

УДК 627.922

*МУКАШЕВ АЛИШЕР МУХТАРОВИЧ, магистрант,**ali_2474@mail.ru**ПУГОВКИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,**pugovkinav@tor.tusur.ru**КУПРЕКОВ ВЛАДИМИР СТЕПАНОВИЧ, научный сотрудник,**kevis@tpu.ru**Томский государственный университет**систем управления и радиоэлектроники,**634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ*

Важной характеристикой отопительных приборов является соотношение между конвективной и радиационной составляющими теплообмена. Предложен и реализован метод детального исследования теплообмена в этих приборах, позволяющий оценить долю каждой из составляющих в рабочем диапазоне температур. В основе метода лежит обработка экспериментальных данных динамического теплового режима отопительного прибора. Из полученных экспериментальных зависимостей коэффициента теплоотдачи от температурного напора в линейном приближении выделяются доли конвективной и радиационной составляющих. Для чугунного и алюминиевого радиаторов и конвекторов найдено, что изменение долей теплообмена в рабочем диапазоне температур носит линейный характер.

Ключевые слова: радиатор; конвектор; отопление; коэффициент теплоотдачи; тепловая энергия; конвективный и радиационный теплообмен.

*ALISHER M. MUKASHEV, Undergraduate Student,**ali_2475@mail.ru**ALEKSEI V. PUGOVKIN, DSc, Professor,**pugovkinav@tor.tusur.ru**VLADIMIR S. KUPREKOV, Research Scientist,**kevis@tpu.ru**Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,**40, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia*

HEAT EXCHANGE PROCESSES IN RADIANT SPACE HEATERS

The paper presents investigations of the ratio between convective and radiative heat transfer. The implementation of the suggested research method allows the estimation of the individual contribution of convection and radiation in the operating temperature range. The research method is underlain by the processing experimental data on the dynamic thermal conditions of a heat appliance. The obtained experimental dependencies between the heat-transfer factor and the temperature drop, demonstrate the convection and radiation proportions in the heat trans-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по контракту № 02.G25.31.0107 от 14 августа 2014 г.

fer. The experiment shows that in cast-iron and aluminum space heaters the change of this proportion within the operating temperature range, is linear.

Keywords: heating appliance; convector; heating; heat-transfer factor; thermal energy; convective and radiative heat transfer.

Основное назначение систем отопления – компенсация тепловых потерь здания с помощью отопительных приборов. Все отопительные приборы используют два физических процесса: конвекцию и радиацию. Конвекция – это образование восходящего потока воздуха вблизи нагретой поверхности. В этом случае большая часть тепла передается воздуху помещения. Радиация – это поток инфракрасных лучей от нагретой поверхности отопительного прибора, который повышает температуру других поверхностей в помещении (вертикальные ограждения, мебель, перекрытия).

Традиционное деление отопительных приборов на радиаторы и конвекторы весьма условно, поскольку ни один из приборов не отдает теплоты в чистом виде радиацией (излучением) или конвекцией (нагретым воздухом). Доля каждой из составляющих в общем тепловом потоке отличается у приборов различной конструкции и описывается критериальными зависимостями Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr) и законом Стефана Больцмана [1].

Одной из важных характеристик отопительных приборов является соотношение между конвективной и радиационной составляющими теплообмена. В конвекторах радиационная составляющая будет крайне мала, так же, как и в радиаторах доля конвективной составляющей.

Целью работы является нахождение соотношения между конвективной и радиационной составляющими для отопительных приборов в диапазоне рабочих температур с учетом их индивидуальных особенностей, таких как конструкция и условия эксплуатации.

Вопросом разделения конвективного и радиационного теплообмена посвящено достаточное количество научных публикаций, и в том числе [2–6].

В общем виде количество тепла, отдаваемое отопительным прибором, определяется классической зависимостью Ньютона – Рихмана [2]:

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

где P – тепловая мощность; $G_{\text{ист}}$ – интегральный коэффициент теплоотдачи (тепловая проводимость). Введенный нами коэффициент $G_{\text{ист}}$ позволяет обходиться без учета площади поверхности отопительного прибора S ; $T_{\text{ист}}$ – средняя температура источника; $T_{\text{возд}}$ – средняя температура воздуха в помещении.

Представим коэффициент теплоотдачи в виде суммы двух составляющих:

$$G_{\text{ист}} = G_{\text{к}} + G_{\text{р}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{к}}$ и $G_{\text{р}}$ – конвективная и радиационная составляющие коэффициента теплоотдачи соответственно.

Согласно работе [2],

$$G_{\text{к}} = A^3 \sqrt{T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}}, \quad (3)$$

где A – коэффициент, связанный с конвективным теплообменом в условиях свободной конвекции. Работа носит расчетный характер, и из нее следует, что конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи стремится к нулю при

$$(T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}) = 0, \quad (4)$$

в то время как радиационная составляющая не равна нулю.

Ограничениями работы является то, что она носит теоретический характер и применяется для расчета простых нагретых объектов (металлических баков, ванн с нагретой водой и т. п.) без учета индивидуальных особенностей нагретых тел.

В работах [3–6] приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований, связанных с конвективным и радиационным теплообменом.

В работе [3] приводятся некоторые практические оценки конвективного и радиационного теплообмена. Соотношение этих составляющих у современных отопительных приборов весьма различно. Так, у конвекторов с кожухом доля радиационного теплообмена составляет 5–10 % от общего теплового потока, а у неоребранных однорядных по глубине панельных радиаторов она достигает 40–45 %. Вместе с тем в работе отсутствуют оценки теплообмена в диапазоне рабочих температур СНиП 2.08.01–89 и не учитываются индивидуальные особенности отопительных приборов.

В работе [5] рассмотрена методика проведения промышленного эксперимента в трубчатой нагревательной печи, в которой устанавливается соотношение радиационного и конвективного теплообменов. Методика основана на использовании зависимости (1) в процессе эксперимента. Измерялись температуры сляба и окружающей среды. Количество теплоты, запасаемое слябом при нагревании, находится через его массу, теплоемкость и перепад температур. При этом получено, что при температуре 800 °С для латунного сляба доля конвективной составляющей составляет 35 % и соответственно радиационной 65 %, а для медного сляба доля конвективной составляющей составляет 60 % и доля радиационной 40 % соответственно. Измерения в диапазоне температур не проводились в силу сложности эксперимента.

В работе [6] исследовался процесс теплообмена на поверхности масляных электрических обогревательных приборов (ЭОП). Методика эксперимента также основана на применении формулы (1). Эксперимент проводился для трех значений средней температуры поверхности ЭОП. Получено, что коэффициент теплоотдачи увеличивается с ростом температуры ЭОП с 7,5 Вт/(м²·К) при 30 °С до 12 Вт/(м²·К) при 110 °С. Автор объясняет этот рост одновременным влиянием конвективной и радиационной составляющих теплообмена. Вклад радиационной составляющей теплообмена в значение коэффициента теплоотдачи, по утверждению автора, «составляет около 70 %». А сама радиационная составляющая коэффициента теплоотдачи возрастает с 5,6 до 8,0 Вт/(м²·К). Здесь исследована температурная зависимость, но количество точек явно недостаточно, а доля радиационной составляющей указана приблизительно (около 70 %).

Оценка соотношения долей радиационной и конвективной составляющих для конвектора и радиатора приведена в работе [7]. Из экспериментально найденной суммарной тепловой мощности вычитается радиационная составляющая, которая вычисляется по классической формуле Стефана – Больцмана. Полученные результаты носят оценочный характер и приведены только для одной температурной точки. Точность полученных численных значений не приведена.

Нами предложен метод детального исследования теплообмена и определения долей конвективной и радиационной составляющих в отопительных приборах в рабочем диапазоне температур $T_{\text{ист}} = (10-70)^\circ\text{C}$. В основе метода лежит обработка экспериментальных результатов динамического теплового режима отопительного прибора. Суть метода заключается в следующем: отопительный прибор переводится из стационарного режима в режим остывания, и измеряются средние температуры поверхности отопительного прибора и воздуха в помещении как функции времени. Измерения проводятся на экспериментальной установке, в которой 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 температур осуществляется термодатчиками на основе термопар. Число термодатчиков меняется от 5 до 8, и их расположение зависит от типа отопительного прибора. Средняя температура отопительного прибора находится как среднее арифметическое температур всех датчиков. Адекватность найденных средних температур проверяется с помощью тепловизора. Расхождение не превышает двух процентов. Данная установка позволяет измерить коэффициент теплоотдачи как методом по формуле (1) (когда известна тепловая мощность и температурный напор), так и предложенным методом, формула (5), и сравнить их. По температурной зависимости остывания находится интегральный коэффициент теплоотдачи отопительного прибора¹:

$$G_{\text{ист}} = C \cdot dT_{\text{ист}}/dt / (T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}). \quad (5)$$

Обработка экспериментальных результатов заключается в следующем: полученная зависимость коэффициента теплоотдачи приравнивается к теоретической:

$$G_{\text{экспер}} = G_{\text{теор}}. \quad (6)$$

Радиационная составляющая описывается формулой Стефана – Больцмана, которую можно представить в виде степенного ряда:

$$G_{\text{р}} = \frac{P_{\text{рад}}}{(T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}})} = \varepsilon \cdot \sigma (T_{\text{ист}}^2 + T_{\text{возд}}^2) (T_{\text{ист}} + T_{\text{возд}}), \quad (7)$$

где ε – радиационный коэффициент; σ – постоянная Стефана – Больцмана, которая численно равна $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$.

При разложении в ряд мы имеем формулу

$$G_{\text{р}} = \varepsilon \cdot \sigma \left(4(273 + T_{\text{возд}})^3 + 6(273 + T_{\text{возд}})^2 \Delta T + 4(273 + T_{\text{возд}}) \Delta T^2 + \Delta T^3 \right). \quad (8)$$

Коэффициенты этого ряда зависят только от $T_{\text{возд}}$, которую можно измерить. Но в то же время ε пока неизвестен.

Конвективная составляющая также описывается нелинейной функцией разности температур, которую также представим в виде степенного ряда.

В соответствии с формулой (6) можно поочередно приравнивать соответствующие коэффициенты степенного ряда. Поскольку $G_{0\text{к.теор}}$ равно нулю, что следует из (3), то $G_{0\text{р.теор}} = G_{\text{экспер}}$ при ΔT , стремящейся к нулю. Из этого равен-

¹ СНиП 2.08.01.89. Жилые здания. М., 1998.

ства находим ε . Нетрудно увидеть, что коэффициент ε характеризует степень черноты. Зная ε и выражение для $G_{1p, теор}$, мы можем найти температурную зависимость радиационной составляющей первого порядка. Следующим шагом находим температурную зависимость конвективной составляющей первого порядка, вычитая из экспериментальной зависимости теоретическую радиационную составляющую. В диапазоне температур, характерном для отопительных приборов, составляющими второго и третьего порядка можно пренебречь.

Ключевым моментом является то, что конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи равна нулю при $\Delta T = 0$.

Данная методика использована нами для обработки результатов экспериментов, проведенных для различных отопительных приборов: чугунного секционного радиатора МС-140М (7 секций), алюминиевого радиатора Radena R500 (8 секций) и конвектора типа Комфорт-20М.

При выключении подачи теплоносителя температурные зависимости носили спадающий характер, близкий к экспоненциальному. По этим зависимостям с помощью (5) найдены зависимости коэффициента теплоотдачи от разности температур (рис. 1).

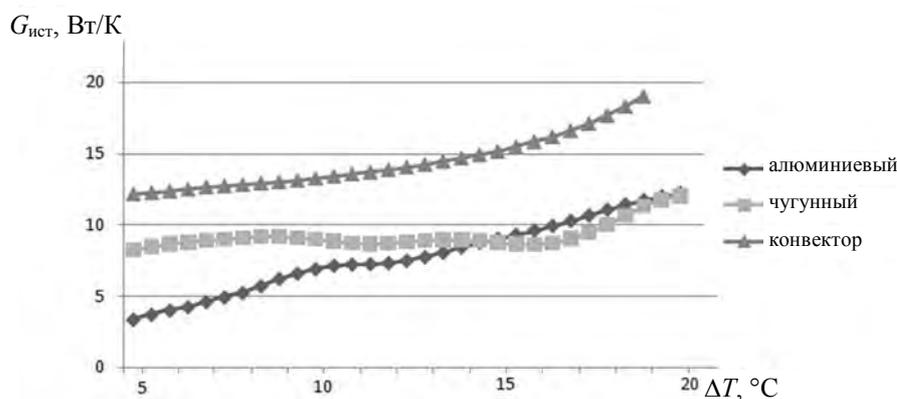


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от разности температур

Из рис. 1 видно, что для отопительных приборов коэффициент теплоотдачи не является константой и имеет характер изменения, близкий к линейному. Однако, как мы видим, графики имеют разный наклон. Полученные характеристики обработаны по вышеизложенной методике.

Для сравнения разных отопительных приборов пронормируем коэффициент G , поделив его на теплоемкость прибора C . Вычисленные конвективные и радиационные составляющие приведены в таблице.

Тип прибора	C	G_0	G_{1p}	$G_{1к}$	$G_{0норм}$, 10^{-4}
Чугунный радиатор	63 267	8	$0,032 \cdot \Delta T$	$0,16 \cdot \Delta T$	1,3
Алюминиевый радиатор	17 700	3	$0,05 \cdot \Delta T$	$0,41 \cdot \Delta T$	1,7
Конвектор	10 632	12	$0,05 \cdot \Delta T$	$0,49 \cdot \Delta T$	11

Исходя из полученных данных, можно найти долю конвективной и радиационной составляющих теплообмена в исследуемом диапазоне температур (рис. 2).

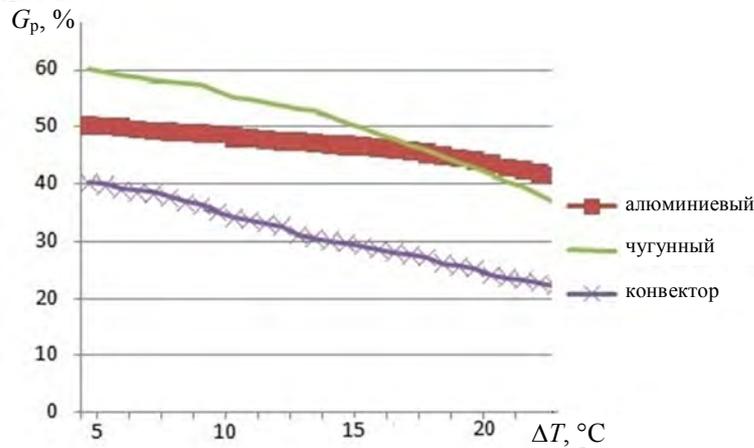


Рис. 2. Зависимость доли радиационной составляющей от разности температур

Погрешность проведенных вычислений, главным образом, зависит от погрешности нахождения G_0 . Эту погрешность можно оценить как сумму погрешностей экспериментального нахождения величин $G_{\text{экспер}}$ и ΔT . Следуя работе [6], где $\Delta G_{\text{экспер}}$ равняется 3–4 % и $\Delta(\Delta T)$ 2 %, получим погрешность G_0 , равную 5 %. На основании полученных результатов исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) соотношение конвективной и радиационной составляющих теплообмена меняется с изменением температуры;
- 2) рост конвективной и уменьшение радиационной составляющих, в указанном диапазоне температур, носят линейный характер;
- 3) соотношение между радиационной и конвективной составляющими зависит от конструкции отопительного прибора. Доля радиационной составляющей наибольшая для чугунного отопительного прибора и наименьшая для конвектора;
- 4) для сопоставления характеристик разнотипных приборов целесообразно применять нормирование их коэффициентов теплоотдачи по теплоемкости;
- 5) обработка экспериментальных результатов по данной методике позволяет определить степень черноты поверхности отопительного прибора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский, В.Н. Отопление и вентиляция. Ч. 2 / В.Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1991. – 439 с.
2. 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.

3. *Вохмяков, А.М.* Исследование технологии нагрева медных и латунных слябов в проходных печах, оборудованных скоростными горелками / А.М. Вохмяков // *Металлургия черных, цветных и редких металлов*. – Екатеринбург, 2012. – 24 с.
4. *Черепанов, В.Я.* Методы и средства метрологического обеспечения измерений параметров теплообмена и теплоносителей : дис. ... докт. техн. наук. – Новосибирск, 2005. – 276 с.
5. *Пухкал, В.* Экспериментальная оценка параметров теплового потока отопительных приборов : [пер. с англ.] / В. Пухкал. – СПб., 2014. – № 1. – С. 19–22.
6. *Динамический метод измерения эффективности нагревательных приборов* / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, В.А. Медведев [и др.] // *Приборы*. – 2014. – № 7. – 10 с.
7. *Исаченко, В.П.* Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергия, 1981. – 488 с.

REFERENCES

1. *Bogoslovskii V.N.* Otoplenie i ventilyatsiya [Heating and ventilation]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1976. No. 2. 439 p. (rus)
2. *Sasin V.I., Bershidskii G.A., Prokopenko T.N., Shvetsov B.V.* Deistvuyushchaya metodika ispytaniya otopitel'nykh priborov – trebuetsya li korrektyrovka? [Current procedure for testing heating appliances – is a need for correction?]. *Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal*. 2007. No. 4. Pp. 46–51. (rus)
3. *Vokhmyakov A.M.* Issledovanie tekhnologii nagreva mednykh i latunnykh slyabov v prokhnodnykh pechakh, oborudovannykh skorostnymi gorelkami [Heating of copper and brass slabs in conveyor-type furnaces equipped with high-speed burners]. *Metallurgiya chernykh, tsvetnykh i redkikh metallov* [Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals]. Ekaterinburg, 2012. 24 p. (rus)
4. *Cherepanov V.Ya.* Metody i sredstva metrologicheskogo obespecheniya izmerenii parametrov teploobmena i teponositelei: diss... d-ra tekhn. nauk [Methods and means of metrological parameter measurements of heat transfer and heat carriers. DSc thesis]. Novosibirsk, 2005. 276 p. (rus)
5. *Pukhkal V.* Eksperimental'naya otsenka parametrov teplovogo potoka otopitel'nykh priborov [Experimental estimate of the heat flow parameters of heating appliances]. *Journal of Applied Engineering Science*. 2014. No. 1. Pp. 19–22. (rus)
6. *Pugovkin A.V., Kuprekov S.V., Medvedev V.A., Muslimova N.I., Stepoi V.S.* Dinamicheskii metod izmereniya effektivnosti nagrevatel'nykh priborov [Dynamic method of measuring efficiency of heating appliances]. *Instruments*. 2014, No. 7. 10 Pp. (rus)
7. *Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.* Teploperedacha [Heat transfer]. Moscow : Energiya Publ., 1981. 488 p. (rus)