

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ АЛЮМИНИЕВОГО РАДИАТОРА

*Мукашев А.М., Абрамчук С.И., Пуговкин А.В.*

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

Основным показателем эффективности отопительного прибора является его коэффициент теплоотдачи  $G_{\text{ист}}$ . Его смысл можно рассмотреть исходя из закона Ньютона-Рихмана для тепловой мощности  $P_{\text{тепл}}$ , отдаваемой прибором:

$$P_{\text{тепл}} = G_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}), \quad (1)$$

где  $T_{\text{ист}}$  – средняя температура поверхности отопительного прибора;

$T_{\text{возд}}$  – средняя температура воздуха в помещении;

$T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}$  – температурный напор.

Следует заметить, что коэффициент теплоотдачи (тепловая проводимость) является интегральным коэффициентом, который учитывает индивидуальные особенности отопительного прибора, в том числе площадь поверхности. Существует большое количество работ, посвященных нахождению коэффициента теплоотдачи [1-4]. Все эти исследования проводились в стационарном режиме, где отдаваемая тепловая мощность равна подводимой, которая в системах с циркуляцией теплоносителя описывается формулой:

$$P_{\text{тепл}} = V \cdot \rho \cdot C \cdot (T_1 - T_2), \quad (2)$$

где  $V$  – расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/с;

$\rho$ ,  $C$  – плотность и удельная теплоемкость теплоносителя;

$T_1$ ,  $T_2$  – температура теплоносителя в подающем и отводящем трубопроводе соответственно, К.

Как правило, коэффициент теплоотдачи отопительного прибора находится из справочной литературы или путем измерения в специализированных лабораториях. При этом, стационарный метод требует измерения расхода теплоносителя и двух температур, разность которых невелика. Данный метод не учитывает условий эксплуатации отопительного прибора и требует значительных временных затрат на нахождение коэффициента теплоотдачи (порядка 5-7 дней при измерении в лабораториях). Для более оперативного нахождения коэффициента теплоотдачи в условиях эксплуатации нами был предложен динамический метод [5-7]. Суть его заключается в том, что коэффициент теплоотдачи определяется при помощи математической модели:

$$\frac{dT_{\text{ист}}}{dt} \cdot C_{\text{ист}} = P_{\text{вх}} - G_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}), \quad (3)$$

где  $\frac{dT_{\text{ист}}}{dt}$  – скорость изменения температуры поверхности радиатора во времени;

$C_{\text{ист}}$  – теплоемкость отопительного прибора, Дж/К.

Данная модель предполагает измерение характеристик отопительного прибора в динамическом режиме, когда подаваемая входная мощность не равна отдаваемой. В режиме остывания прекращается подача тепловой мощности в отопительный прибор ( $P_{\text{вх}} = 0$ ). В этом случае из уравнения (3) опытным путем можно определить коэффициент теплоотдачи отопительного прибора:

$$G_{\text{ист}} = \frac{C_{\text{ист}} \frac{dT_{\text{ист}}}{dT_{\text{возд}}}}{T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}}, [\text{Вт}/^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

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  $\frac{dT_{\text{ист}}}{dT_{\text{возд}}}$  в заданной точке, с последующим вычислением коэффициента теплоотдачи

(выражение 4) 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 является то, что он учитывает зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры отопительного прибора при однократном измерении (2-3 часа). Это следует из дифференциального характера уравнения (3).

При помощи данного метода были исследованы достаточно простые отопительные приборы (чугунный и электрический масляный радиаторы). Для нахождения коэффициента теплоотдачи алюминиевого радиатора требуется усовершенствование математической модели. Данный вид отопительного прибора имеет более сложную конфигурацию (рис. 1), содержащую внутренний корпус (каркас) с теплоносителем и соединенное с ним ребрение. Энергия теплоносителя передается в металлический внутренний каркас, откуда рассеивается в окружающую среду двумя путями. Часть энергии от каркаса передается в воздух за счет конвективного теплообмена. Другая часть этой энергии за счет теплопроводности передается к внешним ребрам радиатора и затем отдается в воздух. Схематично распространение энергии для одной секции алюминиевого радиатора приведено на (рис. 1):

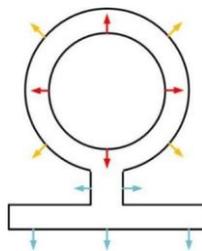


Рис. 1. Пути распространения тепловой энергии.

Красным цветом обозначена передача энергии от теплоносителя в каркас, желтым передача из каркаса в окружающую среду, синим передача из ребрения в окружающую среду. Эти процессы можно описать следующей системой уравнений, в которой в соответствии с распределением энергии первое уравнение описывает температуру каркаса  $T_1$ , а второе температуру ребер  $T_2$ :

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= P_{\text{вх}} - G_1 \cdot (T_1 - T_{\text{возд}}) - G_{12} \cdot (T_1 - T_2) \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= G_{12} \cdot (T_1 - T_2) - G_2 \cdot (T_2 - T_{\text{возд}}) \end{aligned} \quad (5)$$

где:  $C_1$  – теплоемкость теплоносителя и внутреннего каркаса;  
 $C_2$  – теплоемкость внешних и соединительных ребер;  
 $G_1$  – коэффициент теплоотдачи каркаса;  
 $G_{12}$  – коэффициент теплопередачи между корпусом и внешними ребрами;  
 $G_2$  – коэффициент теплоотдачи внешних ребер.

Результаты моделирования остывающего радиатора приведены на (рис. 2):

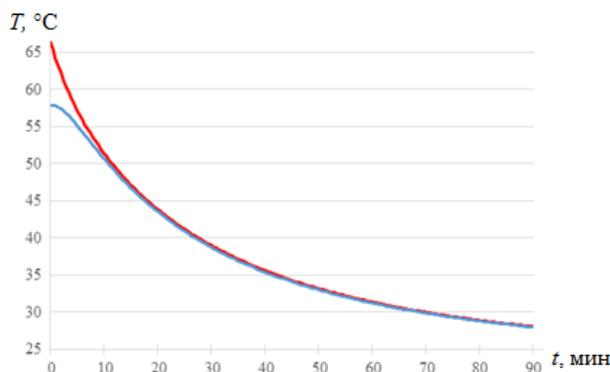


Рис. 2. Результаты моделирования остывания алюминиевого радиатора.

Красным цветом обозначена кривая температуры каркаса отопительного прибора от времени, а синим цветом кривая температуры ребра. Здесь характер остывания каркаса носит спадающий характер, близкий к экспоненциальному. Остывание ребер имеет более сложную зависимость. Вначале температура ребер меняется незначительно (имеет характер «полочки»), а потом, на втором этапе, затухает по закону, так же близкому к экспоненте. Причина появления этой полочки заключается в том, что убывание тепловой энергии ребер за счет теплоотдачи в воздух частично или полностью компенсируется притоком энергии от каркаса.

Дальнейший анализ системы уравнений (5) показывает, что для нахождения коэффициента теплоотдачи радиатора необходимо пользоваться температурной зависимостью остывания каркаса и формулой (4), что в свою очередь, нецелесообразно для остывающих ребер без дополнительных исследований. При этом в качестве теплоемкости можно пользоваться суммарной теплоемкостью радиатора. В этом случае ошибка, связанная с теплоемкостью, не будет превышать требуемой величины поскольку разность между средними температурами каркаса и ребра стремится к нулю. В этом случае система уравнений (5) сводится к уравнению (3).

Приведем экспериментальные температурные зависимости каркаса и ребра для остывающего радиатора (рис.3). Из данных кривых видно, что разность температур каркаса и ребра в начале остывания максимальна, а затем стремится к нулю. Расчетным путем было найдено, что максимальная погрешность, связанная с теплоемкостью, равна 7%.

Исследования отопительного прибора проводилось на экспериментальной установке, в состав которой входят: исследуемый радиатор, источник тепловой энергии (электронагреватель), циркуляционный насос, расширительный бак. Измерение тепловой энергии производилось двумя способами, - прямым и электрическим. Прямой метод использует измеренные данные разницы температур между входом и выходом отопительного прибора и массовый расход теплоносителя согласно формуле (2).

Вычисление количества тепловой энергии производится теплосчетчиком ВКТ-7 и передается в компьютер. Электрический метод основан на измерении электрической энергии, затраченной на генерацию тепловой энергии за вычетом тепловых потерь на соединительных трубах. Показания электросчетчика контролируются программой.

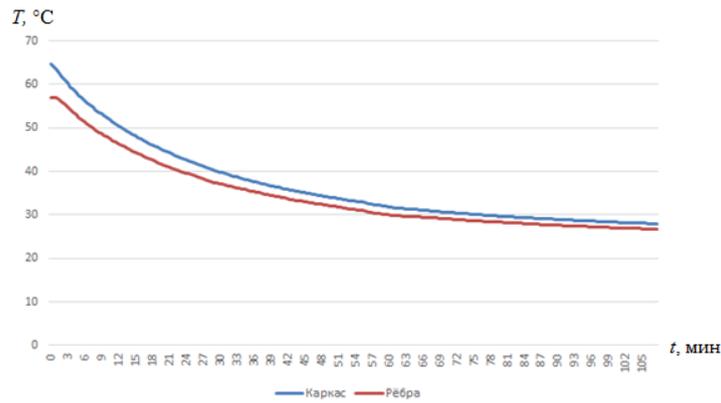


Рис. 3. Температурные зависимости каркаса и ребра

Измерение потерь на соединительных трубах проводилось путем замены отопительного прибора на шунт (короткий отрезок теплоизолированной трубы). Установка позволяет стабилизировать заданное оператором значение температурного напора (разницей между средней температурой радиатора и температурой воздуха) путем коммутации электроэнергии, подаваемой на электрический водонагреватель. Для снятия динамической характеристики коэффициента теплоотдачи прекращается подача теплоносителя. При этом контролируется средняя температура отопительного прибора в режиме остывания измерителем тепловой энергии. В качестве средства измерения температуры используются цифровые датчики температур DS18B20. Средние температуры отопительного прибора измеряются на каркасе в его геометрическом центре и на центральном ребре. Для повышения достоверности результатов в этих точках установлены по два датчика, значения температур с которых усреднялись. Измерение температуры воздуха производилось отдельным термодатчиком в соответствии с рекомендациями АВОК.

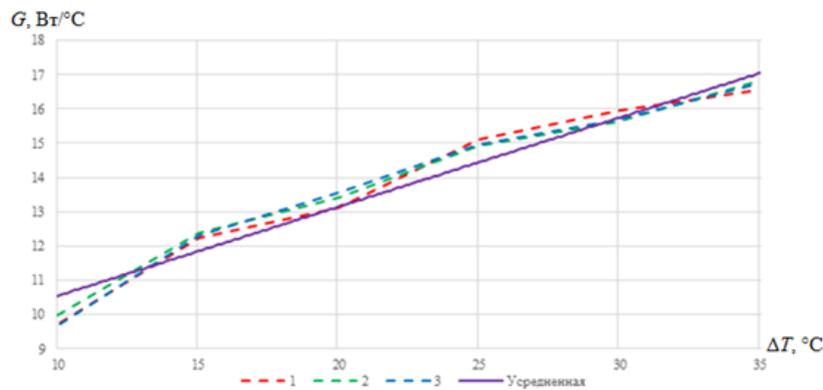


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи для электрического метода.

Статическая характеристика снималась по семи значениям температурного напора от  $10^\circ C$  до  $35^\circ C$  через  $5^\circ C$  двумя методами, (электрическим и прямым). Длительность измерения каждой точки 5 часов. Коэффициент теплоотдачи рассчитывается с использованием формулы (4). Измерения статической характеристики были повторены три раза. Каждая из полученных характеристик аппроксимировалась линейным уравнением, из трех уравнений были вычислены усредненные характеристики для электрического (рис. 4) и прямого (рис. 5) методов.

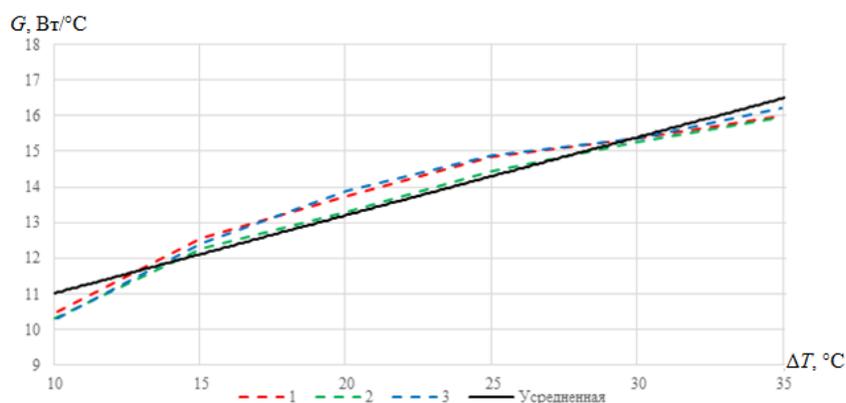


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи для прямого метода.

Динамическая характеристика снималась в режиме остывания от максимального значения температурного напора до  $10^\circ\text{C}$ . Теплоемкость отопительного прибора вычислялась как сумма теплоемкостей алюминиевого корпуса радиатора и объема воды в нем. Измерения динамической характеристики были повторены три раза. Каждая из полученных характеристик аппроксимировалась линейным уравнением, из трех уравнений была вычислена усредненная динамическая характеристика. Результаты сравнений статических и динамических характеристик коэффициента теплоотдачи приведены на (рис. 6).

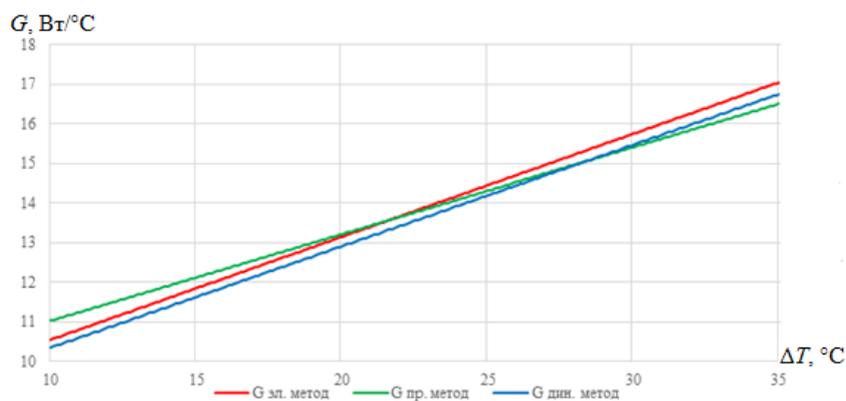


Рис. 6. Сравнение статических и динамических характеристик коэффициента теплоотдачи

Расхождения значений динамического коэффициента теплоотдачи относительно статического, замеренного электрическим способом, колеблются от  $-1,7\%$  при  $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ , до  $-1,9\%$  при  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ . Расхождения значений динамического коэффициента теплоотдачи относительно статического, замеренного прямым способом, колеблются от  $-6,1\%$  при  $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ , до  $1,5\%$  при  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ .

#### Выводы:

- Проведенные эксперименты подтвердили адекватность применения математической модели для алюминиевого радиатора.
- Конструкция измерителя тепловой энергии должна обеспечивать измерение температуры каркаса в геометрическом центре отопительного прибора.
- Предпочтительнее использование двух термодатчиков для измерения температур на соседних звеньях каркаса для повышения достоверности измерений.

Авторы выражают благодарность Степному Виктору Серафимовичу за помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов.

## Литература

1. Действующая методика испытания отопительных приборов – требуется ли корректировка? / В.И. Сасин, Г.А. Бершидский, Т.Н. Прокопенко, Б.В. Швецов // АВОК. – 2007. – № 4. – С. 46-51.
2. Л. Селенза, М. Дель Исолла, Р. Д Алесслио, Г. Фикко, П. Виго, А. Виола, Метрологический анализ интеллектуального теплосчетчика [пер. с англ.], 16-я Международная расходомерная конференция, ФЛОМЕКО 2013, код 105418, 24-26 сентября 2013 г. Париж, С. 546–550.
3. Низовцев М.И. Влияние физических параметров на радиаторные коэффициенты регистраторов расхода тепла отопительных приборов» / М.И. Низовцев, В.И. Терехов, З.П. Чепурная; Институт теплофизики СО РАН // АВОК. – 2005. – № 5.
4. Цветков Н.А. Совершенствование методики измерения тепловой мощности отопительных приборов в реальных условиях эксплуатации / Н.А. Цветков, А.В. Жуков, Ю.О. Кривошеин, М.Г. Иванчин, А.Е. Токмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 6. – С. 141–148.
5. Динамический метод измерения эффективности нагревательных приборов. / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, В.А. Медведев, Н.И. Муслимова, В.С. Степной // Приборы. – 2014, – № 7. – 10 С.
6. Абрамчук С.И. Энергетическая эффективность электрического обогревателя / С.И. Абрамчук, А.В. Пуговкин // Доклады ТУСУР. – 2014. – №4(34). – С. 211–214.
7. Эквивалентные электрические схемы отопительных приборов / В.С. Степной, С.И. Абрамчук, А.М. Мукашев, А.В. Пуговкин // Доклады ТУСУР. – 2014. - №1(31). – С. 238-241.