

**К.С.Цюпа, А.Л.Чайка, А.А.Сохацкий, Б.В.Корнилов, В.Ю.Шостак**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ШАХТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ТЕПЛОВОЙ РАБОТЕ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ**

Целью работы является установление закономерностей влияния удельных тепловых потерь и температуры периферийных газов, а также толщины футеровки на распределение температур по толщине футеровки и высоте расчетного участка шахты доменной печи. Установлено, что уменьшение удельных тепловых нагрузок выравнивает температурный градиент в футеровке по высоте печи и по толщине футеровки, но при этом резко возрастают температуры по толщине футеровки. Отмечено, что изменение температур на внешней стенке футеровки не влияет на изменение температурного градиента по толщине футеровки при неизменных удельных тепловых нагрузках.

**удельные тепловые потери, температуры периферийных газов, толщина футеровки, доменная печь, шахта, высота печи**

**Состояние вопроса.** В современном доменном производстве среди средств контроля и автоматизации доменного процесса важным вопросом является контроль технического состояния ограждения доменной печи, которое напрямую зависит от состояния футеровки[1].

Многочисленные исследования показали, что разрушение неохлаждаемой части шахты происходит, в основном, вследствие, нестационарных тепловых нагрузках при проведении плавки. Наиболее важной, является задача контроля тепловых потерь в системе охлаждения доменной печи.

Теоретический анализ процессов теплообмена между холодильниками шахты и рабочим пространством печи показывает, что основными факторами, определяющими количество тепла, переданного системе охлаждения, является температура периферийного газа и толщина футеровки[2].

Информация об удельных тепловых нагрузках в шахте доменных печей, полученных в результате замеров в реальных рабочих условиях, наглядно показывает, что тепловые нагрузки переменчивы по высоте и сечению шахты, а также изменяются по времени[6]. Данные изменения удельных тепловых нагрузок, позволяют судить о состоянии футеровки шахты, но это довольно трудно оценить, так как на удельные тепловые нагрузки влияют множество параметров, таких как: газодинамический режим, температура периферийных газов, тип газораспределения по сечению шахты и так далее. Стоит отметить, что сравнивая и оценивая все данные параметры, уже можно довольно четко определять условия тепловой работы футеровки и, соответственно, приблизительно оценить ее состояние.

Основными направлениями при изучении тепловых потерь в шахте и в доменной печи в целом, могут являться:

- учет величины внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие в технико–экономических расчетах;
- использование для поиска рационального и оценки эффективности выбранного тепло–газодинамического режима при изменении параметров и состава дутья, давления в колошниковом пространстве, программы загрузки печи;
- реализация автоматических систем управления состояния футеровки и гарнисажа;
- планирование изменений в конструкции шахты, заплечиков и металлоприемника, программы загрузки печи[3].

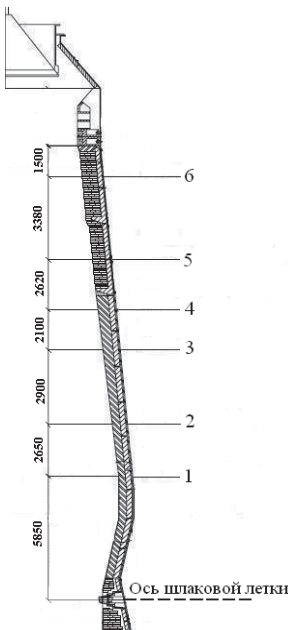
Данные пункты сводятся к трем основным требованиям в работе доменной печи: экономичность; производительность; надежность[4].

Учитывая это, прогнозирование показаний термпар и установления зависимостей между показаниями и возможными условиями тепловой работы футеровки шахты доменной печи является важной задачей.

**Постановка задачи.** Расчет проводился по техническим характеристикам доменной печи объемом  $1513 \text{ м}^3$  нижняя часть шахты, которой до половины охлаждается системой испарительного охлаждения, а верхняя часть – технической водой. При использовании системы испарительного охлаждения затруднительно определить теплосъем с отдельно взятого холодильника[1]. В этом случае контроль тепловой работы и износ профиля шахты можно осуществлять на основе использования стационарных термпар, установленных в футеровку шахты печи[5]. В случае применения системы испарительного охлаждения, показания системы контроля состояния футеровки являются необходимыми для расчета остаточной толщины футеровки.

Схематический вид расчетной области шахты доменной печи представлен на рис.1. На рис.1 обозначены горизонты установки термпар и их расположение по высоте печи.

Рис.1. Схематический вид расчетной области шахты доменной печи



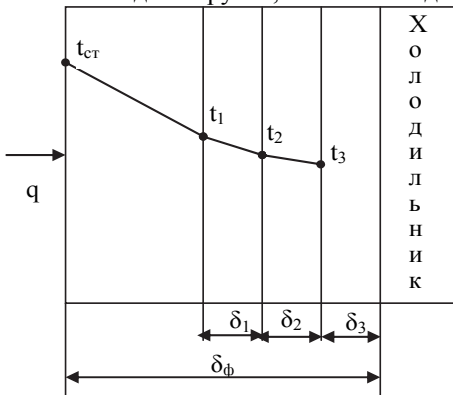
Условия тепловой работы футеровки шахты задавались удельными тепловыми нагрузками  $q$  и температурой периферийных газов  $t_p$ . Применительно к данной доменной печи теплофизические свойства и толщина футеровки изменяются по высоте. На всех горизонтах глубина закладки тер-

мопар одинакова, кроме пятого. В табл.1 представлены физические параметры футеровки на каждом горизонте.

Таблица 1. Параметры футеровки на каждом горизонте

горизонта	Глубина закладки термопар в сечении, м	Материал	Толщина футеровки по горизонтам, м
1	0,05/0,15/0,25	Бетон теплопроводностью 5,8 Вт/мК	0,316
2	0,05/0,15/0,25		0,372
3	0,05/0,15/0,25	Бетон теплопроводностью 1,5 Вт/мК	0,430
4	0,05/0,15/0,25		0,500
5	0,15/0,25/0,35	ШПД	0,690

На заданных отметках по высоте и периметру печи в футеровку закладываются три термопары (рис.2). Термопары установлены с таким расчетом, чтобы при выходе из строя одной из трех термопар, расположенных в одной трубке, оставшиеся две продолжали функционировать.



р.2. Схема закладки термопар

в этих зонах носит стационарный характер. Условия теплообмена на ограничивающих футеровку поверхностях таковы, что вертикальной составляющей теплообмена можно пренебречь, следовательно, распределение температур по толщине футеровки является функцией одной координаты (рис.3).

В этом случае распределение температур согласно закону Фурье описывается одномерным стационарным уравнением[7]:

$$q = \lambda \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

Используемую схему закладки термопар, для вычисления температуры на каждой из них, можно представить в виде многослойной стенки, где каждая термопара будет представлять собой границу между двумя стенками (рис.2).

Учитывая, что каждая из зон шахты печи в заданный момент времени работает в определенных температурных и технологических условиях, поэтому принято, что теплопроводность футеровки в этих

где  $q$  – тепловой поток направленный по нормали к поверхности ограждения доменной печи, кВт/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура тела холодильника, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, кВт/м·К;  $x$  – координата вдоль которой распространяется тепловой поток, м. Разрешив уравнение (1), для плотности теплового потока, относительно разности температур, получим уравнение теплопроводности для плоской стенки:

$$t_{c1} - t_{c2} = \frac{\delta}{\lambda} q \quad (2)$$

где  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – температуры на внешних краях стенки, °С;  $\delta$  – толщина плоской стенки, м.

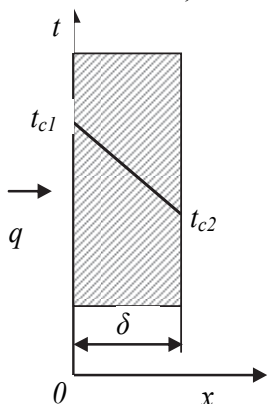


Рис.3. Схема теплопередачи через плоскую стенку

В данном расчете принято что температура на внешней стенке футеровки равна температуре пристеночного газа ( $t_n = t_c$ ), которая определяется из эмпирической зависимости распределения температуры периферийных газов по высоте печи[5].

В исследованиях принято допущением, что шихта загружаемая в печь имеет температуру  $t_{ui} = 200\text{--}600^\circ\text{C}$ , в зависимости от доли агломерата в ней и это оказывает влияние на показания периферийных термопар. П.Г.Васильевым при определении температуры пристеночного газа не учитывалось изменение температуры загружаемой шихты. Для учета влияния температуры загружаемой шихты на температуру периферийных газов, в первом приближении, принято, что показания периферийных термопар, равны температуре загружаемой шихты. ( $t_n = 200\text{--}600^\circ\text{C}$ ).

На теплообмен в нижней зоне доменной печи определяющее влияние оказывает температурный режим горна. Используя зависимости, полученные П.Г.Васильевым[5], и задавая температурой периферийных газов, определялись температуры пристеночных газов, соответственно, и температуры на внешней стенке футеровки, для каждого горизонта.

Задавая тепловым потоком и температурой на внешней стенке футеровки получены температуры каждой термопары ( $t_1, t_2, t_3$ ). Уравнения для расчета температуры каждой термопары имеют вид:

для 1-ой термопары (ближней к холодильнику):

$$t_1 = t_{cm} - q \cdot 1000 \cdot (\delta_\phi - \delta_3) / \lambda_\phi \quad (3)$$

для 2-ой термопары:

$$t_2 = t_{cm} - q \cdot 1000 \cdot (\delta_\phi - (\delta_3 + \delta_2)) / \lambda_\phi \quad (4)$$

для 3-ей термопары (ближней к внешней стенке футеровки):

$$t_3 = t_{cm} - q \cdot 1000 \cdot (\delta_\phi - (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)) / \lambda_\phi \quad (5)$$

где:  $t_1, t_2, t_3$  – температуры на термопарах, расположенных в футеров-

ке, °С;  $q$  – удельные тепловые нагрузки на заданном горизонте, кВт/м<sup>2</sup>;  $\delta_{\phi}$  – общая толщина футеровки на заданном горизонте, м;  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – глубина закладки термпар в футеровку, м;  $\lambda_{\phi}$  – коэффициент теплопроводности материала футеровки, Вт/м·К.

Расчет температурных показателей термпар в футеровке проведен с варьированием следующих параметров:

- удельные тепловые нагрузки (увеличение в 1,5 раза и уменьшение в 2 раза относительно исходного значения);
- температура периферийных газов (увеличение и уменьшение на 200 °С относительно исходного значения);
- толщина футеровки (уменьшение в процентном соотношении от начальной толщины до 10%);

**Результаты исследования.** Значения удельных тепловых нагрузок для каждого горизонта, при максимальном соответствии возможным реальным показаниям[1], рассчитаны в широких диапазонах. Полученные значения, в дальнейшем, дают максимальную адекватность расчетных данных (рис.4). Это согласуется с исследованиями тепловых потерь в шахте ДП, проведенных ранее на печах различного объема[1]. Данные значения были заданы как начальное условие для дальнейшего варьирования величины удельных тепловых нагрузок.

Для расчета температуры пристеночного газа, равной температуре внешней стенки футеровки, была принята температура периферийных газов  $t_n = 400^{\circ}\text{C}$ , из которой были рассчитаны температуры для каждого из горизонтов (рис.5). Данные значения температуры поверхности стенки.



Рис.4. Удельные тепловые нагрузки по высоте шахты

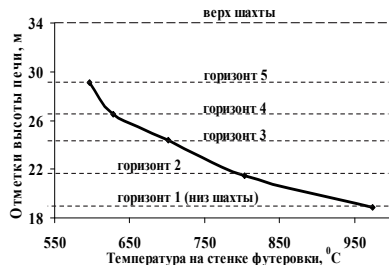


Рис.5. Температуры внешней стенки футеровки по высоте шахты

Расчетные значения температурных показаний каждой термпары на каждом горизонте, были вычислены из уравнений (3–5) и представлены в виде зависимостей по высоте расчетного участка шахты, а именно для каждого горизонта (рис.6).

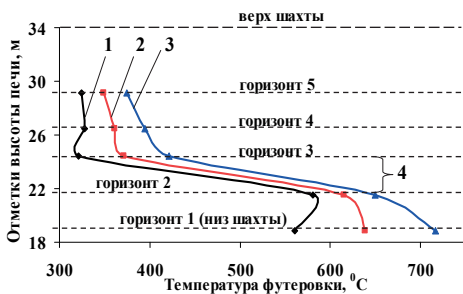


Рис.6. Температуры футеровки на горизонтах установки термомпар. 1 – показания термомпары №1; 2 – показания термомпары №2; 3 – показания термомпары №3

Данные показания могут говорить о том, что увеличилось количество тепла отводимого холодильниками. Напротив, уменьшение привело к выравниванию температурного градиента по толщине футеровки и, соответственно, при неизменной температуре внешней стенки футеровки увеличение температур вблизи холодильника. Такие показания могут говорить об ухудшении теплосъема холодильником. Данные результаты представлены вместе с исходными значениями на рис.8.

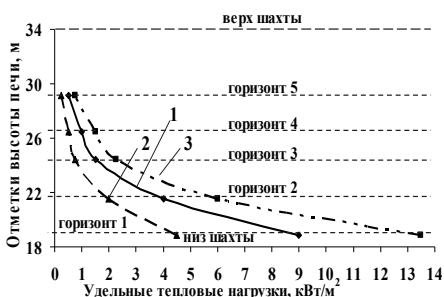


Рис.7.Изменение удельных тепловых нагрузок: 1–начальные значения; 2–уменьшение значений в 2 раза; 3 –увеличение значений в 1,5 раза

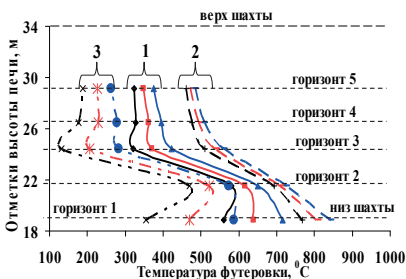


Рис.8. Показания термомпар при уменьшении (2) удельных тепловых нагрузок в 2 раза и при увеличении в 1,5 раза (3) относительно начальных значений (1)

Увеличение и уменьшение температуры периферийных газов на  $200^{\circ}\text{C}$  при неизменных удельных тепловых нагрузках, заданных как начальное ус-

Увеличение удельных тепловых нагрузок (рис.7.) при неизменной температуре периферийных газов и толщине футеровки привело к увеличению температурного градиента по толщине футеровки. При неизменной температуре внешней стенки футеровки, температуры с приближением к холодильнику резко уменьшились.

ловие (рис.5), привело к изменению температуры пристеночного газа (внешней стенки футеровки (рис.9).

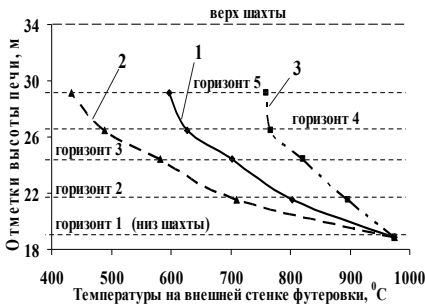


Рис.9.Изменение температур на внешней стенке футеровки при изменении температуры периферийных газов: 1- $t_{г1}=400^{\circ}\text{C}$  (начальные значения); 2- $t_{г1}=200^{\circ}\text{C}$ ; 3 -  $t_{г1}=600^{\circ}\text{C}$

Уменьшение температуры внешней стенки футеровки привело к уменьшению температур по толщине футеровки и увеличению температурного градиента по высоте печи, а увеличение привело к увеличению температур по толщине футеровки и уменьшению температурного градиента по высоте печи (рис.10). Установлено, что, в отличие от изменения значений удельных тепловых нагрузок, изменение температуры внешней стенки футеровки не повлияли на температурный градиент по толщине футеровки.

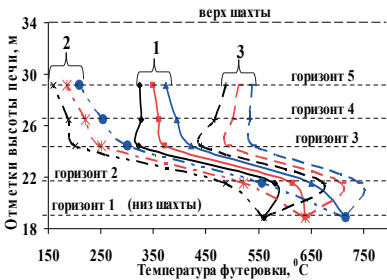


Рис.10.Изменение показаний термопар при уменьшении температуры периферийных газов (2) и при увеличении (3) относительно начальным значениям (1).

Расчет температур в футеровке, при изменении ее толщины и неизменных удельных тепловых нагрузках и температурах на внешней стенке футеровки, проводился по той же схеме, что и предыдущие расчеты распределения температур по толщине футеровки (использовались уравнения 3–5). Разгар задавался в процентном соотношении, относительно начальной толщины, от 0% до 90% (0% – целая футеровка). Учитывалось, что при разгаре футеровки начинали выходить из строя заложенные в нее термопары. В дальнейшем это отображено на графиках зависимостей как обрыв линии зависимости.

Если расчетные показания термопар выше или равны температуре внешней стенки футеровки, то это означает, что данные показания не могут быть адекватны в реальности процесса теплообмена и это является показателем того, что термопара не является рабочей (рис. 11–13). На рис. 14 представлены зависимости показаний термопар от процента разгара футеровки для каждого горизонта.

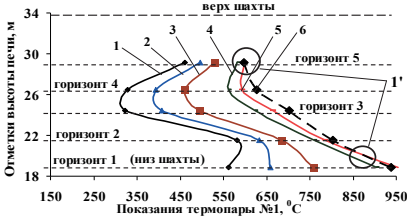


Рис. 11. Показания термопары №1 при разгаре футеровки 1 – 0%; 2 – 20%; 3 – 40%; 4 – 70%; 5 – 80%. 6 – температура внешней стенки футеровки. 1' – точки отказа термопары №1

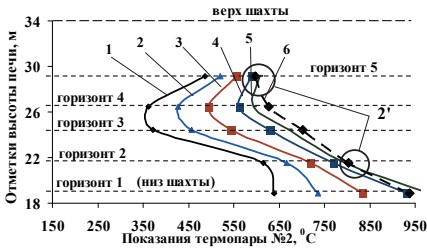


Рис. 12. Показания термопары №2 при разгаре футеровки 1 – 0%; 2 – 20%; 3 – 40%; 4 – 60%; 5 – 70%. 6 – температура внешней стенки футеровки. 2' – точки отказа термопары №2

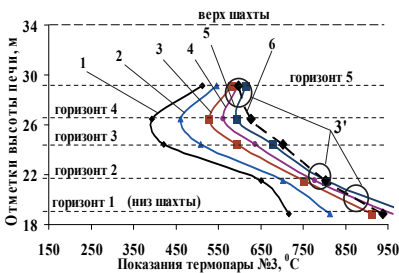


Рис. 13. Показания термопары №3 при разгаре футеровки 1 – 0%; 2 – 20%; 3 – 40%; 4 – 50%; 5 – 60%. 6 – температура внешней стенки футеровки. 3' – точки отказа термопары №3

На рис.11–13 видно, что при разгаре футеровки начинает выравниваться температурный градиент по высоте печи. Это обусловлено тем, что при меньшем количестве огнеупорного материала, его теплопроводные свойства играют меньшую роль на распределение температур в футеровке. Эта зависимость вытекает из того, что в уравнении теплопроводности (2) зависимость разницы температур и толщины плоской стенки прямо–пропорциональная.

По данным зависимостям отмечено, что при интенсивном разгаре футеровки (>40%) в условиях неизменного теплового потока (имеются в виду неизменные параметры работы системы охлаждения) и неизменными температурами внешней стенки футеровки есть вероятность повреждения термопар с температурой на стенке футеровки, вычисленной для каждого горизонта. Данная методика расчета перспективна для первичного анализа и дальнейшего развития методик контроля состояния ограждения шахты доменной печи. Она может быть использована как оценочный инженерный расчет для рационализации системы охлаждения и снижения тепловых потерь в шахте доменной печи.



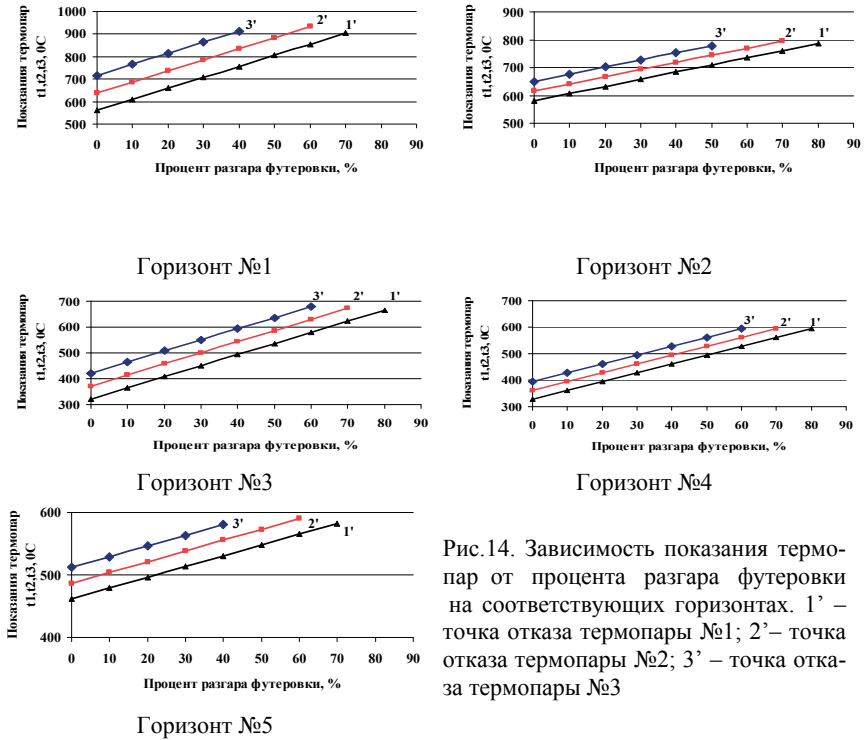


Рис.14. Зависимость показания термопар от процента разгара футеровки на соответствующих горизонтах. 1' – точка отказа термопары №1; 2' – точка отказа термопары №2; 3' – точка отказа термопары №3

## Выводы

1. Разработана методика, проведены исследования и установлены закономерности изменения температуры по толщине футеровки в зависимости от удельных тепловых нагрузок, температуры периферийных газов и процента разгара футеровки. Данная методика расчета перспективна для доменных печей, в шахте которых, установлена испарительная система охлаждения.

2. Наиболее сильное влияние на распределение температур по толщине футеровки оказывает изменение удельных тепловых нагрузок. Установлено, что уменьшение удельных тепловых нагрузок выравнивает температурный градиент в футеровке по высоте печи и по толщине футеровки, но при этом резко возрастают температуры по толщине футеровки. Увеличение удельных тепловых нагрузок приводит к более неравномерному температурному градиенту, как по высоте печи, так и по толщине футеровки.

3. Увеличение температуры периферийных газов привело к увеличению температур в самой футеровке и сглаживанию температурного градиента по высоте печи. Уменьшение, соответственно, к уменьшению температур в футеровке и более неравномерному температурному гради-

енту по высоте печи. Отмечено, что изменение температур на внешней стенке футеровки не влияет на изменение температурного градиента по толщине футеровки при неизменных удельных тепловых нагрузках и неизменной толщине футеровки.

4. Разгар футеровки приводит к увеличению температур по ее толщине. Установлено, что когда показания термопары, по расчетам совпадает с температурой пристеночного газа, при неизменных удельных тепловых нагрузках и температуре периферийных газов, данные показания не являются адекватными из-за выхода из строя термопары. Этот случай возможен при разгаре футеровки до уровня установки термопары.

1. *Домна* в энергетическом измерении. / А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, Г.И.Орел, В.И.Романенко. – Кривой Рог: Издательство СП «Мира». – 2004. – 436с.
2. *Брагинский А.М.* Интегрированные энергосберегающие технологии в производстве чугуна. – Харьков: Коллегиум, 2011. – С.242–243
3. *Перспективы* использования теплоэнергетических параметров доменной плавки в составе АСУ ТП доменной печи / А.Л.Чайка, Д.В.Пинчук, С.В.Кетлер, А.И.Швачка, А.А.Сохацкий // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2011. – Вып. 24. – С.77–88.
4. *Кожух В.Я.* Контроль потерь тепла в доменной печи // Сталь. – 1965. – №4. – С.298–301
5. *Васильев П.Г., Ризун Д.В.* К вопросу об определении температуры газов около стен доменной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 9. – С.71–72
6. *Behavior of cohesive zone in blast furnace.* K.Tashiro, U.Kanayama, Y.Nara, Y.Okuno, K. Fujita " HF 80 Congr. Haut. Fourneau, Aries, 1980 Vol 1" S. 1, 1980, III 1Л – III 1Л1 (РЖМет 1982 9В 167)
7. *Кутателадзе С.С. Боришанский В.М.* Справочник по теплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук И.Г.Товаровским*

***К.С.Цюпа, О.В.Бородулін, Б.В.Корнілов, О.А.Сохацький, О.Л.Чайка, В.Ю.Шостак***

**Дослідження стану футеровки шахти доменної печі з використанням інформації про теплову роботу периферійної зони**

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу питомих теплових втрат і температури периферійних газів, а також товщини футеровки на розподіл температур по її товщині і висоті розрахункової ділянки шахти доменної печі. Встановлено, що зменшення питомих теплових навантажень вирівнює температурний градієнт в футеровці по висоті печі і по товщині футеровки, але при цьому різко зростають температури по товщині футеровки. Відзначено, що зміна температур на зовнішній стінці футеровки не впливає на зміну температурного градієнта по її товщині при незмінних питомих теплових навантаженнях.