

УДК 627.922

МУКАШЕВ АЛИШЕР МУХТАРОВИЧ, магистрант,
ali_2475@mail.ru

ПУГОВКИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
pugovkinav@tor.tusur.ru

АБРАМЧУК СТАНИСЛАВ ИГОРЕВИЧ, аспирант,
zidanes@sibmail.com

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

На основании динамического метода определения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора проведено исследование алюминиевого радиатора. Применение математической модели для отопительного прибора в нестационарном режиме позволяет найти коэффициент теплоотдачи, теплоемкость отопительного прибора и вычислить отдаваемую тепловую энергию. Проведены эксперименты, подтверждающие адекватность применения математической модели для таких приборов.

Ключевые слова: алюминиевый радиатор; отопление; коэффициент теплоотдачи; тепловая энергия.

ALISHER M. MUKASHEV, Undergraduate Student,
ali_2475@mail.ru

ALEKSEI V. PUGOVKIN, DSc, Professor,
pugovkinav@tor.tusur.ru

STANISLAV I. ABRAMCHUK, Research Assistant,
zidanes@sibmail.com

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

MATHEMATICAL SIMULATION OF EFFICIENT CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF HEATING BODIES

The paper presents investigations of aluminum heater based on determination of the heat-transfer coefficient. A mathematical model of the heater in non-stationary mode allows this coefficient to be determined as well as heating capacity of the heater and its heat energy. The experiments which prove the adequacy of the suggested model of the heater are described in this paper.

Keywords: aluminum radiator; heating; heat-transfer coefficient; heat energy.

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:

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

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

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

где V – расход теплоносителя, м³/с; ρ , 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:

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

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

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

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 $\frac{dT_{\text{ист}}}{dt}$ 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 ч). 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.

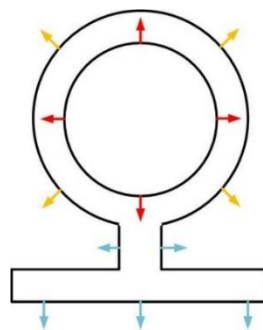


Рис. 1. Пути распространения тепловой энергии

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 :

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

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.

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, также 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.

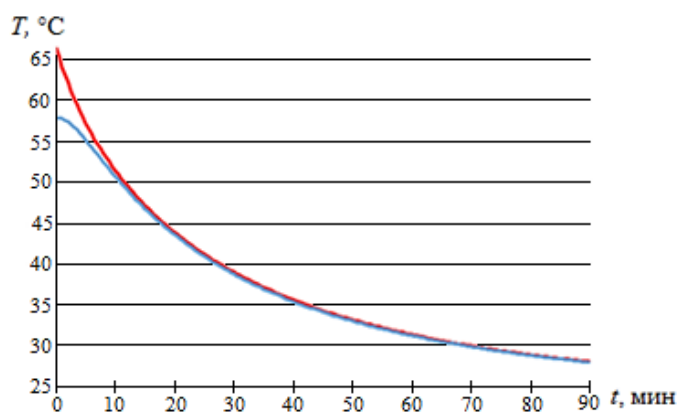


Рис. 2. Результаты моделирования охлаждения

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).

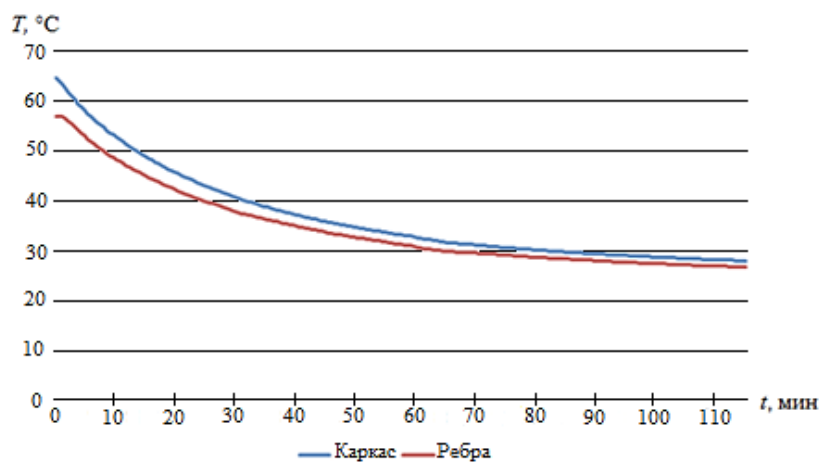


Рис. 3. Температурные зависимости каркаса и ребра

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 %.

Исследование 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. Первый способ 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. Второй способ основан на измерении электрической энергии, затраченной на генерацию тепловой энергии за вычетом тепловых потерь на соединительных трубах. Показания электросчетчика контролируются программой. 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. 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 установлено по два датчика, значения температур с которых усреднялись. Измерение температуры воздуха производилось отдельным термодатчиком в соответствии с рекомендациями АВОК.

Статическая характеристика снималась по семи значениям температурного напора от 10 до 35 °С через 5 °С двумя методами. Длительность измерения каждой точки – 5 ч. 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 (рис. 4, 5).

Динамическая характеристика снималась в режиме остывания от максимального значения температурного напора до 10 °С. 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.

Расхождения значений динамического коэффициента теплоотдачи относительно статического, измеренного электрическим способом, колеблются от –1,7 % при $\Delta T = 35$ °С, до –1,9 % при $\Delta T = 10$ °С. Расхождения значений динамического коэффициента теплоотдачи относительно статического, измеренного прямым способом, колеблются от –6,1 % при $\Delta T = 35$ °С, до 1,5 % при $\Delta T = 10$ °С.

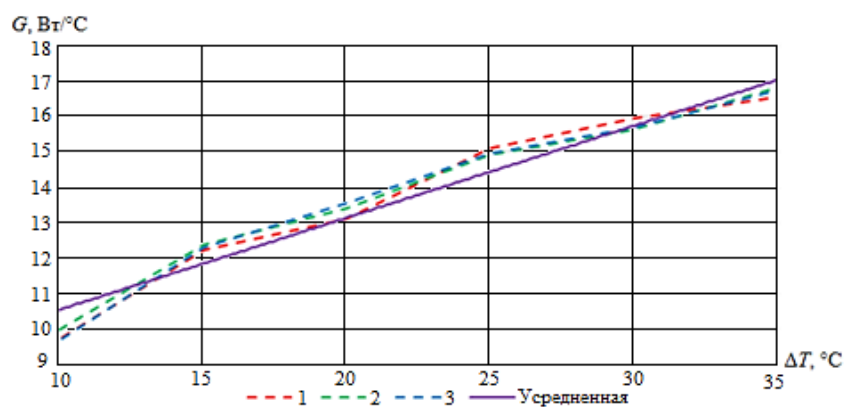


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи для электрического метода

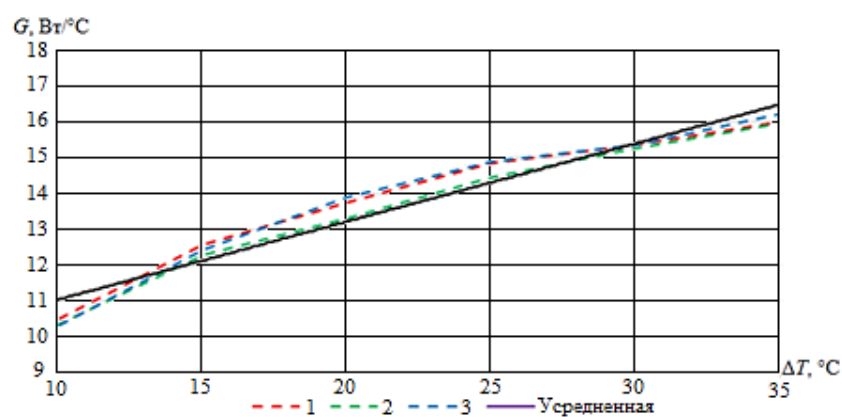


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи для прямого измерения

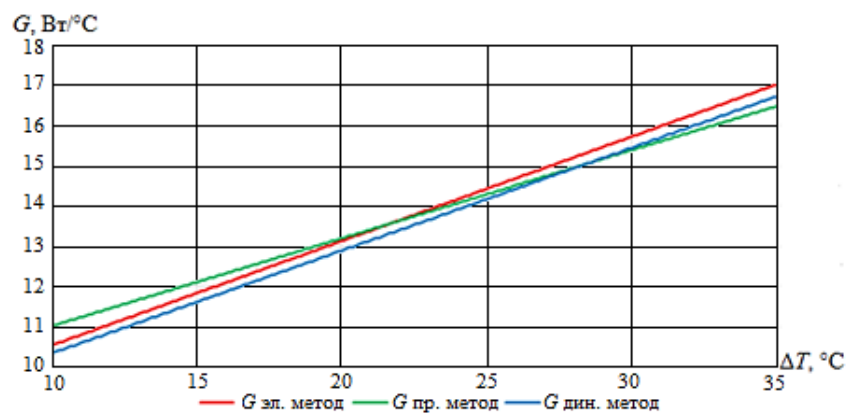


Рис. 6. Сравнение статических и динамических характеристик коэффициента теплоотдачи

Выводы

Проведенные эксперименты подтвердили адекватность применения математической модели для алюминиевого радиатора.

Конструкция измерителя тепловой энергии должна обеспечивать изменение температуры каркаса в геометрическом центре отопительного прибора.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. Метрологический анализ интеллектуального теплосчетчика : [пер. с англ.] / Л. Селенза, М. ДельИсолла, Р.Д. Алессин, Г. Фикко, П. Виго, А. Виола // 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. 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.

REFERENCES

1. Sasin V.I., Bershidskii G.A., Prokopenko T.N., Shvetsov B.V. Deistvuyushchaya metodika ispytaniya otopitel'nykh priborov – trebuetsya li korrektyrovka? [The current method of testing heating appliances]. AVOK. 2007. No. 4. Pp. 46–51. (rus)
2. Celenza L., Dell'Isola M., D'Alessio R., Ficco G., Vigo P., Viola A. Metrological analysis of smart heat meter. Proc. 16th Int. Flow Measurement Conference, FLOMEKO. Paris, 2013. Pp. 546–550.
3. Nizovtsev M.I., Terekhov V.I., Chepurnaya Z.P. Vliyaniye fizicheskikh parametrov na radiatornye koeffitsienty registratorov raskhoda tepla otopitel'nykh priborov [Influence of physical parameters on heat-transfer coefficient counters]. AVOK. 2005. No. 5. (rus)
4. Tsvetkov N.A., Zhukov A.V., Krivoshein Yu.O., Ivanchin M.G., Tokmakov A.Ye. Sovershenstvovaniye metodiki izmereniya teplovoy moshchnosti otopitel'nykh priborov v real'nykh usloviyakh ekspluatatsii [The improvement of heat power measuring techniques in actual operating conditions]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2015. No. 6. Pp. 141–148. (rus)
5. Pugovkin A.V., Kuprekov S.V., Medvedev V.A., Muslimova N.I., Stepnoi V.S. Dinamicheskii metod izmereniya effektivnosti nagrevatel'nykh priborov [Dynamic method of measuring the efficiency of heating appliances]. Pribory. 2014. No. 7. 10 p. (rus)
6. Abramchuk S.I., Pugovkin A.V. Energeticheskaya effektivnost' elektricheskogo obogrevatelya [Energy efficiency of electric heater]. Doklady TUSUR. 2014. No. 4 (34). Pp. 211–214. (rus)
7. Stepnoi V.S., Abramchuk S.I., Mukashev A.M., Pugovkin A.V. Ekvivalentnye elektricheskie skhemy otopitel'nykh priborov [Equivalent electric circuit heaters]. Doklady TUSUR. 2014. No. 1(31). Pp. 238–241. (rus)