

УДК 536.24

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ВЫХОДА НА РАБОЧИЙ РЕЖИМ ТЕПЛООБМЕНА ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ ПОЛЕВОГО ГОСПИТАЛЯ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ

Докт. техн. наук, проф. НЕСЕНЧУК А. П.¹⁾, канд. техн. наук КОНЕВА Н. С.²⁾,
магистр техн. наук ИОКОВА И. Л.¹⁾, канд. техн. наук РЫЖОВА Т. В.³⁾,
инж. ШКЛОВЧИК Д. И.¹⁾, ЯРМОЛЬЧИК М. А.¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси»,

³⁾ОАО «Минский автомобильный завод» – управляющая компания холдинга «Белавтомаз»

Время прогрева отопительных приборов системы теплоснабжения практически целиком определяет скорость развертывания до рабочего состояния полевого медицинского учреждения (полевого госпиталя), функционирующего в условиях экстремальных ситуаций (техногенные катастрофы, военные конфликты и др.), иными словами, скорость развертывания определяет успех.

Оценка скорости развертывания объекта, естественно, должна выполняться по разным факторам (в том числе и по фактору запуска в рабочее состояние системы теплоснабжения). При этом время развертывания τ не должно превышать 7–15 мин, а следовательно, запуск системы отопления по времени прогрева должен укладываться в 5–7 мин.

Отопительный прибор системы теплоснабжения представлен мягким полимерным материалом [1, 2]. Стенка отопительного прибора подвергается одностороннему прогреву (4–5%-й водный раствор хлорида натрия – слабый физиологический раствор) со стоком теплоты w в окружающую среду (атмосферный воздух). Также рассматриваемая стенка классифицируется как тело классической формы (пластина), у которой [3] $R/l < 0,1$ (рис. 1).

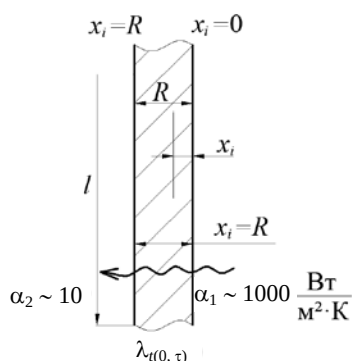


Рис. 1. Физико-математическая модель нагрева стенки отопительного прибора

Физико-математическая модель прогрева стенки отопительного прибора при граничных условиях 3-го рода может быть представлена:

$$\frac{\partial t_{\text{ст}}(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t_{\text{ст}}(x, \tau)}{\partial x^2} - w; \quad (1)$$

$$-\lambda_{t(0, \tau)} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}(x = R, \tau = 5)), \quad (2)$$

$$t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}}(\tau = 0) = \text{const}, \quad (3)$$

где w – сток теплоты в окружающую среду; $\tau = 5$ – время нагревания стенки в течение 5 мин; α_1, α_2 – соответственно коэффициенты теплоотдачи от капельной жидкости к стенке отопительного прибора и стенки к окружающему воздуху (в эксперименте $\alpha_1 = 620$ и $\alpha_2 = 5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$).

Принимая во внимание, что $\alpha_2/\alpha_1 \ll 1$, в (1) сток теплоты в окружающую среду (с небольшой погрешностью) можно пренебречь и (1) переписать

$$\frac{\partial t_{\text{ст}}(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t_{\text{ст}}(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Используя метод теории подобия, (2)–(4) можно преобразовать к выражению [3]:

$$\theta = F\left(\text{Bi}; \text{Fo}_{\tau=5}; \frac{x_i}{R}\right), \quad (5)$$

$$x_i = R;$$

$$\theta = \frac{t_{\text{ж}}(\tau = 0; x = 0) - t_{\text{ст}}(\tau = 5; x = R)}{t_{\text{ж}}(\tau = 0; x = 0) - t_{\text{ст}}(\tau = 0; x = R)}.$$

Как видим, в (5) входят теплофизические характеристики полимерного материала, из которого изготовлен предлагаемый отопительный прибор [2]. Оценка величин λ , c_p и ρ сделана авторами экспериментальным путем, изучая образцы № 1 и 2, представленные гибкой полимерной пленкой (рис. 2). Образец № 2 с одной стороны имеет структурированную ворсистую пленку (цилиндрическое оребрение), в остальном образцы одинаковы и изготовлены из одного и того же полимерного материала.

Методика проведения данного эксперимента и обработки результатов представлена в [4, 5].

Для создания температурного перепада по толщине пластины (рис. 2) одна ее поверхность нагревается, а другая – охлаждается (рис. 3). Начальное распределение температур равномерное и соответствует температуре окружающей среды $T_0 = \text{const}$. В некоторый момент времени начинает действовать источник теплоты постоянной мощности q . Температура поверхностей пластины на всем протяжении процесса теплообмена поддерживается постоянной.

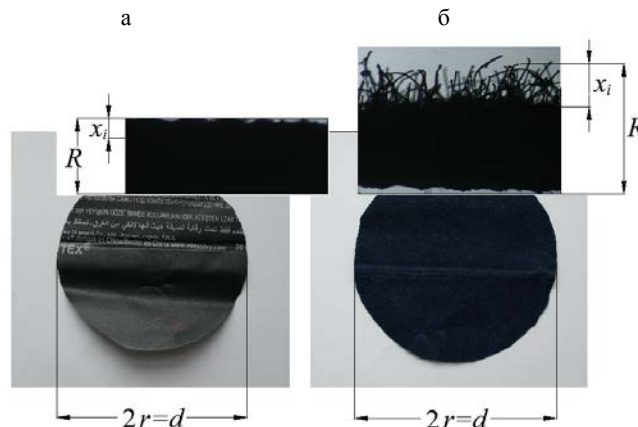


Рис. 2. Общий вид исследуемых образцов:
а – образец № 1; б – образец № 2; в верхней части – разрезы образцов при увеличении



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки:
1 – калориметр; 2 – комбинированный прибор ПЦ4313;
3 – милливольтметр МВУ6-41А;
4 – контрольный мерный сосуд

Общее решение такой задачи имеет вид [5]

$$\theta = T(x, \tau) - T_0 = \frac{q(R-x)}{\lambda} - \frac{qR}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \sin \mu_n \frac{R-x}{R} \exp(\mu_n^2 Fo),$$

где $\mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$.

Если известен тепловой поток, проходящий через пластину в стационарном режиме, то можно найти значения коэффициентов теплопроводности без применения дополнительного образца с известным коэффициентом теплопроводности λ .

Характеристики исследуемых образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений характеристик образцов

Номер пробы	Образец № 1			Образец № 2		
	2r, см	R, мм	G, г	2r, см	R, мм	G, г
1	13,5	0,3	6,0	13,5	0,5	7,2
2	13,5	0,3	6,0	13,5	0,5	7,2
3	13,5	0,3	6,0	13,5	0,5	7,2

В результате реализации методики [4] получена зависимость $\lambda = f(t)$ (рис. 4).

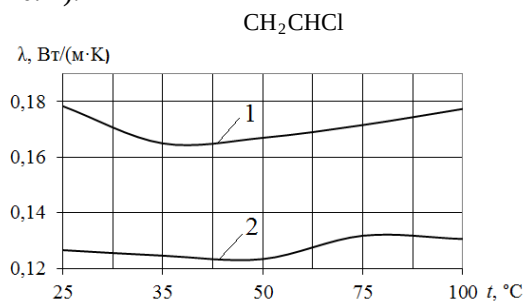


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры:
1 – образец № 1 (рис. 2а);
2 – образец № 2 (рис. 2б)

Как видим (рис. 4), коэффициенты теплопроводности образцов № 1 и 2 в интервале температур 25–100 °С соответственно 0,15–0,17 и 0,12–0,14 Вт/(м·К), что соответствует полимерному материалу по ГОСТ 14039–78 (поливинилхлорид) [6].

Полученные результаты сопоставляли с данными опытов, выполненных в ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси» на стандартном приборе ИТ-λ-400 (рис. 5) в соответствии с методикой [7]. Основные характеристики прибора (рис. 5) приведены в табл. 2. Измерения проводили при условиях: температура окружающей среды от 10 до 35 °С, относительная влажность 86–106 %, атмосферное давление 650–800 кПа.



Рис. 5. Общий вид измерителя теплопроводности ИТ-λ-400

Таблица 2

Основные технические характеристики прибора ИТ-λ-400

Диапазон измерения теплопроводности λ , Вт/(м·К)	От 0,1 до 5,0
Температурный диапазон измерения теплопроводности, °С	От –100 до +400
Максимальный диаметр испытуемого образца, мм	$15 \pm 0,3$
Высота, мм	До 5
Предел допускаемой основной погрешности измерения теплопроводности, %	+10 %

Для выполнения анализа были выбраны полимерные материалы типа поливинилхлоридных пленок SoftVynil (10–140 °С). Основными требованиями к материалу следует считать: совместимость с телом человека и теплоносителем, высокая прочность, экологичность, постоянные физические свойства, смачиваемость теплоносителем и т. д. Наиболее подходящими материалами можно считать мягкий поливинилхлорид (ПВХ), из которого изготавливаются пленки, волокна и другие материалы для медицинской техники, легкой промышленности и строительства (<http://www.plastinfo.ru/information/articles/38/>). Принятый в качестве объекта ис-

следования материал предположительно относится к ПВХ. Для проведения экспериментов взяты два типа образцов: № 1 и 2 (рис. 6). Образец № 1 представляет собой гибкую пленку, имеющую две гладкие стороны. Тип образцов № 2 с одной стороны имеет структурированную ворсистую поверхность. Предварительно для каждого из материалов была установлена предельная температура нагрева ($t_{\text{пр}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), так как расплавление испытуемого образца может привести к выходу измерителя из строя.

Для проведения экспериментов были изготовлены и отобраны по семь проб каждого материала. Масса и геометрические размеры исследуемых проб приведены в табл. 3. Для исследуемого материала предварительно определены удельная теплоемкость и масса каждого образца.

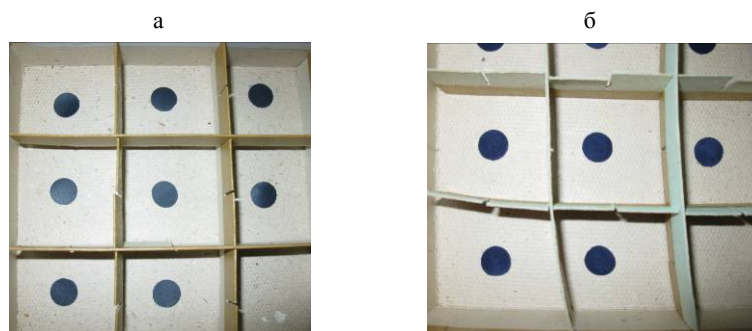


Рис. 6. Образцы исследуемого материала: а – образец № 1; б – образец № 2

На контактные поверхности образцов (для уменьшения термического сопротивления и улучшения теплового контакта) наносили теплостойкую смазку марки ПФМС-4 ТУ 6-02-917–74 (тип материала № 1). Для исследования материала № 2, имеющего пористый поверхностный слой, использовали высокотеплопроводный порошок, соответствующий ГОСТ 5494–71.

Таблица 3

Результаты измерений массы и размеров образцов

Номер пробы	Образец № 1			Образец № 2		
	d , мм	h , мм	G , мг	d , мм	h , мм	G , мг
1	14,25	0,35	74	14,50	0,45	83
2	14,55	0,35	74	14,35	0,45	83
3	14,50	0,35	74	14,25	0,45	83
4	14,30	0,35	74	14,25	0,45	83
5	14,45	0,35	74	14,25	0,45	83
6	14,30	0,35	74	14,30	0,45	83
7	14,30	0,35	74	14,20	0,45	83

В основу экспериментального исследования теплопроводности образцов положен сравнительный метод динамической калориметрии. Структура решения зависит от метода реализации монотонного нагрева (функционального вида теплового воздействия, геометрии образца). Для определения теплопроводности широко используется общий случай монотонного разогрева пластины внешними одномерными потоками $q(\tau)$:

$$t(0, \tau) = t_0(\tau); \quad \vartheta(0, \tau) = 0; \quad q_0(\tau) = \left(\frac{d\vartheta}{dr} \right)_{r=0};$$

$$\vartheta(r, \tau) = q_0 r (1 + \sigma_q) + (b_0 / 2a_0) r^2 (1 + \sigma_b), \quad (6)$$

где

$$\sigma_q = \frac{1}{3} \left[(k_{br} - k_a - 2k_\lambda) \frac{b_0 r^2}{2a_0} \right] - \frac{1}{2} (k_\lambda q_0 r); \quad \sigma_b = \frac{1}{3} \left[(k_{br} - k_a - 2k_\lambda) \frac{b_0 r^2}{2a_0} \right]. \quad (7)$$

Монотонный режим нагрева пластины позволяет определять теплопроводность по измеряемым в опыте значениям перепада температуры $\vartheta(\tau)$ и плотности теплового потока $q(\tau)$. При одностороннем разогреве подводимый через боковое сечение пластины тепловой поток значительно превосходит по величине поток, аккумулируемый внутри пластины:

$$\left[\frac{c_0 \rho_0 h b_0}{2q_0} \right] < 0,1. \quad (8)$$

Благодаря этому температурное поле пластины на протяжении опыта сохраняется близким к стационарному. Для расчета теплопроводности λ_0 как функции температуры базового слоя $t_0(\tau)$ использовали выражение

$$\lambda_0 = \frac{q_0 h}{\vartheta_h}, \quad (9)$$

где q_0 – регистрируемый тепловой поток; h – толщина пластины; $\vartheta_h(r, \tau)$ – перепад температуры в пластине.

Для каждого исследуемого образца проводили по пять экспериментов (до $t = 100$ °C), результаты которых использованы для определения величины теплопроводности, оценки систематической и допускаемой основной погрешностей. Результаты обрабатываемых на ЭВМ данных позволили определить поправку на теплоемкость, тепловое сопротивление и теплопроводность испытываемых образцов.

В итоге получены результаты измерения полимерных материалов № 1 и 2.

Образцы материала № 1 (табл. 4) исследовали с нанесением на контактные поверхности высокотеплопроводных масел.

Таблица 4

Значения температурной проводимости λ в пяти контрольных точках диапазона для образцов материала № 1

Номер измерения	λ , Вт/(м·К)				
	Точка 1 ($t_1 = 25$ °C)	Точка 2 ($t_2 = 35$ °C)	Точка 3 ($t_3 = 50$ °C)	Точка 4 ($t_4 = 75$ °C)	Точка 5 ($t_5 = 100$ °C)
1	0,167	0,162	0,167	0,1720	0,1740
2	0,187	0,165	0,164	0,1570	0,1750
3	0,171	0,159	0,160	0,1680	0,1710
4	0,195	0,178	0,183	0,1890	0,1900
5	0,172	0,161	0,161	0,1720	0,1770
Среднее	0,178	0,165	0,167	0,1716	0,1774

В силу особенностей применения волокнистых и пористых образцов для исследования материала № 2 использовали высокотеплопроводную пасту (табл. 5).

Таблица 5

Значения температурной проводимости λ в пяти контрольных точках диапазона для образцов материала № 2

Номер измерения	λ , Вт/(м·К)				
	Точка 1 ($t_1 = 25$ °C)	Точка 2 ($t_2 = 35$ °C)	Точка 3 ($t_3 = 50$ °C)	Точка 4 ($t_4 = 75$ °C)	Точка 5 ($t_5 = 100$ °C)
1	0,1140	0,1150	0,1150	0,1220	0,1230
2	0,1200	0,1220	0,1180	0,1240	0,1230
3	0,1270	0,1210	0,1200	0,1280	0,1270
4	0,1340	0,1290	0,1300	0,1410	0,1390
5	0,1380	0,1360	0,1340	0,1440	0,1410
Среднее	0,1266	0,1246	0,1234	0,1318	0,1306

Как показали измерения, величины теплопроводности волокнистого материала (образца № 2) не существенно ниже значений материала № 1. Величина максимальной средней теплопроводности в диапазоне от 25 до 100 °C составила для материала № 1 $\lambda = 0,18$ Вт/(м·К), а для материала № 2 $\lambda = 0,13$ Вт/(м·К). Полученные величины удовлетворительно согласуются со справочными данными. Справочная величина для мягкого поливинилхлорида составляет $\lambda = 0,14\text{--}0,19$ Вт/(м·К) [8].

Определив λ материала, можно возвратиться к (5) и рассчитать время прогрева отопительного прибора системы теплоснабжения временного мобильного сооружения. Для этого вначале путем эксперимента найдем значения a , c_p и ρ материалов № 1 и 2.

Для образцов № 1 имеем:

$$\rho_{\text{№1}} = 860 \text{ кг/м}^3; \quad c_{p_{\text{№1}}} = 1,22 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \text{ и } a_{\text{№1}} = 1,52 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расчет выполнен для характерной толщины материала $R = 0,001$ мм значений коэффициента теплоотдачи со стороны греющей жидкости 620 Вт/(м²·К) (получено в эксперименте). Время разогрева предположительно принимаем на уровне одной минуты ($\tau = 60$ с).

Для принятых условий будем иметь:

$$Bi_{R=0,001} = 8,3; \quad Fo_{R=0,001, \tau=60} = 2,28.$$

Используя значения $Bi_{R=0,001} = 8,3$ и $Fo_{R=0,001, \tau=60} = 2,28$ и обращаясь к (1), находим среднее по сечению значение безразмерной температуры $\bar{\theta}$ (рис. 7)

$$\bar{\theta} = 0,015.$$

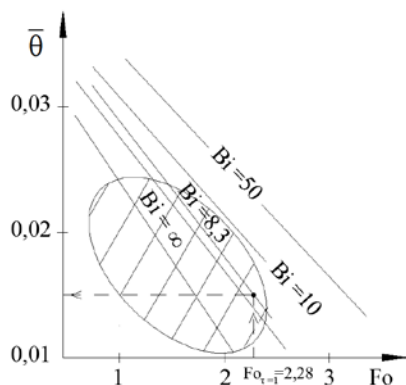


Рис. 7. Средняя по сечению пластины температура ($R/l < 0,1$ (рис. 1), малые значения $\bar{\theta}$)

Как видим, $t_{R=0,001, \tau=60}$ составляет 88 °С при температурах греющей и атмосферной сред соответственно 100 и 20 °С.

Анализ рис. 7 позволяет сделать заключение: время прогрева отопительного прибора не будет превышать 60 с, что в совокупности со временем монтажа отопительной системы не превысит 5 мин.

ВЫВОДЫ

Авторами экспериментально изучены теплофизические характеристики полимерного материала для изготовления мягких отопительных приборов системы теплоснабжения.

На базе полученных данных эксперимента показано, что время разогрева до рабочей температуры отопительной системы не превышает 60 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качар, И. Л. Исследование теплоотдачи отопительного прибора системы теплоснабжения полевого госпиталя, функционирующего в условиях чрезвычайных ситуаций / И. Л. Качар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 4. – С. 60–63.
2. Оценка теплоотдачи отопительного прибора системы теплоснабжения с вихревым теплогенератором / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 6. – С. 46–52.
3. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 1. – 606 с.
4. Шидловский, В. В. Регенеративное использование тепловых отходов нагревательных и термических печей машиностроительных теплотехнологий: дис. ... канд. техн. наук / В. В. Шидловский. – Минск: БНТУ, 2012.
5. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
6. Описание и марки полимеров – Поливинилхлорид [Электронный ресурс] / Специализированный ежемесячный журнал «Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии». – Москва, 2005. – Режим доступа: <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/6.html#v655>. – Дата доступа: 26.01.2013.
7. Эксплуатационная документация на измеритель теплопроводности ИТ-λ-400. – Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2012. – 31 с.
8. Thermal Conductivity of some common Materials and Gases [Electronic resource] / Engineering ToolBox. – Mode of access: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. – Date of access: 23.10.2012.

Представлена кафедрой ПТЭ и Т

Поступила 01.03.2013