

А.А.Сохацкий, А.Л.Чайка, А.Г.Шевелев

## ТЕПЛОВАЯ РАБОТА ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Целью работы является анализ и определение закономерностей протекания процессов тепломассообмена в периферийной зоне и их влияние на профиль, тепловую работу доменной печи. С помощью тепло–газодинамической модели установлено влияние параметров работы системы охлаждения, состояния футеровки, распределения и температурного потенциала газового потока на толщину теплового пограничного слоя и причину образования настыва в местах инверсии температурного поля. Установлены закономерности и дана количественная оценка влияния тепловой работы периферийной зоны на технико–экономические показатели доменной плавки.

**доменная печь, периферийная зона, тепломассообмен, закономерности, технико–экономические показатели**

**Современное состояние вопроса.** Работа периферийной зоны доменной печи во многом определяет длительность кампании и безопасность эксплуатации домны. В этой зоне, кроме противоточного теплообмена между газом и шихтой, осуществляется теплообмен с многослойной системой ограждения печи вследствие наличия интенсивного стока теплоты, обусловленного охлаждением печи. Это приводит к отличительному характеру распределения тепловых полей в периферийной зоне, в отличие от других зон, и влияет на технико–экономические показатели доменной плавки.

О пристеночном эффекте при охлаждении в температурных и концентрационных полях в своих публикациях отмечали зарубежные и отечественные исследователи [1–7]. Так, наличие рантового слоя упоминается в работах И.Д.Семикина и В.И.Кармазина при анализе газогенераторного процесса [1, 2]. Результаты замеров температуры газа Г.А.Кудиновым показали, что влияние системы охлаждения распространяется вглубь печи на 200–300 мм, что позднее (до 400 мм) подтверждено расчетами Г.А.Кудинова и А.С.Кукаркина [3, 4]. По результатам экспериментальных исследований Кинни система охлаждения оказывает влияние на поле температур в периферийной зоне на глубину 100–150 мм [5], японских исследователей до ~700 мм [6], отечественных исследователей на доменной печи Череповецкого металлургического комбината до ~400 мм [7].

Несмотря на небольшую толщину влияния работы системы охлаждения (100–700 мм) по сравнению с радиусом печи, площадь и объем этой зоны, по отношению к площади поперечного сечения печи и объема, занимает существенную величину, что в конечном итоге отражается на длительности кампании печи и ее технико–экономических показателях. Поэтому вопросы, связанные с разработкой аналитических методов исследо-

вания периферийной зоны доменной печи, являются актуальными.

**Методика исследования.** Процессы теплообмена и газодинамики в шахте печи описываются с использованием модернизированной теплогазодинамической модели [8–9]. Моделируемая система ограждения печи в общем случае состоит из однородных слоев, имеющих определенные теплофизические свойства и размеры, и рассматривается как многослойная стенка (рис.1).

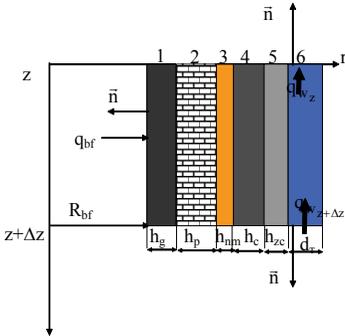


Рис.1. Схематический элемент системы ограждения печи. Цифрами обозначены следующие элементы системы ограждения: 1 – гарнисаж, 2 – футеровка, 3 – набивная масса, 4 – тело холодильника, 5 – трубка змеевика холодильника, 6 – вода.  $R_{bf}$  – внутренний радиус печи

При составлении уравнения баланса теплоты, поступающей от внутреннего пространства печи к охлаждающей жидкости (воде) холодильника, рассматривается элементарный участок пояса горизонтальных холодильников системы охлаждения печи высотой  $\Delta z$ , определяемый количеством узлов расчетной сетки (рис.1). Теплофизические и геометрические особенности элементов системы ограждения печи (холодильник – футеровка – гарнисаж) на каждом участке учитывались с использованием коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи от стенок холодильника к охлаждающей воде и толщинами элементов ограждения.

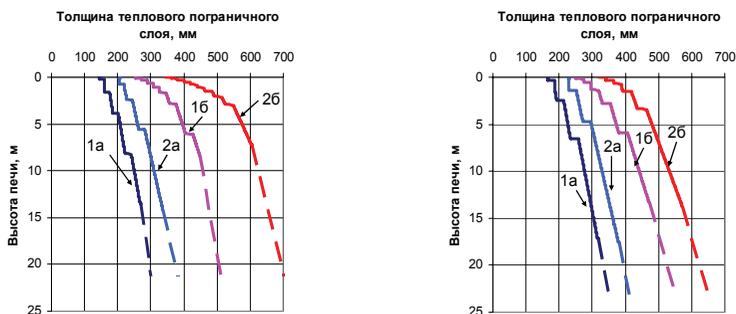
Используемый термин периферийная зона в доменном производстве не имеет четких геометрических границ. В классической физике существует понятие теплового пограничного слоя, который был введен Г.Н.Кружилиным [10, 11] и широко используется при рассмотрении процессов теплообмена. Под тепловым пограничным слоем понимают [10] слой жидкости или газа у стенки, в пределах которого температура изменяется от значения, равного температуре стенки, до значения, равного температуре жидкости или газа вдали от тела. Однако, при вынужденном охлаждении толщина теплового пограничного слоя больше, нежели при конвекции в гидроаэродинамике. Размеры и геометрия теплового пограничного слоя формируются под взаимным воздействием конструктивных особенностей ограждения печи, работы системы охлаждения и параметров газового потока и шихты.

Толщины гидродинамического и теплового пограничного слоя в общем виде могут быть определены через комплекс безразмерных критериев [12]:  $\delta_T/L = O(1/\sqrt{Pe})$ , где  $Pe = u \cdot L/a$  – число Пекле, критерий подо-

бия температурных полей в массе движущейся среды (отношение скорости течения к скорости распространения теплового потока);  $\delta_T$  – толщина теплового пограничного слоя;  $L$  – характерный линейный размер;  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности;  $u$  – скорость газа.

### Изложение основных материалов исследований

С использованием численных методов моделирования теплогазодинамических процессов в шахте печи и полученных с их помощью результатов установлено, что система охлаждения оказывает влияние на теплообмен в пристеночной зоне на переменную глубину порядка 200–700 мм (рис.2). Для печей объемом 2000 и 5000 м<sup>3</sup> ОАО «АМКР», в среднем, по высоте это составляет 4–12% и 3–10% от радиуса печи или 7–23% и 5–15%, соответственно, от площади поперечного сечения печи [13].



доменная печь №6 АМКР,  $V=2000 \text{ м}^3$

доменная печь №9 АМКР,  $V=5000 \text{ м}^3$

Рис.2. Изменение толщины теплового пограничного слоя по высоте печи (сплошная линия – расчет, штриховая – прогноз). Цифрами и буквами обозначено: 1 и 2 – остаточная толщина футеровки 100% и 10% соответственно, а – при неравномерном газораспределении; б – при центральном газораспределении

Изменение средней скорости и температуры в гидродинамическом и тепловом пограничном слое и их толщины при базовом расходе горнового газа (100%) и отклонении на  $\pm 10\%$  для фактического газораспределения при 25% остаточной толщине футеровки для доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> показано на рис.3.

С использованием методов математического моделирования установлено, что определяющее влияние на размеры периферийной зоны шахты оказывают толщина футеровки, наличие гарнисажа, и теплогазодинамический режим работы печи (рис.4) [13]. Температура и расход воды в системе охлаждения оказывают незначительное влияние на изменение толщины теплового пограничного слоя в шахте печи. Причиной значительного изменения толщины теплового пограничного слоя шахты при уменьшении остаточной толщины футеровки, по сравнению с температурой воды и ее расходом, при прочих равных условиях, является более сильное изменение средней температуры шихты на стенке (рис. 4).

Уменьшение остаточной толщины футеровки на каждые 25% приводит к уменьшению средней температуры шихты на стенке печи на ~20%.

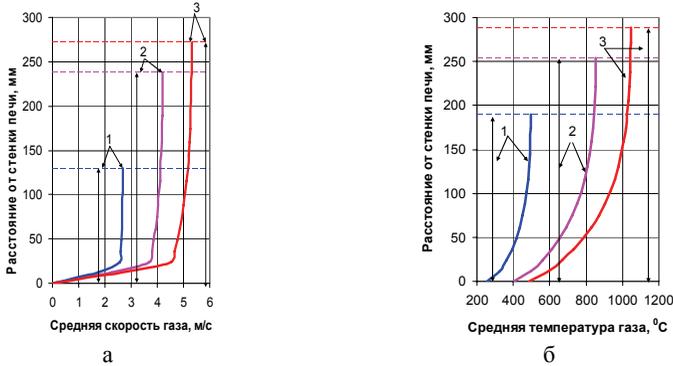


Рис.3. Изменение средней скорости и температуры газа в гидродинамическом (а) и тепловом (б) пограничном слое шихты печи для фактического газораспределения при расходе горнового газа: 1 – 90%; 2 – 100%; 3 – 110%

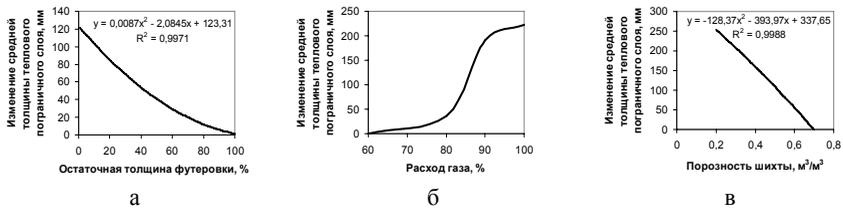


Рис.4. Влияние остаточной толщины футеровки, расхода горнового газа и порозности шихты на изменение средней толщины теплового пограничного газа в шахте

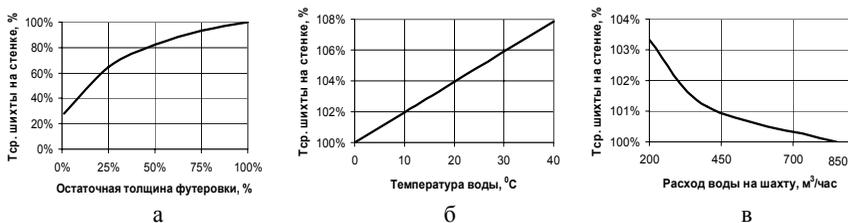


Рис. 5. Влияние остаточной толщины футеровки на среднюю температуру шихты на стенке шахты печи объемом 2000 м<sup>3</sup>

Увеличение порозности на 0,1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и крупности куска шихты (диаметра) на 10 мм уменьшает температуру шихты на стенке на 5–7% и на 2% соответственно (рис.6). Расчетное распределение температуры шихты от уровня засыпи по высоте шахты доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> на различных расстояниях от стенки показано на рисунке 7 [13].

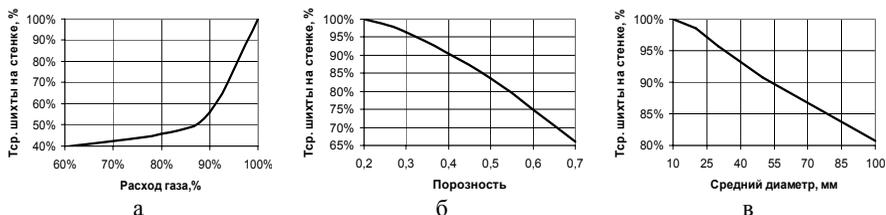


Рис.6. Влияние расхода горнового газа, порозности и среднего куска (диаметра) шихты на среднюю температуру шихты на стенке шахты печи объемом 2000 м<sup>3</sup>

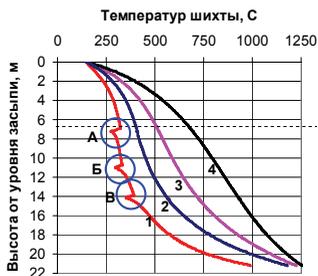


Рис.7. Зависимость изменения температуры шихты в шахте по высоте печи на различных расстояниях от стенки в мм: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – ось печи. Штрихпунктирной линией показан стык охлаждаемой и неохлаждаемой зон могут наблюдаться не только на стыке охлаждаемой и неохлаждаемой части шахты, но и в любой другой зоне, где существуют интенсивные стоки теплоты, например, кружками Б и В кривой 1 (рис.7) обозначены выступы холодильных плит (сапожки). Иллюстрированное на рис.7 распределение температур способствует налипанию на ограждение расплавов, особенно в районе границы охлаждаемой и неохлаждаемой зон.

Без принятия должных мер в зоне инверсии температурного поля образуется настыль, которая была выявлена на доменной печи во время остановки и выдувке до 6 – 7 ряда холодильников шахты (рис.8). Указанная настыль до выдувки была спрогнозирована при исследовании состояния ограждения доменной печи термографическим методом с использованием обработанных данных ручного замера тепловых характеристик кожуха и тепловых потерь в системе охлаждения печи (рис.8–9) [13, 15, 16].

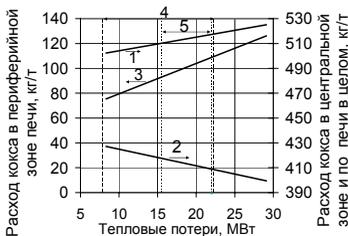
Более светлые области на термограмме (рис.9) соответствуют участкам кожуха доменной печи с низкими температурами. А наиболее низкие температуры от 30 до 40<sup>0</sup>С заштрихованы и показывают вероятную область образования настылей и гарнисажа. Темным цветом отмечены высокие температуры кожуха печи, которые показывают вероятные области максимального износа холодильников и футеровки. Стык охлаждаемой и неохлаждаемой зоны показан горизонтальной штрихпунктирной линией.

Из рис.7 видно, что ниже границы неохлаждаемой и охлаждаемой зон существует инверсия (от лат. *inversio* переворачивание, перестановка, например, возрастание температуры в атмосфере снизу вверх вместо обычного убывания) температурного поля [14], скачкообразное изменение температуры, обозначенное кружком А кривой 1, величина, которой зависит от газораспределения, состояния ограждения, наличия выступов (сапожка) и тепловой работы системы охлаждения. Инверсии температурного поля могут наблюдаться не только на стыке охлаждаемой и неохлаждаемой части шахты, но и в любой другой зоне, где существуют интенсивные стоки теплоты, например, кружками Б и В кривой 1 (рис.7) обозначены выступы холодильных плит (сапожки).

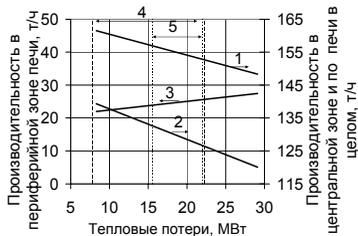
Иллюстрированное на рис.7 распределение температур способствует налипанию на ограждение расплавов, особенно в районе границы охлаждаемой и неохлаждаемой зон.



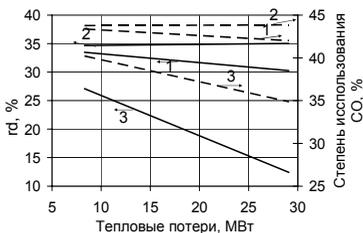
10% ее величины, газораспределение принималось близким к фактическому (рис.12–13), степень использования  $CO$  рассчитывалась по зонам печи теплоэнергетическим методом. Распределение температур шихты и давления газа для распределения порозности представленного на рис.12, получено численным расчетом и показано на рис.13.



а)



б)



в)

Рис. 11. Взаимосвязь расхода кокса (а) производительности (б),  $rd$  и степени использования газа (в) с тепловыми потерями по зонам и печи в целом для печи объемом  $2000 \text{ м}^3$ , Цифрами обозначено: 1 – вся печь, 2 – центральная зона, 3 – периферийная зона, 4 и 5 – практика работы печи характерная для данного объема и в период обследования соответственно

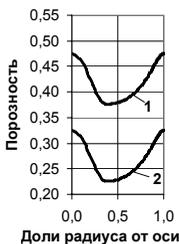


Рис. 12. Распределение порозности по радиусу и по высоте. Цифрами обозначено значения порозности по радиусу: 1 – на колошнике; 2 – в распаре

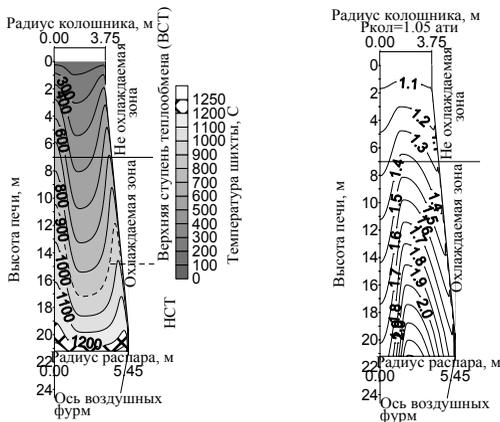


Рис. 13. Распределение температур шихты и давления газа в шахте доменной печи объемом  $2000 \text{ м}^3$

Изменение степени использования  $CO$  по печи в целом и ее зонам определялась как функция удельного расхода условного топлива [17, 18].

С уменьшением остаточной толщины футеровки и роста тепловых потерь размеры периферийной зоны увеличивались (рис.4), что приводило к уменьшению размеров центральной зоны и расхода газа в ней. Общая и усвоенная тепловая мощность в центральной зоне уменьшались, что приводило к снижению производительности и расхода кокса в ней, отнесенного к общей производительности печи (рис. 11). Поведение усвоенной мощности в периферийной зоне зависит от изменения размеров этой зоны, расхода газа в ней, величины тепловых потерь и температуры уходящих газов.

Исследования влияния газораспределения на основные технико-экономические показатели при прочих равных условиях подтверждают преимущество центрального распределения газового потока в сравнении с периферийным за счет снижения тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие. При прочих равных условиях разница в расходе кокса на покрытие тепловых потерь при центральном и периферийном газораспределении составила 3–8 кг/т чугуна.

Изменение тепловых потерь для доменной печи №6 от минимальной величины 8 МВт до максимальной 29 МВт и для печи №9 ОАО «АМКР» от 19 до 61 МВт приводит:

- в периферийной зоне – к увеличению расхода кокса на 67% и 124%, производительности на 25% и 82%, снижению  $rd$  на 14,7% и 2,5%, степени использования газа на 5,4% и 3,0% соответственно;
- в центральной зоне к снижению расхода кокса – на 6% и 10%, производительности на 14% и 16%, к росту  $rd$  на 0,4% и 0,3%, степени использования газа на 0,1% и 0% соответственно;
- по печи в целом к увеличению расхода кокса – на 5% и 4%, снижению производительности на 8% и 7%, снижению  $rd$  на 3,2% и 2,5% и степени использования газа на 1,3% и 1,2% соответственно.

Установлено, что при прочих равных дутьевых, теплогазодинамических и шихтовых условиях определяющее влияние на производительность, расход кокса, степень использования газа и прямого восстановления оказывает работа периферийной зоны – тепловые потери, площадь и объем теплового пограничного слоя.

**Заключение.** С использованием теплогазодинамической модели и теплофизических представлений о тепловом и газодинамическом пограничном слое разработан и реализован метод определения границ периферийной зоны доменной печи.

Установлено, что в зависимости от распределения газового потока и износа ограждения, система охлаждения оказывает влияние на теплообмен в пристеночной зоне на переменную глубину порядка 200–700 мм, что для печей объемом 2000 и 5000 м<sup>3</sup>, в среднем, по высоте составляет 4–12% и 3–10% от радиуса печи и 7–23% и 5–15%, соответственно, от площади поперечного сечения печи.

С помощью теплогазодинамической модели установлено влияние

параметров работы системы охлаждения, состояния футеровки, распределения и температурного потенциала газового потока на инверсию температурного поля, которая является одной из причин искажения профиля печи ввиду образования излишнего гарнисажа.

Рациональное управление тепловой работой периферийной зоны доменной печи позволяет снизить тепловые нагрузки в этой зоне, что является резервом повышения усвоенной тепловой мощности, а, следовательно, роста производительности до 7–8% и снижения удельного расхода до 4–5% по печи в целом применительно к условиям работы печей №6 и №9.

Авторы выражают свою благодарность д.т.н. А. В. Бородулину за научное руководство, постановку задачи и помощь при подготовке материалов статьи.

1. Семикин И.Д. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов / Семикин И.Д, Аверин С.И., Радченко И.И. – М.: Металлургия, 1965. – 391с.
2. Кармазин В. И. Интенсификация работы газогенераторных процессов. // Теория и практика металлургии. – 1937. – №10. – С.20–24.
3. Кудинов Г.А. Анализ работы доменных печей на испарительном охлаждении // Гипросталь. Сб. науч. трудов . Вып. 2. Харьков: Металлургиздат. – 1960. – С.5–26.
4. Кукаркин А.С. Расчет температурных полей в слое шахтной печи при неравномерном газораспределении / А.С.Кукаркин, А.Ф.Мысик, С.Ш.Шейн, Н.А.Катан // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 1975. – №2. – С.150 – 153.
5. Kinney S. P. Движение шихты и газов в доменной печи / S.P.Kinney // Домез. – 1930. – № 5(11). – С. 89–106.
6. Боннекамп Х. Исследование на замороженной азотом доменной печи / Х.Боннекамп, К.Энгель, В.Фикс, К.Гребе // Черные металлы. – 1982. – №2. – С.21–26.
7. Бялый Л.А. Исследование процессов восстановления в шахте доменной печи при работе на комбинированном дутье / Л.А.Бялый, А.П.Котов // Сталь. – 1966. – №12. – С.1075–1081.
8. Моделирование теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи / А.Ф.Авцинов, А. В.Бородулин, В.К. Хрущ и др. // Сталь. – 1996. – №8. – С.4–9.
9. Сохацкий А.А. Математическое моделирование и анализ процессов тепломасобмена и газодинамики в верхней зоне доменной печи с целью обеспечения надежной работы ограждения / А.А.Сохацкий, И.А.Лукьяненко, Г.Т.Цыганков, А.Л.Чайка, А.Г.Шевелев // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. ИЧМ. – 2007. – Вып. 14. – С.50 – 59.
10. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник [для вузов. 4–е изд., перераб. и доп.] / В.П.Исаченко, В.А.Осипова, А.С.Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
11. Кружичин Г.Н. // ЖТФ– 1936. – т. VI. – вып. 5. – С.858 – 865.
12. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – Москва: Наука, 1987. – 840с.
13. Бородулин А.В. Влияние процессов теплообмена в периферийной зоне на работу доменной печи / А.В.Бородулин, А.Л.Чайка, А.А.Сохацкий, А.Г.Шевелев // Международный научный журнал Acta Universitatis Pontica Euxinus. Специальный выпуск. – Днепропетровск, Варна. – 2010. –С.60 – 65.
14. Лехин И.В. Краткий словарь иностранных слов. / И.В.Лехин, Ф.Н.Петров. –

Москва, 1952. – 488 с.

15. *Термографический* метод обследования шахты доменных печей и его приложения: труды XV международной конференции [«Теплотехника и энергетика в металлургии»], (Днепропетровск, 7–9 октября, 2008) / Министерство образования и науки Украины, Национальная металлургическая академия Украины, Академия наук высшей школы Украины, Объединение предприятий «Металлургпром», Ассоциация «Центр внедрений энергосберегающих и инновационных технологий» – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2008. – 300 с.
16. *Чайка* А.Л. Контроль состояния ограждения доменных печей с использованием термограмм // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2008. – №4. – с.109–111.
17. *Домна* в энергетическом измерении / [Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И., Орел Г.И.]. – Кривой Рог: СП «Мир», 2004. – 412 с.
18. *Доменное* производство «Криворожстали». [В.И. Большаков, А.В.Бородулин, Н.А.Гладков и др.] – Кривой Рог: СП «Мир», 2004. – 376 с.

*Статья рекомендована к печати  
докт.тех.наук И.Г.Муравьевой*

***О.А.Собацький, О.Л.Чайка, А.Г.Шевельов***

**Теплова робота периферійної зони доменної печі та її вплив на показники доменної плавки**

Метою роботи є аналіз і визначення закономірностей протікання процесів тепломасообміну в периферійній зоні та їх вплив на профіль, теплову роботу доменної печі. За допомогою тепло–газодинамічної моделі визначено вплив, параметрів роботи системи охолодження, стану футерівки, розподілу і температурного потенціалу газового потоку на товщину теплового примежового шару і причину утворення настилі в місцях інверсії температурного поля. Визначені закономірності і дана кількісна оцінка впливу теплової роботи периферійної зони на техніко–економічні показники доменної плавки.