

№6. – URL: www.science-education.ru/100-5211 (дата обращения: 01.09.2013).

5. Макаров, А. В. Метод и алгоритм диагностики уровня усвоения учебного материала на основе учета семантико-логических взаимосвязей контрольных заданий / А. В. Макаров // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2012. – №8. – URL: www.technomag.edu.ru/doc/434633.html (дата обращения: 01.09.2013).

6. Макаров, А. В. Разработка интегративной модели учебно-образовательной информации / А. В. Макаров // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2012. – № 20. – С. 35–43. – URL: http://amisod.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=130:amisod-2012-2-20-makarov&catid=20:amisod-2012-2-20 (дата обращения: 01.09.2013).

УДК 669.046.5

Э. Э. Меркер, Л. Н. Крахт,
Л. Н. Королькова, Е. А. Черменев, В. А. Степанов
Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова
(филиал) «Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ ПРИ ИХ ПОДАЧЕ В ПОДЭЛЕКТРОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 11.63.2014/К

По результатам экспериментальных данных, полученных при электроплавке железорудных металлизированных окатышей в дуговой печи, разработана математическая модель совместного нагрева и плавления окатышей в ванне агрегата. На основе результатов моделирования установлено, что плавление окатышей в подэлектродном пространстве дуговой печи позволяет существенно интенсифицировать процессы электроплавки стали с достижением более высоких энерготехнологических и технико-экономических показателей производства.

Дуговая печь, нагрев и плавление окатышей, электрическая дуга.

According to the results of the experimental data obtained at an electric smelting of DRI pellets in the electric arc furnace, a mathematical model of a joint heating and fusion of pellets in the bath have been developed. On the basis of modelling it is fixed that fusion of pellets in under electrode space of the arc furnace allows to intensify essentially the processes of an electric smelting of steel with the achievement of higher power technological and manufacture indices of production.

Electric arc furnace, heating and fusion of pellets, electric arc.

Введение.

Важная практическая роль процессов нагрева и обезуглероживания сталеплавильной ванны обусловлена необходимостью окислительного рафинирования расплава в условиях непрерывной загрузки в ванну металлизированных окатышей. Загрузка окатышей в ванну по ходу электроплавки ускоряет тепло- и массообмен в системе «метал – шлак – атмосфера печи», интенсифицирует «кипение» ванны и перемешивание металла и шлака, что обеспечивает высокие скорости плавления при существенном снижении расхода электроэнергии и повышении качества металла.

Исследования¹ по данной проблеме проводили на 150-т дуговой сталеплавильной печи ОАО «ОЭМК» с обработкой данных опытных плавок методом математической статистики. В дуговой печи с трансформатором мощностью 105 МВ·А при электроплавке использовали в металлошихте 30–35 % стального

лома и 65–70 % металлизированных окатышей, которые загружали в ванну непрерывно, а также подачу кислорода и топлива на ванну через топливно-кислородные горелки (ТКГ).

Анализ показывает, что скорость плавления металлизированных окатышей по ходу электроплавки определяется содержанием углерода $[C]$, скоростью изменения его концентрации (v_C , % $[C]$ /мин.), температурой металла (T_m , °С) и уровнем его перегрева над ликвидусом расплава ($\Delta T_{л}$, °С), расходом кислорода на продувку металла, количеством тепла, подводимым к ванне ($N_{эл}$, кВт·ч), и теплопоглощением расплава. Установлено, что скорость нагрева металла (v_t , °С/мин.) изменяется в соответствии с уравнением регрессии $v_t = 0,811 - 5,77v_C^0 - 0,013v_{ок} + 0,0019N_{эл}$ ($R = 0,85$), где $v_C^0 = v_{C1} + v_{C2}$ – общая скорость изменения концентрации углерода, % $[C]$ /мин.; v_{C1} – скорость науглероживания металла углеродом окатышей с учетом изменения массы металла в результате непрерывной загрузки окатышей (находили расчетным путем [5], [7]), % $[C]$ /мин.; v_{C2} – скорость обезуглероживания металлической ванны переменной мас-

¹Работа выполнена в рамках государственного задания № 11.63.2014/К.

сы, $\%[C]/\text{мин}$. Общая скорость определялась по данным замеров концентраций углерода проб металла из ДСП по выражению:

$$v_c^o = ([C]_1 - [C]_2) / (\tau_2 - \tau_1),$$

где τ – время. При этом регрессионное уравнение для v_c адекватно, так как значение критерия Фишера близко к табличному, что позволяет использовать его для прогнозирования температурного и технологического режимов электроплавки.

Основная часть.

По данным научных исследований [5], [7] перспективным направлением является электроплавка окатышей в дуговой печи с полыми (трубчатыми) электродами². Технологический режим электроплавки железорудных металлизированных окатышей (ЖМО) при их загрузке через полые электроды в ванну дуговой печи определяется условиями теплогенерации и теплообмена в электрической дуге, совместного протекания процессов нагрева и плавления окатышей в объеме шлако-металлического расплава, находящегося под воздействием высокотемпературной дуги [7].

Из анализа полученных экспериментальных данных [5], [7] по длительности плавления ЖМО в 150 т. дуговой сталеплавильной печи (ДСП) следует, что при подаче ЖМО через каналы полых электродов в зону воздействия электрических дуг на поверхность расплава, время их нагрева и плавления уменьшаются, как за счет их дополнительного подогрева при прохождении через электрическую дугу, так и за счет более высокой температуры расплава в локальной зоне воздействия электрических дуг на поверхность ванны, что является более эффективным по сравнению с другими технологическими вариантами электроплавки стали [4], [5].

Взаимодействие окатышей, как и стального лома, с жидкой металлической ванной представляет собой сложный тепло- и массообменный процесс, являющийся в общем случае нестационарным [4]. В связи с этим представляется необходимым более детальное рассмотрение процессов нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи при различных способах загрузки окатышей в печь.

Исходя из особенностей протекания электроплавки ЖМО в дуговой печи [3], учета механизма плавления окатыша в железоуглеродистом расплаве [4], условий образования гарнисажной корочки на его поверхности в ванне агрегата [2] и интенсификации процессов плавления потока окатышей [3], [5] при их загрузке в зону воздействия электрической дуги на ванну, разработана математическая модель в виде математического описания процессов нагрева и плавления окатыша в системе «дуга – шлак – ме-

талл». Так, плавление окатыша в расплаве и в дуге представляет собой задачу теплопроводности с движущейся границей, составляющей особый класс задач внутреннего теплообмена. Численные методы решения этих, существенно нелинейных, ввиду происходящих фазовых превращений, задач достаточно подробно разработаны, и наиболее часто для этого применяют различные модификации метода конечных разностей [1], [4].

При построении математической модели принесли [2], [7] ряд допущений и ограничений:

- металлизированный окатыш имеет сферическую форму и является однородным и изотропным;
- при плавлении окатыша в дуге плотность расплава равна плотности окатыша;
- при взаимодействии ЖМО с расплавом теплота не выделяется и не поглощается, жидкий расплав не проникает в поры, а теплофизические свойства окатыша характеризуются средними показателями, постоянными во всей расчетной области;
- теплота распространяется за счет теплопроводности, влияние вынужденной и свободной конвекции не учитываем;
- фазовые превращения происходят при определенных температурах;
- температура окружающего окатыш расплава постоянна.

Плавление окатыша в шлаке

Рассмотрим постановку внутренней задачи теплообмена для случая подачи окатыша в ванну ДСП в межэлектродное пространство [3]. Исходя из того, что температура плавления шлака больше температуры плавления окатыша [6], процесс плавления окатыша можно разделить на несколько периодов:

1. Тепловой период, в течение которого на холодном окатыше возникает слой гарнисажа, его толщина сначала растет, а затем по мере прогрева окатыша, уменьшается вплоть до нуля.
2. Нагрев окатыша до достижения его поверхностью температуры плавления окатыша.
3. Плавление окатыша.

Постановка задачи для 1-го (теплового) периода.

Особенность математического описания нагрева тела в данном случае заключается в том, что искомое температурное поле удовлетворяет одномерному уравнению теплопроводности в сферических координатах:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad 0 < r < r_{\text{пов}}(\tau), \quad (1)$$

в области с движущейся границей $0 < r < r_{\text{пов}}(\tau)$, где $r_{\text{пов}}(\tau)$ – функция радиуса твердой поверхности окатыша с учетом корочки, описывающая движение границы раздела, заранее неизвестна, и сама подлежит определению в результате решения задачи, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); c – удельная теплоемкость элементарного слоя, Дж/(кг·°C); ρ – плотность элементарного слоя, кг/м³. В области $0 \leq r \leq r_{\text{ок}}$ используются теплофизические

²Меркер Э. Э., Карпенко Г. А., Черменев Е. А. Устройство и способ загрузки металлизированных окатышей в дуговую печь. Патенты РФ № 2487306 С1 и № 2487172 С1; опубл. 10.07.2013. Бюл. №19.

характеристики окатыша, а в области $r_{ок} < r \leq r_{пов}(\tau)$ соответственно гарнисажа.

В качестве начальных условий задаем распределение температуры по сечению окатыша и исходное значение его радиуса. Так как в начальный момент времени тело является равномерно прогретым:

$$T(r, 0) = T_0, \quad 0 \leq r \leq r_{ок}, \quad r_{пов}(0) = r_{ок}, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура окатыша, °С; $r_{ок}$ – начальный радиус окатыша, м.

Граничное условие при $r = 0$ является следствием симметрии температурного поля:

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

Первое граничное условие на движущейся межфазной поверхности (при $r = r_{пов}(\tau)$) условие определяется тем, что фазовые превращения происходят при определенных температурах:

$$T(r_{пов}(\tau), 0) = T_{пл}, \quad (4)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления шлака, °С.

Второе условие на движущейся межфазной поверхности (при $r = r_{пов}(\tau)$) является уравнением теплового баланса на границе раздела гарнисаж–расплав:

$$-\lambda \frac{\partial T(r_{пов}(\tau), \tau)}{\partial r} + q_0 \pm \rho L \frac{\partial r_{пов}}{\partial \tau} = 0, \quad (5)$$

где L – удельная теплота плавления шлака (знак (+) при кристаллизации слоя, (-) при плавлении), Дж/кг; $q_0 = \alpha (T_{расп} - T_{пл})$ – тепловой поток конвективной теплоотдачи от расплава к поверхности окатыша; α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С); $T_{расп}$ – температура расплава, °С.

Постановка задачи для 2-го периода (нагрева).

Искомое температурное поле в данном случае удовлетворяет уравнению (1) в области $0 < r < r_{ок}$.

Начальными условиями являются распределение температуры по сечению окатыша в конце 1-го периода.

Граничное условие при $r = 0$, аналогично предыдущему периоду (3).

Граничное условие на поверхности (при $r = r_{ок}$) является уравнением теплового баланса на границе раздела окатыш – расплав и имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial T(r_{ок}, \tau)}{\partial r} = \alpha (T_{расп} - T(r_{ок}, \tau)). \quad (6)$$

Постановка задачи для 3-го периода (плавление).

Единственное отличие от 1-го периода в том, что начальное распределение температуры по сечению окатыша берется в конце 2-го периода. В остальном

математическое описание аналогично 1-му периоду и описывается той же системой.

Плавление окатыша в подэлектродном пространстве

Рассмотрим постановку внутренней задачи теплообмена для случая подачи окатыша в ванну ДСП через полый электрод [6], [7]. Исходя из того, что окатыш при подаче в ванну первоначально подвергается интенсивному излучению горячей электрической дуги, проходя подэлектродное пространство в непосредственной близости от нее, а температура плавления металла больше температуры плавления окатыша, процесс плавления окатыша можно разделить на несколько периодов:

1. Нагрев окатыша до достижения его поверхностью температуры плавления окатыша в результате воздействия излучения от дуги, во время его падения.

2. Плавление окатыша в подэлектродном пространстве во время его падения в дуге. При этом расплав окатыша, накапливаясь на поверхности твердого остатка, передает тепло теплопроводностью от поверхности, подвергающейся излучению дуги, и сам нагревается выше температуры плавления окатыша.

3. Плавление окатыша в жидком металле (с образованием корочки металла) подэлектродного пространства.

Постановка задачи для 1-го (нагрева) периода.

Учитывая рассмотренные ранее выражения, математическое описание нагрева тела в данном случае также удовлетворяет уравнению (1) в области $0 < r < r_{ок}$, с начальными условиями (2), граничными условиями: при $r = 0$ аналогично уравнению (3).

Граничное условие на поверхности (при $r = r_{ок}$) является уравнением теплового баланса на поверхности окатыша и имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial T(r_{ок}, \tau)}{\partial r} = q_{изл}, \quad (7)$$

где $q_{изл}$ – тепловой поток излучением от дуги на поверхность окатыша, Вт.

Постановка задачи для 2-го периода (плавление в дуге).

Так как в результате плавления образующийся расплав остается на поверхности и по принятому допущению имеет ту же плотность, то искомое температурное поле в данном случае удовлетворяет уравнению (1), но в области $0 < r < r_{пов}(\tau)$ для окатыша и $r_{пов}(\tau) < r < r_{ок}$ для расплава. То есть имеем 2 границы: движущуюся между остатком окатыша и его расплавом и постоянную на поверхности расплава воспринимающую излучение дуги.

Начальными условиями являются распределение температуры по сечению окатыша в конце 1-го периода и $r_{пов}(0) = r_{ок}$.

Граничное условие при $r = 0$ аналогично предыдущему периоду (3).

Граничное условие на границе раздела окатыш–расплав ($r = r_{пов}(\tau)$) определяется условием Стефана:

$$\lambda \frac{\partial T(r_{\text{пов-}}(\tau), \tau)}{\partial r} = \lambda \frac{\partial T(r_{\text{пов+}}(\tau), \tau)}{\partial r} + \rho L \frac{\partial r_{\text{пов}}}{\partial \tau}. \quad (8)$$

Граничное условие на поверхности (при $r = r_{\text{ок}}$) аналогично условию (7).

Для 3-го периода (плавление в металле) математическое описание аналогично описанию 3-го периода в математической модели плавления окатыша вне электрической дуги в ванне ДСП, изложенной выше.

Для решения таких задач используется сетка с переменным числом узлов. Принимали, что за один шаг по времени граница перемещается на один шаг по координате. То есть при переходе к очередному моменту времени число шагов по координате n_k изменяется на единицу:

- при кристаллизации $n_{k+1} = n_k + 1$;
- при плавлении $n_{k+1} = n_k - 1$.

При таком подходе шаг по времени становится неизвестным, и его также необходимо рассчитывать. Поэтому для решения таких задач использовали неявные разностные схемы, как безусловно устойчивые. Для моделирования плавления окатыша использовали неявную 4-х точечную разностную схему как менее громоздкую в сравнении с 6-ти точечной [1].

При построении разностной схемы использовали метод баланса. Исходили непосредственно из законов сохранения энергии и переноса тепла, примененных к дискретному температурному полю.

Так как зависимость искомых значений температур от ее значений в предыдущий момент времени определяется разностными уравнениями неявным образом, то для расчета температурного поля необходимо их совместное решение. Получившиеся из разностных схем системы линейных алгебраических уравнений наиболее эффективно решаются методом прогонки [1]. Из системы неявных разностных уравнений сначала итерационным методом при прямой прогонке определяем заранее неизвестный шаг по времени и соответствующие ему прогоночные коэффициенты, а затем, зная из граничных условий температуру на поверхности, обратной прогонкой определяем искомое распределение температуры, и переходим к расчету аналогичным образом следующего шага по времени, с новым числом шагов по координате. При расчете плавления в дуге сначала рассчитываем распределение температуры в образующемся расплаве, затем шаг по времени и распределение температуры по окатышу. Расчет завершается при уменьшении числа шагов по координате до нуля.

Адекватность модели проверяли путем сравнения результатов расчета с опытными данными [2], полученными при погружении оловянных образцов в перегретый расплав олова. Разница не превышает 6 %, что свидетельствует об адекватности предложенной модели [6], [7].

Результаты расчета приведены на рис. 1–3. Из анализа данных рис. 1 следует, что время плавления

ЖМО при подаче через трубчатые электроды на расплав под дугой в 4–5 раз меньше, чем при плавлении их в шлаке, т. е. вне электродов и влияния электрической дуги [7]. К тому же при этом разница уменьшается с увеличением значения коэффициента теплоотдачи [3], [5]. При подаче окатыша в шлак на нем образуется корочка [2] толщиной до 25 % от радиуса окатыша, а сам тепловой период (существования корочки) достигает 35 % от времени плавления окатыша [6]. При подаче в расплав под электродом толщина корочки более, чем в 3 раза меньше, и при этом продолжительность теплового периода не превышает 20 %, а при высоких значениях коэффициента теплоотдачи (рис. 2) корочка не образуется, и тепловой период отсутствует (окатыш плавится).

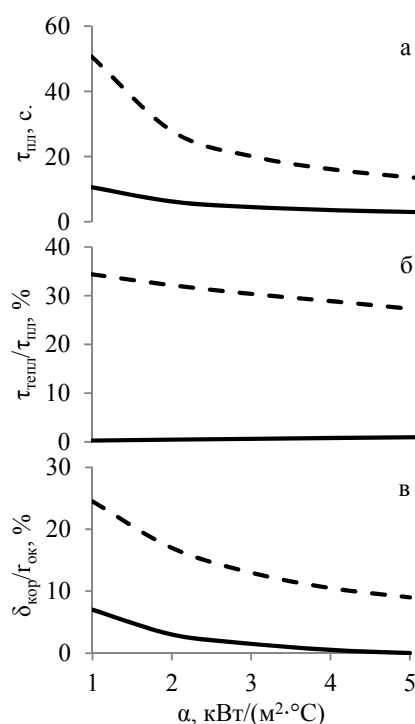


Рис. 1. Изменение времени плавления окатыша (а), доли теплового периода (б) и относительной толщины намерзающей корочки (в) в зависимости от коэффициента теплоотдачи при разных способах подачи ЖМО в ванну ДСП (— на расплав под дугой; - - - в шлак)

На рис. 2 приведены данные расчета по изменению текущего размера окатыша при его плавлении в зависимости от уровня теплоотдачи в шлаке (а) и в подэлектродной области печи [5].

При этом температурные условия состояния окатыша (рис. 3) можно проанализировать в динамике по ходу нагрева и плавления. Из этих данных результатов моделирования (рис. 3) следует, что при плавлении окатыша в объеме шлака, к концу теплового периода (17,72 с.) окатыш успевает прогреться, в то время как при подаче ЖМО в подэлектродное пространство по сечению окатыша наблюдается существенный градиент температур.

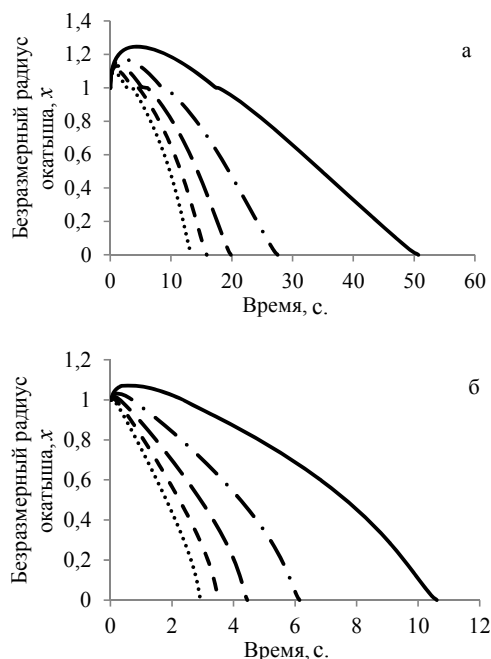


Рис. 2. Изменение безразмерного радиуса окатыша во времени при подаче окатыша в шлак (а) и в подэлектродное пространство (б) при различных коэффициентах конвективной теплоотдачи (— — — — — 1; — — — — — 2; — — — — — 3; — — — — — 4; — 5 кВт/(м²·К)).

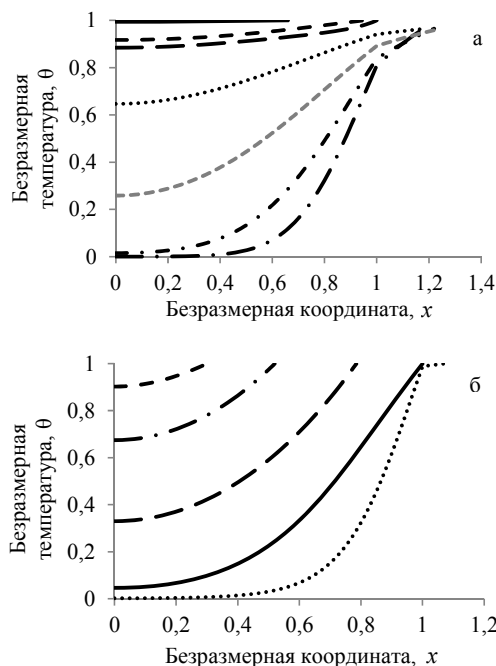


Рис. 3. Распределение температур по сечению окатыша ($\alpha = 1 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$) при подаче окатыша в шлак (а) и в подэлектродное пространство (б) в различные моменты времени плавления (для а — — — — — 1 с.; — — — — — 2 с.; — — — — — 5 с.; — 10 с.; — — — — — 17,7 с.; — — — — — 20 с.; — — — — — 30 с.; для б — 0,85 с.; — — — — — 2,4 с.; — — — — — 5 с.; — — — — — 7,5 с.; — — — — — 9 с.)

Выводы.

В работе создана математическая модель нагрева и плавления железорудных окатышей в дуговой печи, адекватность которой была проверена сравнением с данными экспериментов. С ее помощью исследовали процессы нагрева и плавления железорудных окатышей при различных способах их загрузки в ванну дуговой печи.

Результаты моделирования подтвердили эффективность подачи окатышей на расплав под дугой. Так время плавления при этом в 4–5 раз меньше, чем при плавлении их в шлаке. В первом случае толщина корочки на окатыше в 3 раза меньше, а продолжительность теплового периода не превышает 20 %. При высоких значениях коэффициента теплоотдачи корочка не образуется и тепловой период отсутствует. При подаче ЖМО в шлак образуется корочка толщиной до 25 % от радиуса окатыша, а сам тепловой период может достигать 35 % от времени плавления окатыша.

Температурные условия окатыша проанализировали в процессе нагрева и плавления. Установили, что при плавлении окатыша в шлаке к концу теплового периода окатыш успевает прогреться, в то время как при подаче в подэлектродное пространство по его сечению присутствует градиент температур.

Литература

1. Арутюнов, В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупеников. – М., 1990.
2. Гришин, А. А. Исследование процесса образования гарнисажной корочки на поверхности окатыша при его погружении в расплав / А. А. Гришин, Э. Э. Меркер, А. И. Кочетов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2006. – №1. – С. 69–70.
3. Меркер, Э. Э. Особенности технологии электроплавки металлизированных окатышей в ванне дуговой печи / Э. Э. Меркер, А. В. Сазонов, А. А. Гришин // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2008. – №2. – С. 31–33.
4. Нугуманов, Р. Ф. Изучение механизма взаимодействия стального лома с железоуглеродистым расплавом в диффузионном и тепловом режимах / [Р. Ф. Нугуманов и др.] // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2009. – №8. – С. 13–16.
5. Сазонов, А. В. Интенсификация плавления окатышей при их загрузке в зону воздействия электрической дуги на шлакометаллический расплав / А. В. Сазонов, Э. Э. Меркер, Е. А. Черменев // Бюллетень «Черная металлургия». – 2011. – №8. – С. 62–64.
6. Черменев, Е. А. Роль окисленности и обезуглероживания металла при плавлении окатышей в дуговой печи / Е. А. Черменев, Э. Э. Меркер // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2011. – №9. – С. 8–10.
7. Черменев, Е. А. Моделирование передачи тепла, нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи / Е. А. Черменев, Э. Э. Меркер, Д. А. Харламов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2013. – №5. – С. 67–68.