

## Численное исследование растворения порошкообразного графита при вдувании в ковшовую ванну

В. П. ПИПТЮК<sup>1)</sup>, С. Е. САМОХВАЛОВ<sup>2)</sup>, В. А. ПОЛЯКОВ<sup>1)</sup>, Д. Ю. КАБАКОВ<sup>2)</sup>, С. В. ГРЕКОВ<sup>1)</sup>

Институт чёрной металлургии НАН Украины (ИЧМ НАНУ)<sup>1)</sup>  
Днепродзержинский государственный технический университет (ДГТУ)<sup>2)</sup>

Выполнены численные исследования по усовершенствованной математической модели усвоения расплавом порошкообразного графита при вдувании его в ковшовую ванну на этапе внепечной обработки стали.

Виконані чисельні дослідження по вдосконаленій математичній моделі засвоєння розплавом порошкоподібного графіту при вдуванні його в ковшову ванну на етапі позапічної обробки сталі.

Numeral researches are executed on the advanced mathematical model of fixation by melt of powdery graphite at injection of him in ladle bath on the period of out-of-furnace treatment of steel.

**Состояние проблемы.** Ранее [1] разработанная двумерная математическая модель, описывающая процесс вдувания порошкообразного графита в струе аргона в ковшовую ванну через погружную фурму и проведенные с её помощью численные исследования не могли быть использованы в современных условиях проведения внепечной обработки стали. В последнее время, в связи с применением новых и усовершенствованием ранее используемых процессов внепечной обработки, изменились условия и режимы продувки расплава в ковше: от использования почти симметричного вдувания порошкообразных материалов через одну погружную фурму перешли к использованию, наряду с погружной фурмой для вдувания материалов, ещё и донных фурм для продувки ванны, расположенных, как правило, асимметрично. Поэтому возникла необходимость усовершенствования математической модели для трёхмерного представления указанных процессов.

**Цель работы.** Усовершенствование ранее разработанной математической модели для трёхмерного представления процесса растворения порошкообразного графита при вдувании его в струе аргона в ковшовую ванну.

**Описание математической модели.** Ниже представлено описание проведенного усовершенствования. Рассмотрим математическую модель теплофизических процессов в ковше при вдувании порошкообразного графита через погружную фурму, которая учитывает эффективную сжимаемость среды, взаимное движение взаимодействующих фаз и их превращение: расплава, инертного газа, который вдувается, твёрдой мелкодисперсной фазы (порошка), а также жидкой дисперсной фазы продуктов его растворения [2].

Объёмные плотности расплава, газовой, твёрдой дисперсной фазы (порошка), жидкой дисперсной фазы - результатов растворения порошка обозначаются как  $\gamma, \alpha, \beta, \eta$ , а величины, что к ним относятся - индексами  $1, a, b, l$  соответственно. Однако, для всех примесных фаз, кроме газовой, будут использоваться по большей части массовые плотности  $\beta'$  и  $\eta'$ , принятые в металлургии и имеющие здесь более значимое научное физическое содержание.

Модель базируется на таких предположениях:

- 1) вдоль стенок ковша и фурмы среда проскальзывается свободно;
- 2) гидродинамическими эффектами присутствия всех дисперсных фаз, кроме фазы  $\alpha$  инертного газа, пренебрегаем;
- 3) фазовыми превращениями газовой фазы  $\alpha$  пренебрегаем;
- 4) часть порошка, которая увлекается газовой фазой, пропорциональна объёмной плотности газовой фазы  $\alpha$ ;
- 5) коллективной составляющей скорости фаз  $\eta_l$  относительно расплава пренебрегаем;
- 6) теплота, которая тратится на прогрев инертного газа, незначительна и ею пренебрегаем;
- 7) время прогрева частиц порошка до температуры фазового превращения незначительно и им пренебрегаем.

Если первое предположение является более-менее стандартным, то остальные требуют некоторого разъяснения. Второе предположение обосновывается тем, что объёмные расходы порошка, а следовательно, и объёмные части всех дисперсных фаз, которые из него образуются, намного меньше расходов и объёмных частей фазы  $\alpha$  - аргона. Это обуславливается требованием надёжного пневмотранспортирования порошка по фурме [3, 4]. Более того, ввиду намного большей плотности (любого) порошка по отношению к плотности газа (аргона) архимедова сила, которая действует на него, меньше архимедовой силы, которая действует на газовые пузыри, что и делает второе предположение достаточно обоснованным для разных объёмов ванны. Исключением являются зоны формирования барботажного режима, где дают о себе знать импульсные свойства потока порошка. Третье предположение предопределяется инертностью аргона и пренебрежением частью газов, растворённых в расплаве, или газов образующихся из расплава в процессе продувки и попадающих в пузыри аргона. Четвёртое предположение является чисто феноменологическим предположением, с помощью которого вводится эмпирический параметр  $k$ , содержание которого объясняется дальше в тексте. Пятое предположение возникает из самого определения и способа образования фаз  $\eta_l$ , шестое - из вакуумного при-

ближения, которое нами используется при описании газожидкостных сред [5], а последнее - седьмое - из мелкодисперсной фракции порошка.

Как было показано в работе [3], влажность порошка, который вдувается (даже незначительная - в пределах одного процента), может заметно отразиться на значении коэффициента газосодержания из-за образования водяного пара, который, как известно, имеет высокую упругость и способен образовываться даже около днища ковша. Из последнего предположения нашей модели можно сделать вывод, что пар образуется в прифурменной зоне в месте ввода порошка и может быть эффективно учтён соответствующим увеличением в расчётах расхода вдуваемого газа, что определяется степенью влажности порошка [3]. Тепловой эффект образования водяного пара учитывается эффективным увеличением теплоёмкости порошка, что мы в дальнейшем и будем делать.

Часть порошка, которая увлекается газовой фазой, согласно четвёртому предположению, представлена выражением  $\chi = k\alpha$ , и его коллективная относительная скорость равняется коллективной относительной скорости газовой фазы  $\bar{w}_a^c = \bar{v}_{a1}^c$ . Эмпирический коэффициент  $k$  соответствует части порошка, который увлекается газовой фазой при  $\alpha = 1$  и зависит от фракционного состава порошка (чем порошок мельче, тем  $k$ , очевидно, больше) и характеристик поверхностного взаимодействия, которые трудно определить в системе расплав - материал порошка - газ.

Остальной порошок  $1 - \chi = 1 - k\alpha$ , очевидно, находится в расплаве. Допускаем, что коллективная скорость порошка, который находится в расплаве, относительно расплава постоянная -  $\bar{w}_r = -w_r \bar{g} / g$  и  $w_r$  может быть определена благодаря величине фракции порошка по формуле Стокса [5].

Коллективная скорость твёрдой фазы относительно расплава  $\bar{w}_b^c = \bar{v}_{b1}^c$  задаётся формулой

$$\bar{w}_b^c = \bar{w}_r + k\alpha(\bar{w}_a^c - \bar{w}_r). \quad (1)$$

Как и в [5], воспользуемся линейным (по объёмным плотностям дисперсных фаз) приближением, а также диффузионным приближением (пренебрегая квадратами диффузионных скоростей). В этом случае диффузионной скоростью несущей фазы можно пренебречь  $\bar{w}_1 \rightarrow 0$ , следовательно, диффузионные скорости дисперсных фаз совпадают с соответствующими относительными скоростями:

$$\bar{w}_a = \bar{v}_{a1}, \quad \bar{w}_b = \bar{v}_{b1}, \quad \bar{w}_l = \bar{v}_{l1}. \quad (2)$$

С учётом второго предположения гидродинамика среды, в целом, а также массоперенос газовой фазы, в нашем случае, определяются системой уравнений, которые совпадают с уравнениями для газожидкостной эффективно сжимаемой среды [5]:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\bar{\nabla} \bar{p} + \nu_e \Delta \bar{v} + \zeta'_e \bar{\nabla}(\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) - \alpha \bar{g}, \quad (3)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \psi_a - \alpha \xi \rho_0 \bar{g} \bar{v}_a - \bar{\nabla} \cdot (\alpha \bar{w}_a), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot [\alpha(\bar{v} + \bar{w}_a^c)] = \bar{\nabla} \cdot (D_a \bar{\nabla} \alpha) + \psi_a - \xi \rho_0 \bar{g} \cdot \left[ \alpha(\bar{v} + \bar{w}_a^c) + D_a \bar{\nabla} \alpha \right]. \quad (5)$$

Уравнение переноса примесных фаз запишем для относительных массовых плотностей фаз [5]:

$$\frac{\partial \beta'}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot [\beta'(\bar{v} + \bar{w}_b^c)] = \bar{\nabla} \cdot (D_b \bar{\nabla} \beta') + \psi'_b + \Phi'_{hb}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \eta'_l}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\eta'_l \bar{v}) = \bar{\nabla} \cdot (D_l \bar{\nabla} \eta'_l) + \Phi'_l. \quad (7)$$

Относительный массовый источник твёрдой фазы разбит здесь на две части:  $\Phi'_b = \psi'_b + \Phi'_{hb}$ , первая из которых  $\psi'_b$  используется для задания краевых условий в месте подачи порошка в области формирования барботажного режима около фурмы, а вторая  $\Phi'_{hb}$  связана с фазовым превращением между фазами  $\beta'$  и  $\eta'_l$ .

Тепловая сторона процесса, который рассматривается, описывается уравнением [5]:

$$C_r \frac{dT}{dt} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda'_e \bar{\nabla} T) + \theta, \quad (8)$$

где источник  $\theta$  определяется тепловыми эффектами начального прогрева порошка и фазовых превращений растворения. Эффективные коэффициенты  $C_r$  и  $\lambda'_e$  учитывают присутствие в расплаве дисперсных фаз и могут быть определены формулами из работы [4].

Полученная система уравнений (3) - (8) описывает многофазную эффективно сжимаемую среду. Отметим, что с нашими предположениями уравнения гидродинамики (3) да и массоперенос газовой фазы (5) не зависят от остальных уравнений и могут решаться отдельно. Это позволяет гидродинамическую часть задачи рассматривать отдельно, и использовать найденные таким образом значения  $\bar{v}$  и  $\alpha$  для решения только уравнения массопереноса примесных фаз  $\beta'$  (6) и  $\eta'_l$  (7).

Краевые условия для фаз  $\beta'$  и  $\eta'_l$  такие же, как и для газовой фазы. Краевые условия для температуры на оси симметрии, поверхности фурмы и свободной поверхности (ввиду присутствия шлакового слоя, который допускается) выбираются условиями теплоизоляции, а на внутренней поверхности ковша поток тепла задаётся эмпирическим выражением.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Численное решение приведенных уравнений выполнено в трёхмерной постановке методом расщепления по физическим факторам [5].

Представленное описание усовершенствованной математической модели и соответствующий программный продукт к настоящему моменту позволяют определять только продолжительность усвоения металлом продукта плавания материала добавки в зависимости от расположения фурм в продувочном блоке, глубины погружения (фурма для вдувания порошка) и интенсивности продувки ванны инертным газом.

В качестве исследуемого материала использовали сверхугроуплавкий графит, температура

плавления которого значительно превышает температуру плавления железоуглеродистого расплава. Механизм растворения таких добавок в расплаве различный. Так, для рассматриваемых в настоящих исследованиях углеродосодержащих материалов процесс растворения происходит с образованием раствора внедрения (из-за малого размера атома углерода), для других сверхугроплавок материалов – с образованием раствора замещения.

Фракционный состав порошкообразного графита – до 0,5 мм. Используемые в исследовании физические свойства графита и других углеродосодержащих материалов представлены в табл. 1

В качестве объектов исследования по вдуванию порошкообразного графита рассмотрено следующее оборудование: однопозиционная установка ковш-печь (УКП-1) и установка комплексной доводки металла

(УКДМ), эксплуатируемое в условиях ККЦ ПАО "Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского" с ковшем вместимостью 250 т. Технология вдувания порошкообразных материалов на указанном оборудовании может быть реализована при соответствующей технической доработке. Расположение отверстия для ввода аварийной (погружной – для вдувания порошков) фурмы в крышке УКП представлено в [11], а места ввода погружных фурм на УКДМ – на рис. 1.

Место ввода порошкообразного графита на УКДМ в настоящих исследованиях принимали через погружную фурму ПФ2, а продувку расплава аргоном осуществляли через погружную фурму ПФ1 (на практике она применяется для ввода алюминиевого блока для раскисления металла).

Таблица 1. Свойства и состав углеродосодержащих материалов

№ п/п	Материал	Свойства					Химический состав, %			Фракция порошка, мм
		Температура плавления, °С	Плотность, кг/дм <sup>3</sup>	Теплоем-кость, кДж/кг·°С	Теплота фазового перехода, кДж/кг	Теплопроводность, Вт/м·°С	С	Летучие	Зола	
1	Уголь антрацит	н. д	0,68-1,0 насыпная [6]	при 100°С 1,32-1,49 при 1100-1200 °С 1,307-1,352 [7]	при 100°С 141-149 при 1100-1200°С 157-1503 [7]	при 100 °С 0,44 -1,94 при 1100-1200 °С 0,583-1,215 [7]	91-97 [7]	2-8 [7]	5-7 [7]	<0,4 [1]
2	Кокс	н. д	1,8-1,95 [8]	при 100 °С 0,504-0,856 при 1100-1200 °С 0,290-1,244 [7]	при 100 °С 50-86 при 1100-1200°С 319-1493 [7]	при 100 °С 0,631-1,143 при 1100-1200 °С 0,829-1,096 [7]	85 [7]	2,3 [7]	12 [7]	<0,4 [1]
3	Графит	≈2600[1]	1,4-2,3 [9]	1,2 [1]	1881 [1]	92-522 [9]	88-98 [10]	н. д.	1-9 [10]	<0,4 [1]

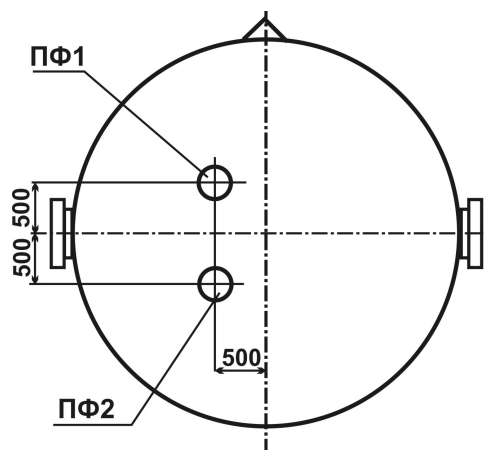


Рис. 1. Расположение мест ввода погружных фурм (ПФ) для вдувания порошковых материалов и продувки ванны на УКДМ

Порцию порошкообразного графита массой 90 кг вводили, начиная со 120 с от начала продувки

ванны аргоном, в течение 90 с в потоке несущего инертного газа при интенсивности продувки 600 л/мин,

800 л/мин и 1000 л/мин. При этом фурма ПФ2 заглублялась на 3,6 м, 3,1 м и 2,6 м. На УКП исследовали три режима продувки:

- первый – продувка через погружную фурму (ПФ) осуществлялась только на период ввода порошкообразного графита и одновременно осуществлялась продувка через донные фурмы (ДФ) в течение всей обработки. Расход аргона на каждую из них - по 100 л/мин, 300 л/мин и 600 л/мин;
- второй – продувка через ПФ осуществлялась одновременно и в течение всей обработки с продувкой через ДФ с аналогичным вышеуказанным расходом инертного газа;
- третий – продувка только через ПФ на протяжении всей обработки.

На УКДМ исследовали два режима продувки:

- первый – продувка в течение всей обработки и ввод порошкообразного графита через одну погружную фурму (ПФ2);

- второй – совместная продувка двумя погружными фурмами (ПФ1 и ПФ2) с одинаковым и аналогичным вышеуказанному расходом аргона.

Все указанные для УКП и УКДМ варианты рассматривались на приведенных выше и одинаковых глубинах погружения фурм.

Режим продувки как на УКП так и на УКДМ с момента её начала до 120 с предусматривал проверку работоспособности пневмотранспортной системы и погружной фурмы для обеспечения необходимого расхода аргона с целью последующей подачи порошкообразного графита, а также достижения и стабилизации стационарного режима массопереноса расплава в наполненной ковшовой ванне.

Эффективность различных вариантов вдувания порошкообразного графита оценивали сопоставлением продолжительности гомогенизации металла по углероду до коэффициента вариации 2%. Этот параметр определяли как разность между моментом установления коэффициента вариации и временем начала ввода графита.

Результаты исследований на УКП и УКДМ представлены на рис. 2.

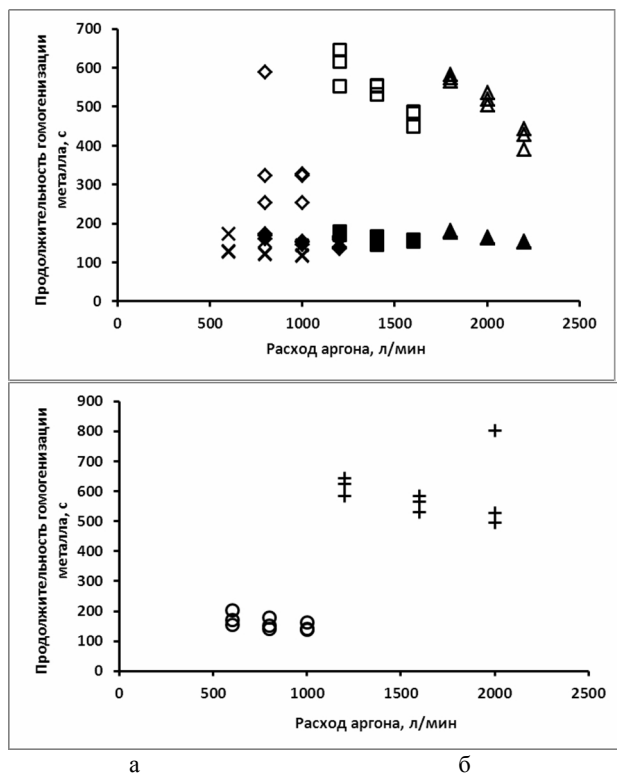


Рис. 2. Продолжительность гомогенизации металла по содержанию углерода на УКП (а) и на УКДМ (б) при разных режимах продувки (цифры в скобках (л/мин)) на различной глубине погружения ПФ:

Для рис. 2а:

первый -

◆ (100+100) ДФ+(600 или 800 или 1000) ПФ;

□ (300+300) ДФ+(600 или 800 или 1000) ПФ;

▲ (600+600) ДФ+(600 или 800 или 1000) ПФ;

второй -



(100+100) ДФ+(600 или 800 или 1000) ПФ;

■ (300+300) ДФ+(600 или 800 или 1000) ПФ;

▲ (600+600) ДФ+(600 или 800 или 1000) ПФ;

третий - ✕ (600 или 800 или 1000) ПФ.

Для рис. 2б:

первый - ○ (600 или 800 или 1000) ПФ2;

второй - + (600 или 800 или 1000) ПФ2+ (600 или 800 или 1000) ПФ1.

Первый режим продувки на УКП (рис. 2а) в исследуемом диапазоне интенсивности подачи аргона обеспечивает продолжительность гомогенизации металла от 158 с (режим продувки по 100 л/мин через каждую из ДФ и 1000 л/мин через ПФ для максимальной глубины (3,6 м) её погружения) до 645 с (режим продувки по 300 л/мин через каждую из ДФ и 600 л/мин через ПФ для минимальной глубины (2,6 м) её погружения). Такую разницу в продолжительности гомогенизации металла по содержанию углерода, вероятно, можно объяснить разными условиями массо- и теплопереноса в ванне на этапе только донной продувки и этапе с одновременной продувкой сверху и снизу во время вдувания порошкообразного графита. Уменьшение глубины погружения ПФ при расходах аргона через ДФ 100 л/мин приводит к сокращению продолжительности гомогенизации при расходах аргона через ДФ 600 л/мин, как правило, - к её увеличению, а при 300 л/мин - имеет различную продолжительность.

Второй режим продувки на УКП, вероятно, обеспечивает стационарность гидродинамики после ввода последней порции порошкообразного графита. Поэтому разброс значений по продолжительности гомогенизации менее значителен и находится в пределах от 136 с (режим продувки по 100 л/мин через каждую из ДФ и 1000 л/мин через ПФ для минимальной глубины (2,6 м) её погружения) до 182 с (режим продувки по 600 л/мин через каждую из ДФ и 600 л/мин через ПФ для такой же глубины её погружения).

Продолжительность гомогенизации при использовании третьего режима продувки колеблется от 118 с (продувка через ПФ с расходом 1000 л/мин при глубине погружения 3,1 м) до 174 с (продувка через ПФ с расходом 600 л/мин при глубине погружения 3,6 м).

При продувке на УКДМ (рис. 2б) определено, что однофурменная продувка является более эффективной по сравнению с двухфурменной. По видимому, это обусловлено теми же обстоятельствами, что и на УКП, т.е. отличающимися условиями массо- и теплопереноса в ванне в зависимости от режимов продувки.

Установленное отличие продолжительности гомогенизации металла при использовании разных вариантов обработки на УКП и УКДМ требует дополнительного исследования и объяснения.

Работа по изучению условий растворения сверхтугоплавких порошкообразных добавок разного состава в ковшовых ваннах различной вместимости будет продолжена в следующих направлениях:

- исследование влияния изменения интенсивности ввода различных сверхтугоплавких материалов;

- исследование влияния изменения интенсивности продувки аргоном в более широком диапазоне его расходов;
- исследование влияния изменения фракционного состава вводимого порошкообразного материала;
- определение потерь порошкообразного материала, уносимого всплывающими на поверхность ванны пузырьками газа;
- определение тепловых потерь при вдувании порошкообразных материалов;
- определение рационального места ввода порошкообразной добавки и режима продувки.

### Выводы

1. Усовершенствована математическая модель процессов вдувания сверхтугоплавких порошкообразных материалов, их растворения и усвоения расплавом в полной трёхмерной постановке и разработан программный продукт её реализации.

2. Численными исследованиями определена продолжительность усвоения расплавом продуктов растворения порошкообразного графита в зависимости от интенсивности продувки, количества продувочных фурм, глубины погружения фурмы для вдувания материала и режима продувки.

3. Установлено, что наиболее эффективным из рассмотренных вариантов с точки зрения энергосбережения является вариант вдувания порошкообразного графита на УКП одной погружной фурмой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Огурцов А. П. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатofазних середовищах / Огурцов А. П., Самохвалов С. Є. — К : Наукова думка, 2001. — 410 с.

2. Вихлевщук В. А. Теплофизические процессы и распределение добавок в ковше при вдувании порошков через погружаемую фурму / Вихлевщук В. А., Самохвалов С. Е., Толстых Ю. М. // Математическое моделирование. — Днепродзержинск : ДДТУ, 1994.

3. Вихлевщук В. А. Развитие научных основ, разработка и внедрение ресурсосберегающей технологии микролегирования стали массового назначения: Дис. д-ра техн. наук. Вихлевщук Валерий Антонович. — Днепропетровск, 1988. — 458 с.

4. Успенский В. А. Пневматический транспорт. — М. : Metallurgizdat, 1959. — 192 с.

5. Самохвалов С. Є. Теплофизические процессы в многофазных средах: теоретические основы компьютерного моделирования. — Днепродзержинск : ДДТУ. — 1994. — 172 с.

6. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/feht/piankov/diss/index.htm>.

7. Ильченко К. Д. Термофизические свойства промышленных материалов / Ильченко К. Д., Чеченев В. А., Иващенко В. П. и др. — Днепропетровск, Сич, 1999. — 152 с.

8. <http://www.xumuk.ru/bse/1310.html>.

9. [http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article\\_965.html](http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_965.html).

10. Вихлевщук В. А. Ковшевая доводка стали / Вихлевщук В. А., Харахулах В. С., Бродский С. С. — Днепропетровск : Системные технологии, 2000. — 190 с.

11. Конструктивно-компоновочные и технологические параметры для численных исследований гидродинамики расплава при обработке на установке ковш-печь мощностью 35МВА / Пиптюк В. П., Буга И. Д., Самохвалов С. Е. и др. // Сб. научн. тр. «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии». — 2010. — Вып. 22. — С.133—137.