

УДК 669.04

**ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ВЫБОРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ФУТЕРОВКИ  
НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Доктора техн. наук, профессора ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И., ТРУСОВА И. А.,  
НЕСЕНЧУК А. П., асп. МЕНДЕЛЕВ Д. В., канд. физ.-мат. наук ГЕРМАН М. Л.**

*ПИИ «Евросталь ЛТД» (Украина),  
Белорусский национальный технический университет,  
РУП «Белорусский теплоэнергетический институт»*

В настоящее время при проектировании или модернизации нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий приме-

няют высокоэффективные огнеупорные и теплоизоляционные материалы, обеспечивающие надежную и долговечную работу печей.

При выборе оптимального варианта футеровки печи следует прежде всего оценить величину потерь через ограждающие конструкции в существующих агрегатах. Анализ тепловой работы методических печей, рабо-

тающих в непрерывном режиме, показывает, что футеровка при таких условиях находится практически в стационарном состоянии, т. е. ее температурное поле не изменяется во времени. Потери на разогрев весьма незначительны независимо от конструкции, и ими можно пренебречь.

В печах периодического типа действия даже при нормальном режиме работы состояние температурного поля футеровки не стационарно: периоды разогрева чередуются с периодами охлаждения во время выгрузки нагретых и загрузки холодных деталей и заготовок. При этом футеровка теряет, а затем аккумулирует часть теплоты, которая подается в печь.

Аналогичная ситуация может возникать в печах обоих типов при разогреве после остановки. Количество теплоты на разогрев кладки или аккумулярованное ею зависит от массы (плотности) и теплоемкости футеровочных материалов.

Вместе с тем соблюдение требований техники безопасности при работе с высокотемпературным технологическим оборудованием требует, чтобы температура на наружных поверхностях печи (контактирующая с поверхностью тела рабочего) не превышала допустимого уровня 38–40 °С [1].

Оптимальный вариант футеровки может быть определен исходя из соотношения сумм капитальных и эксплуатационных затрат. В качестве периода, за который следует сравнивать затраты при использовании различных футеровочных материалов, целесообразно рассматривать продолжительность эксплуатации без капитального ремонта одного из предлагаемых вариантов, обладающего наибольшей стойкостью при работе в данных условиях. Принимая этот вариант за эталон, все прочие оцениваются путем сравнения соответствующих капитальных и эксплуатационных затрат за данный период.

Суммарные капитальные и эксплуатационные затраты составят

$$З = З_k + З_o = C_\phi F_\phi + mnC_\phi F'_\phi, \quad (1)$$

где  $F'_\phi$  – площадь, на которой осуществляется замена огнеупорного слоя футеровки во время ремонта, м<sup>2</sup>;  $n$  – количество замен огнеупорного слоя в год;  $m$  – стойкость футеровки (без капитального ремонта), лет;  $C_\phi$ ,  $F_\phi$  – стоимость 1 м<sup>2</sup> с учетом монтажа (дол. США/м<sup>2</sup>) и площадь огнеупорного слоя футеровки.

Сравнивая данные величины и варьируя материалом, из которого может быть выполнен огнеупорный слой футеровки печи, можно определить оптимальный вариант.

При оценке оптимальности конструкции футеровки в печах периодического типа помимо капитальных и эксплуатационных затрат необходимо учитывать стоимость топлива, которое используется на разогрев печи в начале работы, и количество теплоты, которое аккумулируется кладкой в процессе работы. Следовательно, в (1) добавится еще одно слагаемое  $З_t$  (затраты на топливо), которое может быть определено следующим образом:

$$З_t = C_t \left( \frac{Q_{ак} f + Q_{раз} k}{Q_p^H} \right), \quad (2)$$

где

$$Q_{\text{ак(раз)}} = V_i \rho_i \bar{c}_i \left( \overline{t_i^{\text{кон}}} - \overline{t_i^{\text{нач}}} \right), \quad (3)$$

где  $C_T$  – стоимость 1 м<sup>3</sup> или 1 кг топлива;  $Q_{\text{ак(раз)}}$  – теплота, затраченная на разогрев печи после остановки или аккумулированная кладкой;  $V_i, \rho_i, \bar{c}_i$  – объем, плотность и средняя теплоемкость соответственно каждого слоя футеровки;  $\overline{t_i^{\text{кон}}}$  и  $\overline{t_i^{\text{нач}}}$  – средние значения конечной и начальной (для случаев разогрева после простоя и нагрева при нормальном режиме работы печи принимаются различные значения) температур каждого слоя;  $f$  и  $k$  – количество технологических циклов работы печи и разогрева после простоев соответственно.

Затраты топлива на нагрев кладки из различных материалов существенно зависят от их теплоемкости и плотности (массы футеровки). Кроме того, важным фактором в данном случае является время охлаждения футеровки при выгрузке нагретых деталей и загрузке новых. То есть теплота, аккумулированная кладкой, зависит как от теплофизических свойств материалов, так и от применяемой технологии, которая определяет продолжительность цикла «охлаждение–нагрев».

Расход условного топлива на нагрев на 100 °С 1 м<sup>2</sup> футеровки, выполненной из современных волокнистых материалов, – минимум на порядок ниже при аналогичных условиях для футеровок из традиционных теплоизоляционных материалов [2].

На рис. 1 представлена основная номенклатура выпускаемых волокнистых теплоизоляционных материалов, используемых в качестве отдельных слоев футеровки при создании либо модернизации нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий.

Наиболее представительными производителями и продавцами волокнистых футеровок на пространстве СНГ являются группа компаний «Стройсинтез» [3], а также официальные представители компании UNIFRAX в России – НПП «Изомат» [4, 5].

Ниже выполнен расчет нагрева волокнистых футеровок указанных выше производителей по закону Фурье с целью определения соотношений «толщина слоя – температура внешней поверхности слоя – плотность теплового потока».

Из теории огнеупоров [6] известно, что зависимость теплопроводности огнеупоров от температуры задается формулой

$$\lambda(T) = a + bT + cT^2 + dT^{-1}, \quad (4)$$

где  $a, b, c, d$  – безразмерные коэффициенты для каждого вида огнеупора;  $T$  – абсолютная температура, К.

Стационарное одномерное уравнение теплопроводности имеет вид

$$q = -\lambda(T) \frac{dT}{dx}. \quad (5)$$

Интегральное выражение дифференциального уравнения (5) с учетом (4) можно записать

$$q\delta = a_1(T_{\text{внутр}} - T_{\text{внешн}}) + \frac{b_1(T_{\text{внутр}}^2 - T_{\text{внешн}}^2)}{2} + \frac{c_1(T_{\text{внутр}}^3 - T_{\text{внешн}}^3)}{3} + d_1(\ln T_{\text{внутр}} - \ln T_{\text{внешн}}), \quad (6)$$

где  $\delta$  – толщина слоя футеровки, м;  $T_{\text{внутр}}$ ,  $T_{\text{внешн}}$  – внутренняя и внешняя температуры слоя футеровки, К.

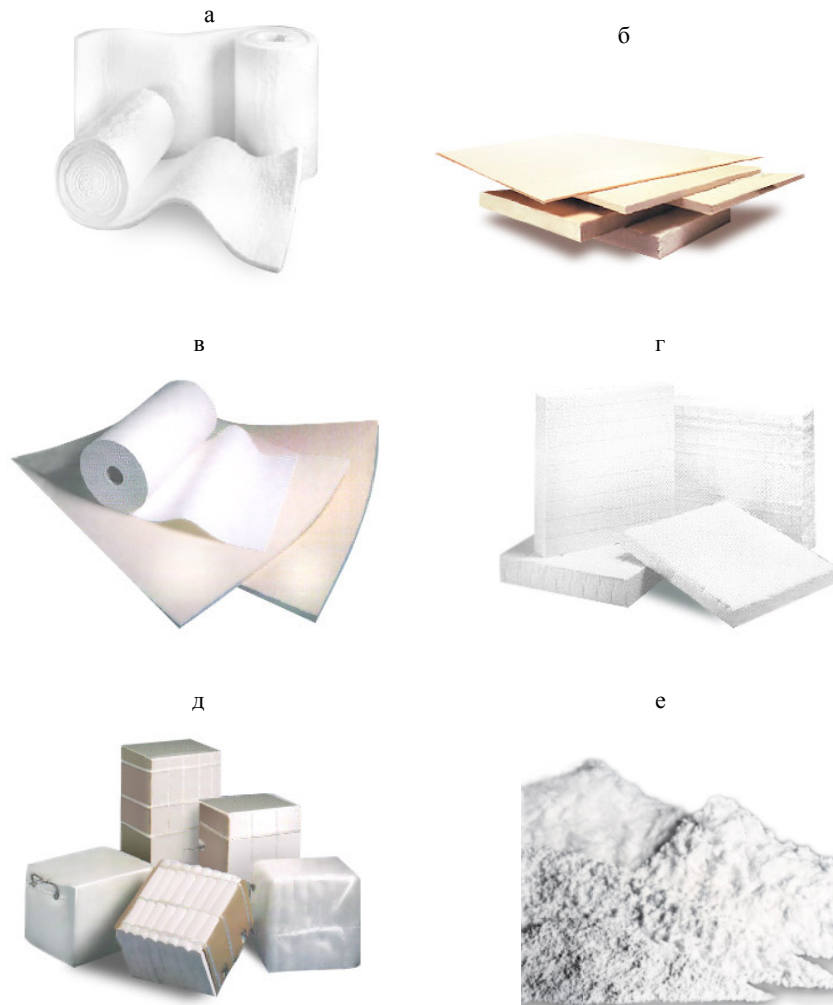


Рис. 1. Современные волокнистые теплоизоляционные материалы: а – одеяла; б – плиты; в – фетр; г – прессованные модули; д – призмоблоки; е – неформованные (пены, порошки, мастики, клеи, цементы)

Решение (5) осуществлено численным методом. Уравнение (4) заменяется интерполяционной функцией, составленной по табличным значениям теплопроводности конкретного материала от температуры. Все табличные значения теплопроводностей волокнистых материалов были измерены производителем согласно действующему международному стандарту ENV 1094-7:1993 [7]. Расчет произведен для  $T_{\text{внутр}} = 1273,15$  К.

На рис. 2 представлена зависимость плотности теплового потока на внешней поверхности слоя футеровки от его толщины.

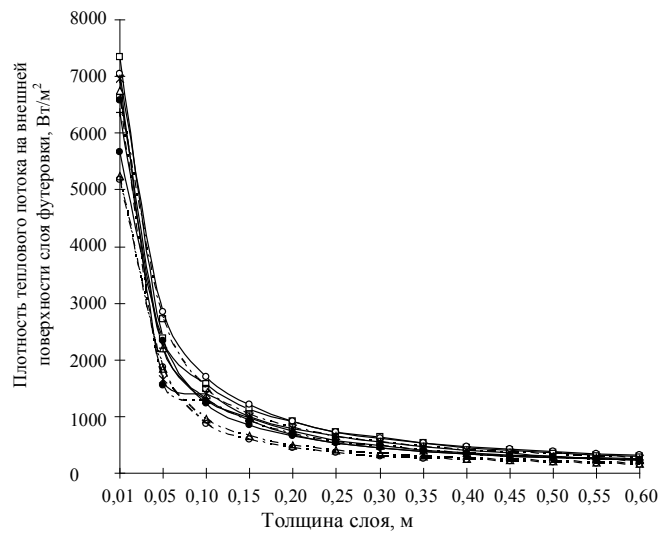


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока на внешней поверхности слоя футеровки от его толщины: МКРВ-200 (—△—); МКРФ-100 (—△—); МКРФ-1 (—□—); МКРПГ-400 (—□—); ШПГТ-450 (—○—); МКРП-340 (—△—); МКРК-500 (—+—); Foamfrax (—\*—); Fiberfrax Bonded-S (—●—); Duraboard LD (—△—); Durafelt LD (—○—); Prismo-Block-S (—□—); Insulfrax S (—●—)

На рис. 3 представлена величина снижения теплового потока на внешней поверхности слоя футеровки в зависимости от увеличения ее толщины.

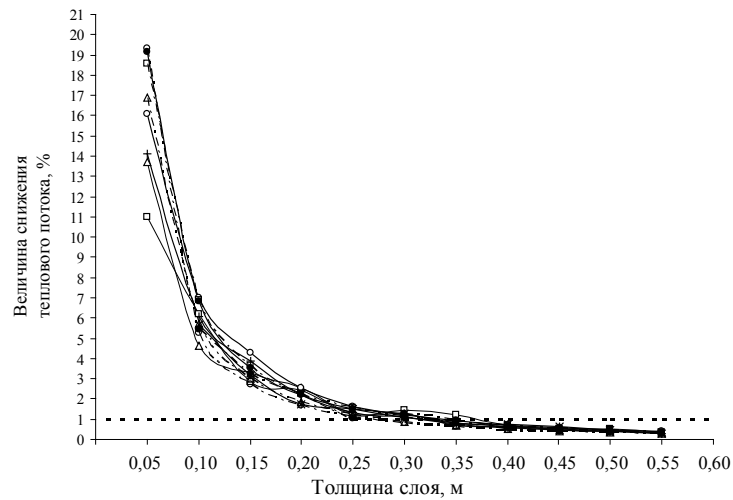


Рис. 3. Зависимость величины снижения теплового потока от толщины применяемого слоя футеровки: МКРВ-200 (—△—); МКРФ-100 (—△—); МКРФ-1 (—□—); МКРПГ-400 (—□—); ШПГТ-450 (—○—); МКРП-340 (—△—); МКРК-500 (—+—); Foamfrax (—\*—); Fiberfrax Bonded-S (—●—); Duraboard LD (—△—); Durafelt LD (—○—); Prismo-Block-S (—□—); Insulfrax S (—●—)

На рис. 3 видно, что для обозначенных волокнистых футеровок величина снижения теплового потока при последовательном повышении значения толщины с 0,25–0,35 м на 0,05 м составляет менее 1 %. Это означает, что при увеличении толщины футеровки с 0,25 до 0,5 м снижение теплового потока в среднем составит менее 3 %. При этом стоимость футеровки возрастает в 2 раза.

На основании изложенного выше температурный диапазон применения волокнистой футеровки ограничивается 55–75 °С на ее внешней поверхности.

Для достижения необходимой температуры на поверхности футеровки печи согласно ранее обозначенному СП нужно обшить футеровку печи жестью. При этом воздушная прослойка между жестью и внешней поверхностью футеровки должна составлять до 180 мм.

На рис. 4 отображены температурные распределения по толщине каждого слоя.

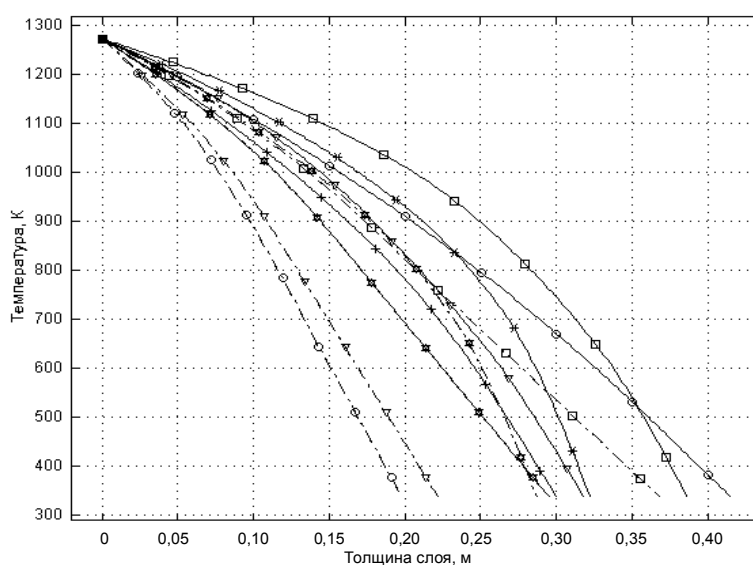


Рис. 4. Температурный профиль волокнистой теплоизоляции (температура внешней поверхности футеровки не превышает 65 °С): 1 – МКРВ-200 (—△—); 2 – МКРФ-100 (—△—); 3 – МКРФ-1 (—□—); 4 – МКРПГ-400 (—□—); 5 – ШППГТ-450 (—○—); 6 – МКРП-340 (—△—); 7 – МКРК-500 (—+—); 8 – Foamfrax (—\*—); 9 – Fiberfrax Bonded-S (—★—); 10 – Duraboard LD (—△—); 11 – Durafelt LD (—○—); 12 – Prismo-Block-S (—□—); 13 – Insulfrax S (—★—)

Такой подход при решении задачи теплопроводности в слое футеровки дает возможность составить различные варианты многослойной футеровки для нагревательных и термических печей периодического типа действия кузнечных цехов (исходя из начальных условий).

Для оценки снижения стоимости футеровок (замены более дорогих материалов на дешевые) необходимо определить температурные диапазоны (рис. 4), в пределах которых скорости изменения температуры по толщине имеют одинаковые либо большие по модулю значения. При этом общая толщина теплоизоляционного слоя значительных изменений не претерпит. Важно отметить, что основной огнеупорный слой должен выбираться исходя из показателей прочности и потери массы.

Математическая постановка задачи подбора слоев футеровки имеет следующий вид:

$$\forall i, j (i, j \in M); \forall T (T \in [T_{\text{внешн}}, T_{\text{внутр}}]) : \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_i \geq \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_j \rightarrow j = i, \quad (7)$$

где  $M$  – рассматриваемое множество волокнистых футеровок.

В табл. 1–3 приведены некоторые компоновки трехслойной волокнистой футеровки, полученные согласно рис. 4 и (7).

Таблица 1

Наименование слоя	Огнеупорный	Средний	Наружный	Общая толщина скомпонованной футеровки, мм
Материал	Duraboard LD	Durafelt LD	МКРФ-1 МКРПГ-400	185
Толщина слоя, мм	50	85	50	

Таблица 2

Наименование слоя	Огнеупорный	Средний	Наружный	Общая толщина скомпонованной футеровки, мм
Материал	Duraboard LD	Durafelt LD	МКРВ-200 МКРФ-100 МКРП-340	210
Толщина слоя, мм	50	85	75	

Таблица 3

Наименование слоя	Огнеупорный	Средний	Наружный	Общая толщина скомпонованной футеровки, мм
Материал	ШПГТ-450	Durafelt LD	МКРФ-1 МКРПГ-400 МКРВ-200 МКРФ-100 МКРП-340	280
Толщина слоя, мм	100	40	140	

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика выбора энергоэффективной футеровки на основе соотношения сумм капитальных и эксплуатационных затрат.

2. Численно решена нелинейная задача теплопроводности в слое волокнистой футеровки. Определена актуальность применения волокнистой футеровки на уровне 55–75 °С (в среднем 65 °С) на ее внешней поверхности.

3. Выполнена математическая постановка решения задачи подбора слоев футеровки. Приведены некоторые варианты компоновки трехслойных волокнистых футеровок.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарно-эпидемиологические правила. Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий: СП 2.2.1.1312-03. – Введ. 25.06.2003. – М.: Минздрав России, 2003.
2. Пути решения основных задач модернизации парка газопламенных печей машиностроительного и металлургического производств / В. И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С. 303–306.
3. Официальный сайт «Стройсинтез группа компаний» [Электронный ресурс] / Огнеупорные материалы – Воронеж, 2000. – Режим доступа: <http://www.stroysintez.ru> – Дата доступа: 25.01.2009.
4. Официальный сайт «Изомат. Промышленная теплоизоляция» [Электронный ресурс] / Каталог продукции UNIFRAX. – Солнечногорск, 2005. – Режим доступа: <http://www.izomat.ru> – Дата доступа: 25.01.2009.
5. Официальный сайт «UNIFRAX» [Электронный ресурс] / UNIFRAX product sheets– Niagara Falls, 2004. – Режим доступа: [www.unifrax.com](http://www.unifrax.com) – Дата доступа: 25.01.2009.
6. К а щ е е в, И. Д. Свойства и применение огнеупоров: справ. изд. / И. Д. Кашеев. – М.: Теплотехник, 2004. – С. 21.
7. Официальный сайт «Standards Direct International Standards and Support Materials» [Электронный ресурс] / International Standard ENV 1094-7:1993. – Great Britain, 2005. – Режим доступа: <http://www.standardsdirect.org> – Дата доступа: 25.01.2009.

Представлена кафедрой  
металлургических технологий

Поступила 25.05.2009

УДК 697.34

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАФИКА ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ В ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Докт. техн. наук, доц. СЕДНИН В. А.,  
канд. техн. наук, доц. СЕДНИН А. В., асп. БОГДАНОВИЧ М. Л.

*Белорусский национальный технический университет*

В числе проблем в области теплофикации и централизованного теплоснабжения можно выделить группу задач, для которых трудно получить аналитическое решение. Одной из них является определение оптимальных параметров температурного графика отпуска тепловой энергии (графика центрального регулирования отпуска тепловой энергии) [1].

Общеизвестно, что выбор оптимального температурного графика водяной тепловой сети осуществляется при проектировании системы теплоснабжения на основании технико-экономических расчетов. Основными факторами, влияющими на выбор температурного графика, являются затраты на строительство теплоисточников, тепловых сетей и теплопотребляющего оборудования, стоимость топлива, тепловые потери, затраты на транспорт теплоносителя. Так как любая система централизованного теплоснабжения (СЦТ) в период своего жизненного цикла эволюционно развивается как количественно (расширяется зона теплоснабжения), так и качественно (происходит модернизация, реконструкция и автоматизация отдельных ее элементов), очевидно, что со временем возникает вопрос