.
3. Предложенная методика нахождения коэффициента теплоотдачи позволяет определить эффективность отопительных приборов с учетом их индивидуальных особенностей (тип прибора, его расположение, влияние покраски и т.д.) и условий теплообмена (теплоперенос, конвекция и др.).
4. При нахождении тепловой мощности и тепловой энергии необходимо учитывать конвективный теплообмен, т.е. зависимость коэффициента теплоотдачи от разности температур поверхности батареи и воздуха. Особенно это важно для отопительных приборов со сложной конфигурацией.
5. Сопоставление экспериментальных результатов, полученных предложенным методом (согласно формуле 3) и классическим методом (1), дает положительный

результат и свидетельствует об адекватности предложенной математической модели и самого метода.

Литература:

1. В. И. Сасин, Г. А. Бершидский, Т. Н. Прокопенко, Б. В. Швецов. Действующая методика испытания отопительных приборов – требуется ли корректировка? <http://www.pkf-sk.ru/articles.php?id=365>
2. М. И. Низовцев, В. И. Терехов, З. П. Чепурная, Институт теплофизики СО РАН Институт теплофизики СО РАН. «Влияние физических параметров на радиаторные коэффициенты регистраторов расхода тепла отопительных приборов». АВОК №5/2005.
3. Казачков В.С., Шалай В.В., Попов А.А Учет теплопотребления в многоквартирных домах // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии, 2007, Вып. 3(60), с. 78-83.
4. Пуговкин А.В. и Купреков С.В., Патент РФ № 115472. «Устройство для измерения теплового сопротивления отопительной системы отдельного помещения».
5. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, Д.В. Абушкин, И.А. Заречная, Н.И. Муслимова. Доклады ТУСУРа, 2010— №2 (22).—Томск: В-Спектр, 2010.
6. Заявка 2012134982 Российская Федерация. Способ измерения сопротивления теплоотдачи отопительного прибора, Пуговкин Алексей Викторович, Купреков Степан Владимирович, Муслимова Надежда Игоревна, заявлено 15.08.2012 г.