

УДК 669.184.244.66:669.184.28.004.12

**В.П.Пиптюк, А.Ф.Петров, А.Ф.Хамхотько, С.Н.Павлов, С.В.Греков,
В.А.Кондрашкин**

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАФИНИРОВОЧНЫХ ШЛАКОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПЕРЕДЕЛА

Целью работы является уточнение аналитических зависимостей, описывающих основные свойства многокомпонентных шлаковых систем, для оценки свойств реальных шлаков сталеплавильного передела. Рассмотрено модельное описание структуры рафинировочных шлаковых расплавов. Приведены уравнения связи экспериментальных значений вязкости, плотности и поверхностного натяжения шлаков с их модельными параметрами и сопоставлены соответствующие расчетные и экспериментальные данные. Подтверждена перспективность использования физико-химической методологии для оценки свойств реальных шлаков сталеплавильного передела.

физико-химическая методология, свойства многокомпонентных шлаковых систем, аналитические зависимости, шлаки сталеплавильного передела

Состояние вопроса. Анализ используемого, в большинстве случаев, технологического регламента производства стали разного назначения и способов выплавки свидетельствует о получении в плавильном агрегате полупродукта. При этом производство стали в соответствии с нормативными требованиями обеспечивается на этапе внепечной обработки. Процессы рафинирования и доводки металлического расплава в сталеразливочном ковше предусматривают взаимодействие металла со шлаком. Формирование последнего может осуществляться на выпуске плавки и в процессе обработки на установке ковш-печь (УКП) или установке доводки металла (УДМ). Поэтому знание и использование основных свойств шлаков в оценочных прогнозах эффективности тех или иных процессов внепечной обработки является важным и необходимым условием.

Несмотря на накопленный к настоящему времени экспериментальный материал о свойствах шлаковых расплавов и большое число различных гипотез о форме и физико-химической сущности связи между составом и свойствами веществ этого класса, общей теории, способной хотя бы качественно объяснить и обобщить всю совокупность известных фактов, не существует. Прикладные задачи в области определения основных физико-химических свойств шлаков и оценки их рафинирующей способности решаются, как правило, эмпирическим путем – прямым экспериментом или на основе обработки фактического материала статистическими методами.

Однако, регрессионным уравнениям типа η , σ , $D = f(\text{состав шлака})$, где η – вязкость, σ – поверхностное натяжение, D – плотность, независимо от уровня точности аппроксимации опытных данных, свойственен

принципиальный недостаток – парциальный вклад каждого компонента постулируется как постоянная величина, не зависящая от концентрации остальных составляющих системы. Попытки устранить этот недостаток за счет повышения степени полинома приводят к утрате соответствующими моделями устойчивости. Поэтому сохраняет свое значение поиск нетрадиционных подходов и методов решения задач такого типа.

В статьях [1, 2] показаны возможности физико-химической методологии в прогнозировании основных свойств двух- и многокомпонентных рафинировочных шлаковых систем. В них рассмотрены, главным образом, шлаки теоретического или ограниченного по числу компонентов составов в широком диапазоне концентрации компонентов.

Научный и практический интерес представляет знание физико-химических и др. свойств рафинировочных шлаков разных этапов сталеплавильного передела реальных многокомпонентных составов, данные о которых весьма ограничены, а имеющиеся, даже в пределах одной и той же характеристики, неравнозначны и, поэтому, требуют дополнительного изучения.

Цель работы. Уточнение аналитических зависимостей определения отдельных параметров, характеризующих основные свойства реальных многокомпонентных шлаковых систем, полученных ранее с помощью разработанной в ИЧМ НАНУ физико-химической оценочной методологии, рассматривающей зависимость свойств шлаков от их состава.

Изложение методики и результатов работы. В теории оксидных систем поиск новых подходов и методов решения проблем указанной направленности связан, прежде всего, с попытками расчета по составу кристаллических, связанных со структурой соответствующих расплавов.

Модельное описание структуры оксидных расплавов, с позиций теории направленной химической связи, для вычисления характеристик межъядерного взаимодействия использует уравнения системы неполяризованных ионных радиусов [3–5]. Для прогнозирования свойств оксидных расплавов в результате решения комплекса уравнений вычисляется и используется ряд среднестатистических параметров, характеризующих оксидную композицию как химически единое целое:

- 1) Δe – химический эквивалент, равный среднестатистическому числу электронов, локализуемых на связующих орбиталях в направлении связи катион – анион;
- 2) ρ – показатель стехиометрии системы, равный отношению чисел катионов к анионам;
- 3) d – среднестатистическое межъядерное расстояние катион-анион;
- 4) $\text{tg}\alpha$ – среднестатистический параметр, характеризующий индивидуальность катионной подрешетки.

5) m – молекулярный вес рассчитанный по формуле Me_pO_r , где p показывает, какое число катионов приходится в данной системе на один анион.

Разработка модели оксидных расплавов, базирующаяся на использовании уравнений стабильности анионной и катионной подрешеток их структуры, позволяет предложить качественно новую основу для теоретического обобщения экспериментальных данных о физико-химических свойствах. Расплав трактуется как химически единая система, влияние состава которой на структуру и свойства определяется соотношением характеристик межатомных связей в непрерывном анионном каркасе. Введение в связь между составом и свойствами промежуточного звена – комплекса модельных параметров – Δe , ρ , d , $tg\alpha$, m – позволяет обобщить опытные данные в форме, пригодной для решения задач прогнозирования. При этом задача исследования связи между составом и свойствами оксидных систем расчленяется на две части:

1) определение интегральных характеристик структуры расплавов, отражающих сочетание и соотношение концентраций компонентов в их составе, и в то же время абстрагированных от конкретного состава;

2) установление связи между этими характеристиками и комплексом физико-химических свойств.

Такой подход позволяет использовать результаты экспериментального изучения конкретных оксидных систем, зачастую относительно простых и состоящих из самых различных компонентов, для прогнозирования свойств оксидных систем любой сложности, независимо от количества компонентов и соотношения их концентраций.

С позиций предложенной модели были проанализированы экспериментальные данные о физико-химических свойствах рафинировочных шлаковых систем сталеплавильного передела: вязкости, поверхностного натяжения и плотности.

Вязкость шлаков. Среди физико-химических свойств наиболее значимое влияние на скорость окисления примесей и переноса их в шлаке оказывает вязкость, т.е. свойство жидкого шлака сопротивляться течению или внутреннему сдвигу. Вязкость оказывает существенное влияние на скорость диффузии компонентов шлака. В условиях, когда шлак неподвижен, скорость диффузии обратно пропорциональна вязкости. Вязкость шлака зависит от его состава и температуры и с увеличением последней уменьшается.

Основу исследованного массива опытных данных составили расплавы системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-CaF_2$, обстоятельно изученные в работах А.А. Акбердина и др. [6]. Диапазон составов рассмотренных шлаков был следующим (массовая доля, %): CaO 29,4 – 49,4; SiO_2 7,47 – 21,0; MgO 7 – 14; Al_2O_3 22,5 – 44,57; CaF_2 10,0 – 25,0. В табл. 1 приведены некоторые из исследованных составов и рассчитанные модельные параметры.

Сопоставление экспериментальных значений вязкости с модельными параметрами показало, что наиболее тесная связь наблюдается между η и ρ . Влияние остальных параметров является переменным, зависящим от температуры испытаний. Если воспользоваться общепринятой формой учета влияния температуры (t) на вязкость с помощью активационного множителя B в уравнении Френкеля (1) или видоизмененным уравнением Ле-Шателье [7], обнаруживается зависимость от ρ как энергии активации (E) вязкого течения, так и коэффициентов a и b в уравнении (2):

$$\eta = B \cdot e^{E/RT} \quad (1)$$

$$\lg \eta = a - b \cdot t \quad (2)$$

Таблица 1. Химический состав и модельные параметры высокоглиноземистых рафинировочных шлаковых расплавов [6]

№	Химический состав, % _{масс.}					Модельные параметры				
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	$d, 10^{-1}$ нм	Δe	$\text{tg} \alpha$	ρ	m
1	37,96	7,47	-	44,57	10,0	2,2	-0,123	0,1493	0,724	48,195
2	31,50	21,00	-	22,50	25,0	2,553	-1,109	0,1398	0,653	50,845
3	34,10	21,00	-	32,40	12,5	2,503	-1,16	0,1409	0,679	49,295
4	40,80	21,00	-	25,70	12,5	2,501	-1,087	0,1404	0,696	50,245
5	33,45	10,50	-	43,55	12,5	2,294	-0,433	0,1475	0,701	49,005
6	30,85	10,50	-	33,65	25,0	2,328	-0,335	0,1468	0,674	51,51
7	49,40	10,60	-	30,00	10,0	2,525	-0,975	0,1396	0,693	51,94
8	39,40	20,60	-	30,00	10,0	2,531	-1,153	0,1381	0,721	51,39
9	39,40	13,60	7	30,00	10,0	2,792	-1,902	0,1436	0,722	49,41
10	29,40	16,60	14	30,00	10,0	2,276	-0,265	0,1467	0,748	50,83

Разброс точек при графической интерпретации зависимости $\lg \eta = f(\rho)$ для экспериментальных данных, полученных в разных условиях, в определенной мере обусловлен особенностями аппаратуры и методик определения вязкости, погрешностями в определении температуры и химического состава шлаков, летучестью компонентов расплава, составом атмосферы и рядом других факторов. В общем же случае колеблемость значений $\lg \eta$ при $\rho = \text{const}$ может быть связана с влиянием на вязкость таких параметров, как Δe , d , $\text{tg} \alpha$. Системный учет этого влияния обеспечивает корреляционно-регрессионный анализ. С его помощью достигается высокая точность обобщения экспериментальных данных. Так, при 1500⁰С уравнение (3) характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0,91$. Аналогичные уравнения получены для вязкости и при других температурах.

$$\lg \eta = 5,3 - 4,17 \cdot d - 1,47 \cdot \Delta e + 26,7 \cdot \text{tg} \alpha - 1,18 \cdot \rho \quad (3)$$

Результаты проведенных исследований показали, что для прогнозирования η рафинировочных шлаковых расплавов сталеплавильного передела, можно рекомендовать следующее уравнение:

$$\lg \eta = 2,35 - 5,2 \cdot d - 1,76 \cdot \Delta e + 28,6 \cdot \text{tg} \alpha + 0,76 \cdot \rho + 5383,4 / T \quad (4)$$

При учете температуры в диапазоне 1400–1600⁰С обеспечивается коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными значениями на уровне 0,93. На рис.1 сопоставлены значения рассчитанных по уравнению (4) и экспериментальных значений вязкости шлаков исследованных в работе [6].

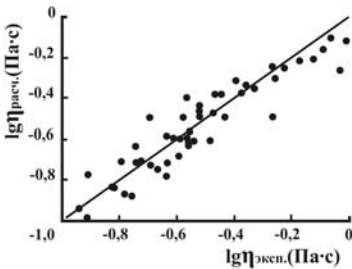


Рис. 1. Зависимость расчетных значений вязкости от экспериментальных

Высокая точность для исследованного диапазона колеблемости состава и η шлаковых расплавов свидетельствует о плодотворности идей, заложенных в разработанную физико-химическую модель их структуры.

Поверхностное натяжение и плотность. Исследование поверхностного натяжения (σ) и плотности (D) дает информацию о силах межчастичного взаимодействия в оксидных расплавах. В практическом плане значения σ и ρ позволяют решать многие во-

просы повышения качества стали на этапах ее выплавки и внепечной обработки. Величиной и изменением поверхностного натяжения шлака обусловлены многие поверхностные явления, вызываемые избытком свободной энергии в пограничном слое: поверхностная энергия, повышенная активность и ориентация молекул поверхностного слоя, особенности его структуры и состава.

Исследованию свойств оксидных и оксифторидных шлаков, к которым относятся рафинировочные, посвящен ряд работ. Нами проанализированы данные о поверхностном натяжении и плотности шлаков при 1600⁰С в следующем диапазоне составов (массовая доля, %): CaO 40,8 – 50,8; SiO₂ 3,0 – 20,0; MgO 3,0 – 10,0; Al₂O₃ 4,6 – 44,1; CaF₂ 6,1 – 15,5, взятых из работы [8].

Сопоставление экспериментальных значений поверхностного натяжения с модельными параметрами свидетельствует о наиболее тесной связи этого параметра с Δe ($r=0,74$). С увеличением числа электронов, локализованных на направлениях связей катион-анион, что выражается увеличением отрицательных значений Δe , эти связи ослабевают и величина σ уменьшается.

При оценке количественной точности приведенной зависимости необходимо учитывать, что результаты измерений разными авторами σ шлаковых расплавов, близких по составам, хотя качественно подобны, однако в количественном отношении зачастую разнятся. Очевидно, что в таких условиях описание экспериментальных данных для поверхностного натяжения рафинировочных шлаков, часть из которых приведена в табл. 2, уравнением (5) с коэффициентом корреляции равным 0,97 следует признать удовлетворительным:

$$\sigma = 1517,9 + 25,7 \cdot \Delta e - 3961,6 \cdot \text{tg} \alpha + 931,9 \cdot \rho - 23,7 \cdot m \quad (5)$$

Таблица 2. Химический состав и модельные параметры высокоглиноземистых рафинировочных шлаковых расплавов [8]

№	Химический состав, % _{масс.}					Модельные параметры				
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	$d, 10^{-1}, \text{нм}$	Δe	tg α	ρ	m
1.	58,0	20,0	10,0	5,0	7,0	2,749	-1,582	0,1464	0,793	51,18
2.	52,7	18,2	9,1	13,7	6,4	2,702	-1,504	0,1473	0,778	50,36
3.	50,4	17,4	8,7	17,4	6,1	2,682	-1,468	0,1477	0,772	50,02
4.	55,3	19,0	9,5	4,8	11,5	2,749	-1,511	0,1466	0,777	51,51
5.	54,2	18,7	9,3	4,7	13,1	2,75	-1,488	0,1466	0,771	51,62
6.	52,7	18,2	9,1	4,6	15,5	2,751	-1,453	0,1467	0,763	51,79
7.	52,9	3,0	-	44,1	-	2,011	-0,461	0,152	0,794	49,634
8.	46,3	15,0	-	38,7	-	2,348	-0,737	0,145	0,745	49,006
9.	49,6	6,0	3,0	41,4	-	2,27	-0,356	0,152	0,787	49,103
10.	40,8	15,0	10,0	34,2	-	2,663	-1,57	0,151	0,764	47,785

Такая точность дает основание полагать, что характер влияния изменения химического состава на поверхностное натяжение во всем интервале его эмпирических значений отражен правильно и, используя уравнение (5), можно теоретически оценить влияние любых добавок на величину рассматриваемого параметра.

Большое значение для более глубокого понимания физико-химических свойств шлаковых расплавов имеют данные об изменении плотности шлаков в зависимости от их химического состава при высоких температурах. Установлено, что плотность шлаков в данном диапазоне составов может быть описана уравнением (6) с коэффициентом корреляции равным 0,85:

$$D = 2,45 + 0,023 \cdot \Delta e - 5,0 \cdot \text{tg} \alpha + 1,36 \cdot \rho \quad (6)$$

На рис. 2 и 3 показана взаимосвязь расчетных и экспериментальных данных поверхностного натяжения и плотности рафинировочных шлаков исследованных в работе [8] для температуры 1600⁰С.

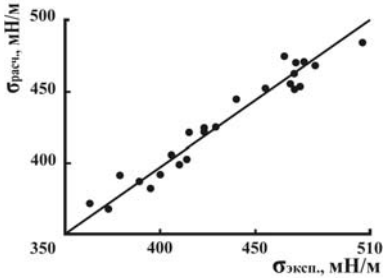


Рис. 2. Зависимость расчетных значений поверхностного натяжения от экспериментальных

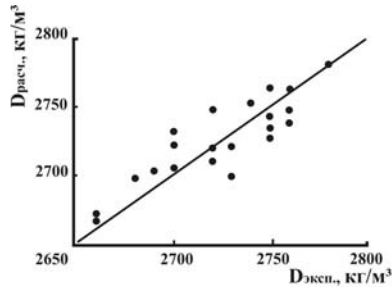


Рис. 3. Зависимость расчетных значений плотности от экспериментальных

В условиях конвертерного производства, даже при использовании современных способов и оборудования для отсечки шлака, в ковш попадает от 2 до 10 кг/т конвертерного шлака [9,10]. В связи с этим наблюдаются значительные колебания в химическом составе шлака перед обработкой на УКП или УДМ, формирующегося за счет присаживаемых ТШС и части конвертерного шлака. Ввод ТШС на выпуске плавки осуществляется при наполнении ковша расплавом от 20-30% до 50-60% его объема. Ввод шлакообразующих материалов на УКП или УДМ производится в процессе продувки металла инертным газом. В обоих случаях перемешивание способствует интенсификации формирования рафинировочного шлака. В качестве исходных данных для определения свойств рафинировочных шлаков использовали содержания его компонентов в пробах, отобранных на разных этапах производства стали в условиях ККЦ ОАО «МК «Азовсталь». Пробы отбирали после усреднительной продувки – перед обработкой стали на УКП (до УКП) и перед подачей плавки на разливку – после обработки стали на УКП (после УКП). Анализ обобщенных по химическому составу шлака данных (табл.3) показывает, что во время обработки стали на УКП, независимо от группы марок стали, за счет ввода соответствующих добавок увеличивается содержание CaO и Al_2O_3 . Раскисление шлака ведет к снижению содержания оксидов марганца и железа. Так как на УКП в составе шлакообразующих материалов плавиковый шпат практически не используется, то за счет ввода других компонентов ТШС при дополнительном формировании шлака происходит снижение содержания CaF_2 . Последнему также способствует высокая летучесть фтора. Закономерность в изменении содержания SiO_2 и MgO не обнаружена.

В соответствии с методологией физико-химического прогнозирования свойств шлаков для каждой пробы шлака были рассчитаны модельные параметры, средние значения которых приведены в табл. 4.

Таблица 3. Усредненный химический состав шлака на разных этапах внепечной обработки стали различных групп сортамента ККЦ ОАО «МК «Азовсталь»^{*)}

Группа стали	Этап внепечной обработки	Химический состав, % _{масс.}								
		CaO	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	FeO	CaS	CaF ₂
Низко-легированная	До УКП	<u>46,63</u> 40,27 – 52,22	<u>15,75</u> 9,38 – 18,56	<u>6,56</u> 4,17 – 8,25	<u>1,74</u> 0,21 – 4,19	<u>19,42</u> 16,50 – 28,15	<u>0,12</u> 0,10 – 0,20	<u>2,31</u> 0,52 – 6,19	<u>1,10</u> 0,46 – 3,05	<u>6,37</u> 3,15 – 12,84
	После УКП	<u>47,42</u> 35,80 – 51,96	<u>15,96</u> 10,38 – 18,54	<u>7,45</u> 6,16 – 8,24	<u>0,34</u> 0,10 – 0,61	<u>21,56</u> 18,54 – 29,97	<u>0,10</u> 0,10 – 0,12	<u>0,86</u> 0,51 – 1,54	<u>1,49</u> 0,69 – 2,33	<u>4,81</u> 2,09 – 11,83
Низко-кремнистая	До УКП	<u>42,37</u> 31,81 – 49,96	<u>7,64</u> 4,68 – 11,76	<u>7,78</u> 6,03 – 11,44	<u>3,48</u> 1,04 – 9,08	<u>29,77</u> 22,77 – 40,81	<u>0,14</u> 0,01 – 0,32	<u>4,37</u> 1,50 – 7,42	<u>0,81</u> 0,40 – 1,96	<u>3,65</u> 1,29 – 10,15
	После УКП	<u>45,47</u> 38,85 – 49,97	<u>8,02</u> 4,85 – 10,33	<u>8,86</u> 6,23 – 12,42	<u>1,24</u> 0,21 – 4,50	<u>31,53</u> 25,11 – 38,30	<u>0,07</u> 0,01 – 0,10	<u>1,77</u> 0,51 – 3,66	<u>1,10</u> 0,38 – 1,87	<u>1,95</u> 0,21 – 3,22
Штрипсовая	До УКП	<u>41,07</u> 32,72 – 46,88	<u>9,77</u> 4,14 – 13,76	<u>13,41</u> 5,27 – 20,32	<u>2,41</u> 0,31 – 8,38	<u>27,65</u> 20,91 – 37,30	<u>0,07</u> 0,01 – 0,25	<u>2,27</u> 0,62 – 6,36	<u>0,90</u> 0,30 – 1,41	<u>2,44</u> 0,21 – 5,41
	После УКП	<u>48,11</u> 40,04 – 54,16	<u>9,16</u> 6,13 – 13,42	<u>11,03</u> 6,23 – 18,52	<u>0,28</u> 0,10 – 1,33	<u>27,92</u> 21,59 – 36,60	<u>0,05</u> 0,01 – 0,25	<u>1,38</u> 0,63 – 7,17	<u>0,86</u> 0,32 – 1,81	<u>1,20</u> 0,21 – 3,19
Углеродистая	До УКП	<u>39,71</u> 29,68 – 48,86	<u>12,25</u> 6,15 – 17,89	<u>13,39</u> 8,84 – 23,82	<u>2,12</u> 0,11 – 4,30	<u>26,94</u> 15,34 – 35,50	<u>0,06</u> 0,01 – 0,14	<u>2,52</u> 0,84 – 4,55	<u>1,04</u> 0,38 – 2,56	<u>1,98</u> 0,21 – 3,53
	После УКП	<u>43,08</u> 39,87 – 49,10	<u>10,93</u> 4,66 – 15,20	<u>11,66</u> 8,87 – 14,79	<u>0,31</u> 0,10 – 0,42	<u>29,62</u> 21,86 – 35,74	<u>0,02</u> 0,01 – 0,05	<u>1,15</u> 0,72 – 2,53	<u>1,38</u> 0,91 – 2,04	<u>1,84</u> 0,43 – 3,0

^{*)} В числителе – среднее значение, в знаменателе – крайние.

С помощью полученных выше уравнений и модельных параметров рассчитаны вязкость, плотность и поверхностное натяжение рафинировочных шлаков внепечной обработки. Усредненные результаты расчета указанных характеристик при температуре 1600⁰С приведены в табл.5. Определено, что вязкость и поверхностное натяжение за время обработки на УКП возрастают, а плотность практически не изменяется. Такие результаты согласуются с данными приведенными в табл. 3.

Таблица 4. Средние значения модельных параметров рафиниро-вочных шлаков ККЦ ОАО «МК «Азовсталь»

Группа стали	Этап внепечной обработки стали	Модельные параметры				
		$d, 10^{-1}$ нм	Δe	tga	ρ	m
Низколегированная	До УКП	2,767	-1,666	0,145	0,770	50,87
	После УКП	2,708	-1,535	0,147	0,771	50,09
Низкокремнистая	До УКП	2,829	-1,755	0,149	0,797	50,50
	После УКП	2,708	-1,466	0,152	0,799	49,52
Штрипсовая	До УКП	2,883	-1,921	0,153	0,801	49,18
	После УКП	2,710	-1,475	0,153	0,810	49,30
Углеродистая	До УКП	2,884	-1,987	0,151	0,792	48,99
	После УКП	2,760	-1,650	0,153	0,792	48,80

Таблица 5. Средние расчетные значения вязкости, плотности и поверхностного натяжения рафинировочных шлаков, сформированных на выпуске плавки и на УКП ККЦ ОАО «МК «Азовсталь»

Группа стали	Этап внепечной обработки стали	Вязкость, Па·с	Плотность, кг/м ³	Поверхностное натяжение, мН/м
Низколегированная	До УКП	0,101	2730	412
	После УКП	0,139	2730	427
Низкокремнистая	До УКП	0,095	2750	428
	После УКП	0,153	2740	448
Штрипсовая	До УКП	0,129	2730	445
	После УКП	0,169	2750	459
Углеродистая	До УКП	0,141	2720	444
	После УКП	0,174	2720	451

Выводы. Проведенные расчетно-теоретические исследования показали, что сочетание модельных параметров достаточно всесторонне характеризует химическую индивидуальность многокомпонентных оксидных расплавов и позволяет определить численные значения их основных физико-химических свойств: вязкости, поверхностного натяжения, плотности. Установлена возможность использования модели как для расчета

комплекса свойств шлаковых расплавов, так и для управления рафинировочными процессами сталеплавильного передела.

1. *Прогнозирование* свойств рафинировочных шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$ / А.Ф.Хамхотько, Э.В.Приходько, Д.Н.Тогобицкая и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2004. – Вып. 9. – С.168–175.*
2. *Комплексная физико-химическая оценка свойств компонентов ТШС и синтетических рафинирующих шлаков* / Э.В.Приходько, В.П.Пиптюк, А.Ф.Хамхотько и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.: Сб.научн.тр.ИЧМ. –2007.–Вып.15.– С.179–189.*
3. *Приходько Э.В.* Система неполяризованных ионных радиусов и ее использование для анализа электронного строения и свойств веществ. – К.: Наук. думка, 1973. – 64 с.
4. *Приходько Э.В.* К вопросу об оценке достоверности опытных данных о физико-химических свойствах веществ // *Журн. физической химии. – 1976.– Т.50, №10. – С.2526–2530.*
5. *Приходько Э.В.* Моделирование структуры при исследовании связи между составом и свойствами оксидных расплавов // *Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1980. – Т.16, №5. – С.900–906.*
6. *Физические свойства расплавов системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$:* Справ изд. / А.А.Акбердин, И.С.Куликов, В.А.Ким и др. – М.: Металлургия, 1987. – 144 с.
7. *Приходько Э.В.* Металлохимия многокомпонентных систем. – М.: Металлургия, 1995. – 320 с.
8. *Еднерал Ф.П., Смоляренко В.Д., Якушев А.М.* Исследования свойств шлаков, предназначенных для обработки металла в ковше // *Производство стали и стального литья: Тр. Московского вечернего металлургического института. – М. – 1967. – Вып. 5. – С.152 – 184.*
9. *Ровнушкин В.А., Ильин В.И., Фетисов А.А.* Кинетические закономерности окислительно-восстановительных реакций при обработке стали синтетическими шлаками на установке ковш-печь // *Бюллетень НТиЭИ «Черная металлургия». – 2004. – №5. – С.16 – 20.*
10. *Производство* стали на агрегате ковш-печь / Д.А.Дюдкин, С.Ю.Бать, С.Е.Гринберг и др. – Донецк: ООО «Юго-Восток» ЛТД, 2003. – 300с.

*Статья рекомендована к печати:
ответственный редактор
раздела «Сталеплавильное производство»
докт.техн.наук, проф. В.Ф.Поляков*

*В.П.Піптюк, О.Ф.Петров, А.Ф.Хамхотько, С.М.Павлов, С.В.Греков,
В.О.Кондрашкін*

Фізико-хімічні властивості рафінувальних шлаків сталеплавильного переділу

Метою роботи є уточнення аналітичних залежностей, що описують основні властивості багатокомпонентних шлакових систем, для оцінки властивостей реальних шлаків сталеплавильного переділу. Розглянуто модельний опис структури рафінувальних шлакових розплавів. Наведено рівняння зв'язку експериментальних значень в'язкості, густини і поверхневого натягу шлаків з їх модельними параметрами і зіставлені відповідні розрахункові та експериментальні дані. Підтверджено перспективність використання фізико-хімічної методології для оцінки властивостей реальних шлаків сталеплавильного переділу.