

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОЛЕВОГО ГОСПИТАЛЯ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Магистр техн. наук КАЧАР И. Л.

Белорусский национальный технический университет

Представленный материал является результатом экспериментальных исследований системы теплоснабжения мобильного полевого медицинского учреждения, где в качестве источника используется теплогенератор ВТГ-2,2 с приводом от источника энергии, не зависящего от внешних условий.

Эксперимент проводился с использованием мягкого отопительного прибора (рис. 1 [1]) в соответствии с планом эксперимента, разработанным согласно с [2, 3] при установившемся тепловом режиме. Такой эксперимент представляет значительный интерес при условии естественной конвекции в горизонтальной щели (рис. 1 [4]). В подобных условиях отопительный прибор (рис. 1) располагается на горизонтальной поверхности (рис. 1б).

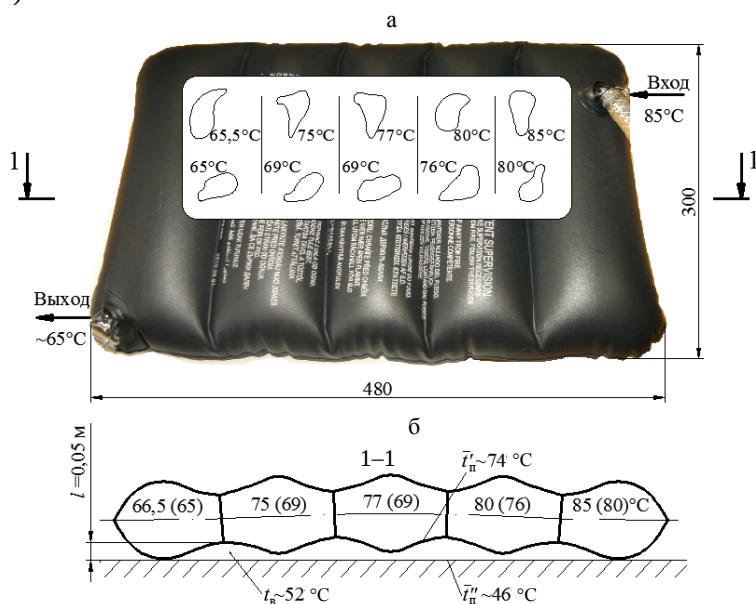


Рис. 1. Общий вид отопительного прибора (а) и расчетная схема (б): l – характерный размер; t'_n , t''_n – соответственно температуры теплоотдающей и тепловоспринимающей поверхностей

Как видно из рис. 1а, опыты (в соответствии с планом эксперимента [2]) выполнялись в десяти точках и были связаны с измерением температур теплоотдающей и тепловоспринимающей поверхностей, а также температуры в щели. В качестве инструментария использовались бесконтактный пирометр AR852В и хромель-копелевые термопары.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Для оценки теплоотдачи от поверхности отопительного прибора рассчитаем коэффициент теплоотдачи.

Определим среднюю температуру по поверхности отопительного прибора

$$\overline{t'_n} = \frac{F_1 t_{11} + \dots + F_{10} t_{10}}{\sum_{i=1}^{10} F_i},$$

где $F_1, \dots, F_{10}$ – площади ячеек сетки, где производились измерения.

Имеем $\overline{t'_n} = 74^\circ\text{C}$.

Определяющим размером будем считать размер щели: $l = 0,05$ м.

Определим физические свойства воздуха вблизи поверхности отопительного прибора: $\rho = 1,085$ кг/м³ – плотность воздуха; $c_p = 1,007$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха; $\lambda = 0,028$ Вт/(м·К) – теплопроводность воздуха; $\nu = 1,783 \cdot 10^{-5}$ м²/с – коэффициент кинематической вязкости; $\text{Re} = \frac{wl}{\nu}$ – критерий Рейнольдса, где

w – скорость воздуха, $w = 0,1$ м/с.

Имеем $\text{Re} = \frac{0,1 \cdot 0,05}{1,783 \cdot 10^{-5}} = 280,432 < 5 \cdot 10^5$ – режим течения в пограничном слое ламинарный.

А также критерий Прандтля

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a},$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с,

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} = \frac{0,028}{1,007 \cdot 10^3 \cdot 1,085} = 2,578 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тогда:

$$\text{Pr} = \frac{1,783 \cdot 10^{-5}}{2,578 \cdot 10^{-5}} = 0,692; \quad \text{Gr} = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t, \quad (1)$$

где β – коэффициент объемного расширения газа, 1/К; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; $\Delta t = \overline{t'_n} - t_b = 74 - 52 = 22^\circ\text{C}$ – разность температур поверхности отопительного прибора и воздуха.

$$\begin{aligned} \text{При условии, что } \beta &= \frac{1}{\Delta t_m + 273}, \text{ будем иметь } \Delta t_m = \frac{\overline{t'_n} + t_b}{2} = \frac{74 + 52}{2} = \\ &= 63^\circ\text{C}; \quad \beta = \frac{1}{63 + 273} = 2,976 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}; \quad \text{Gr} = 2,976 \cdot 10^{-3} \frac{9,81 \cdot 0,05^3}{(1,783 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 22 = \\ &= 2,526 \cdot 10^5. \end{aligned}$$

Воспользуемся критериальным уравнением для инженерных расчетов по определению коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции в области давлений $760\text{--}5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. [4]

$$\text{Nu}_m = 1,53(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_m^{0,16} = 1,53 \cdot (2,526 \cdot 10^5 \cdot 0,692)^{0,16} = 10,555. \quad (2)$$

Находим коэффициент теплоотдачи α для свободной поверхности (рис. 1а)

Таблица 1
Результаты измерений температуры теплоотдающей поверхности отопительного прибора

Точка измерения	Температура поверхности отопительного прибора в щели со стороны воздуха, °C
1	66,5
2	75
3	77
4	80
5	85
6	80
7	76
8	69
9	69
10	65

$$\alpha = \frac{Nu_m \lambda}{l} = \frac{10,555 \cdot 0,028}{0,05} = 5,942 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Схема теплообмена в щели представлена на рис. 1б.

В нашем случае в качестве определяющего размера принимаем размер щели $l = 0,05$ м, а в качестве определяющей температуры – температуру поверхности, на которой располагается отопительный прибор ($\bar{t}_n'' = 46$ °С).

Результаты обработки опытных данных сведены в табл. 2. Они устанавливают зависимость между критериями подобия Nu , Gr , Pr (рис. 2).

Таблица 2
Обработка результатов экспериментов
(горизонтальная щель)

Измерения в точках (рис. 1а)	Температура поверхности, °С	Значение $\lg Nu$	Значение $\lg(Gr \cdot Pr)$
1	66,5	0,692	5,248
2	75	0,729	5,394
3	77	0,736	5,421
4	80	0,745	5,459
5	85	0,759	5,516
6	80	0,745	5,459
7	76	0,732	5,408
8	69	0,704	5,297
9	69	0,704	5,297
10	65	0,684	5,216

Для нахождения функции $\lg Nu$ воспользуемся формулой для ориентированной вниз горячей поверхности в холодной среде [4]

$$Nu = 0,24(Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (3)$$

где $4 \cdot 10^3 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 3 \cdot 10^6$.

Точки, являющиеся результатом обработки данных опыта, практически укладываются на одну прямую линию. Запишем математическое уравнение для линии, соответствующей значениям произведения $\lg(Gr \cdot Pr) = 5,216\text{--}5,516$.

Тогда

$$\lg Nu = a_0 + a_1 \lg(Gr \cdot Pr). \quad (4)$$

Определение коэффициентов при неизвестных выполним по методу наименьших квадратов [2]

$$\sum (\lg Nu_x - \lg Nu)^2 = \sum (\lg Nu_x - a_0 - a_1 \lg(Gr \cdot Pr))^2,$$

где $\lg Nu_x$ – обработанные экспериментальные данные (табл. 2).

Очевидно, что данная сумма зависит от коэффициентов a_0 и a_1 . Для того чтобы эта сумма была минимальной, необходимо соблюдение условий $a_0 = 0$ и $a_1 = 0$:

$$\frac{\partial}{\partial a_0} \sum (\lg Nu_x - \lg Nu)^2 = -2 \sum (\lg Nu_x - a_0 - a_1 \lg(Gr \cdot Pr)) = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} \sum (\lg Nu_x - \lg Nu)^2 = -2 \sum (\lg Nu_x - a_0 - a_1 \lg(Gr \cdot Pr)) \lg(Gr \cdot Pr) = 0.$$

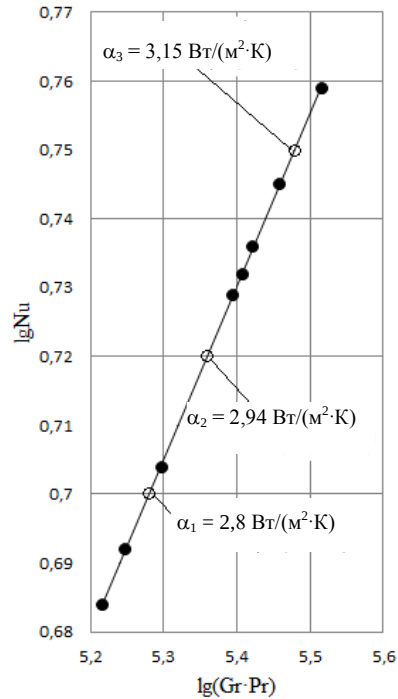


Рис. 2. График зависимости $\lg Nu = f(\lg(Gr \cdot Pr))$ по данным обработки эксперимента (горизонтальная щель)

Отсюда имеем:

$$\begin{aligned} a_0 N + a_1 \sum \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) &= \sum \lg \text{Nu}_x; \\ a_0 \sum \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) + a_1 \sum \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^2 &= \sum (\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) \cdot \lg \text{Nu}_x), \end{aligned} \quad (6)$$

где $N = 10$ – общее число данных.

Значения $\lg \text{Nu}_x$ и $\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$ отсчитываются от их средних значений $\overline{\lg \text{Nu}_x}$ и $\overline{\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})}$.

Тогда:

$$\begin{cases} a_0 N + a_1 \sum [\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) - \overline{\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})}] = \sum (\lg \text{Nu}_x - \overline{\lg \text{Nu}_x}); \\ a_0 \sum [\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) - \overline{\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})}] + a_1 \sum [\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) - \overline{\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})}]^2 = \\ = \sum [\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) - \overline{\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})}] (\lg \text{Nu}_x - \overline{\lg \text{Nu}_x}). \end{cases} \quad (7)$$

Решая данную систему уравнений в MathCAD 15, находим коэффициенты при неизвестных:

$$\begin{aligned} a_0 &= -0,628; \\ a_1 &= 0,251. \end{aligned} \quad (8)$$

Найденные значения подставляем в (5)

$$\lg \text{Nu} = -0,628 + 0,251 \cdot \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}).$$

В окончательном виде расчетное критериальное уравнение запишется

$$\text{Nu} = 0,236(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,251}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет производить расчеты интенсивности теплообмена в условиях естественной конвекции в ограниченном пространстве (горизонтальная щель).

ВЫВОДЫ

1. Исследована теплоотдача отопительного прибора системы теплоснабжения мобильного полевого медицинского учреждения, функционирующего в условиях чрезвычайных ситуаций.
2. Определен коэффициент теплоотдачи от свободной поверхности отопительного прибора.
3. Получено критериальное уравнение для расчета интенсивности теплообмена в условиях естественной конвекции в ограниченном пространстве (горизонтальная щель).

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплоснабжение полевого госпиталя, функционирующего в условиях чрезвычайных ситуаций / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 3. – С. 91–93.
2. Длин, А. М. Математическая статистика в технике / А. М. Длин. – М.: Советская наука, 1958. – 465 с.
3. Несенчук, А. П. Исследование конвективного теплообмена в вакууме в условиях естественной конвекции: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Минск: БПИ, 1962.
4. Акельев, В. Д. Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений / В. Д. Акельев; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2010. – 317 с.

Представлена кафедрой ПТЭ и Т

Поступила 13.05.2011