

А.Ф.Хамхотько, Д.Н.Тогобицкая, И.В.Грипас

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

Выполнено аналитическое исследование, разработаны критерии и методы оценки влияния углеродсодержащих добавок на свойства доменных шлаков: вязкость, температуры солидус и ликвидус.

### Постановка задачи

Одной из важнейших характеристик доменных шлаков является жидкоподвижность (текучесть) расплавов, определяющая их серопоглогательную способность и интенсивность доменной плавки в целом.

Мерой оценки подвижности шлаковых расплавов является величина их вязкости в жидком состоянии, т.е. при перегреве выше температуры плавления. Вязкость определяется химическим составом шлаков, температурой и гетерогенностью (наличием твердых включений). К таким включениям относятся: частицы пустой породы или извести, не растворившиеся в шлаке, восстановленное металлическое железо, частицы мелкого кокса, сажистый углерод, образующийся в результате термического разложения углеводородов природного газа, и др.

### Результаты исследований

Давно замечено, что вязкость шлаков может быть существенно увеличена мелкими фракциями кокса при его низкой прочности. Так, в работе [1] была исследована вязкость доменных шлаков НЛМЗ основностью  $\text{CaO/SiO}_2=1,14-1,16$ , содержащих (масс.%):  $\text{Al}_2\text{O}_3-7,4-8,1$ ,  $\text{MgO}-6,8-7,3$ ;  $\text{MnO}-0,3-0,4$ , и завода им. Ильича –  $\text{CaO/SiO}_2=1,10-1,15$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3-6,2$ ;  $\text{MgO}-8,0-9,3$ ;  $\text{MnO}-0,9-1,0$  с добавками 4,35% и 8,7% коксовой мелочи, содержащей 25,1% фракции более 1,6мм., 34,4% – фракции 0,6 – 1,6мм и 40,5% фракции менее 0,6мм. Установлено, что такие добавки коксовой мелочи повышали вязкость доменных шлаков в 2–3 раза в температурном диапазоне 1350–1550<sup>0</sup>С и увеличивали температуру кристаллизации шлаков. В результате сделан вывод о том, что применение кокса с низкой механической прочностью приводит к увеличению вязкости доменных шлаков и является одной из причин неровного хода печи, повышения сопротивления проходу газов через столб шихтовых материалов в печи, загромождения горна, и, как следствие, снижения производительности печи, повышения расхода кокса и увеличения числа сгоревших шлаковых и воздушных фурм. Аналогичные результаты получены и в работе [2] при исследовании влияния сажистого углерода, образующегося при разложении природного газа.

Следует отметить, что авторы работы [1] столкнулись с трудностями при определении вязкости шлаков с добавками коксовой мелочи на тор-

сионном вискозиметре. В частности, было замечено, что при температурах, близких к температурам затвердевания шлаков, крупные кусочки кокса, всплывая на поверхность шлаков, нередко образуют слой материала, прилипающего к шпинделю. Поэтому шлак приходилось часто перемешивать для ликвидации этого слоя, а иногда и повторять опыт. Тем не менее различие влияния количества коксовой мелочи на вязкость разных шлаков интерпретировано не убедительно.

Более глубоко эта проблема изучена в работе [3]. Было установлено, что магнезиально–глиноземистые шлаки состава (масс.%): CaO –30,3–35,6; SiO<sub>2</sub> –35,7–36,7; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –14,2–15,5; MgO –11,8–15,0; FeO –0,48–0,6; C – 0,05 – 0,06; CaO/SiO<sub>2</sub> – 0,85 – 0,97, при температурах 1350 – 1550<sup>0</sup>C практически не способны удерживать коксовую мелочь и графит крупностью до 1 мм, которые введены в количестве 10% от массы шлака. Так, после нагрева в атмосфере печи Таммана до указанных температур в течение 10–15 мин. смесей шлака с углеродсодержащими добавками, виброперемешивания в течение 10 мин. и выдержки 10 мин., установлено, что содержание графита, т.е. его растворимость в шлаках в зависимости от основности и температуры составляет от 0.08 до 0.19%, а основное количество графита всплывает на поверхность шлака.

Низкая растворимость углерода в доменных шлаках подтверждается также исследованиями А.Г.Пономаренко и Ю.Е.Козлова [4], которые показали, что если в шлаке состава (масс.%): CaO=59,08; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=40,82; SiO<sub>2</sub>=0,1 при 1600<sup>0</sup>C в восстановительных условиях растворяется 1,3% углерода, то в шлаке состава (масс.%): CaO=33,32; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=38,68; SiO<sub>2</sub>=28,0, который по соотношению CaO/SiO<sub>2</sub> аналогичен доменному, в тех же условиях растворяется лишь 0,04% углерода.

Инертность углерода по отношению к шлаковым расплавам известна давно. Именно по этой причине в технике высокотемпературных исследований свойств металлургических шлаков (вязкости, электропроводности, плавкости и др.), ранее применялся графит для изготовления тиглей, датчиков, подставок и др., который затем был заменен платиной (в окислительной атмосфере) и молибденом (в инертной атмосфере).

В реальных условиях содержание углерода в шлаке колеблется в широких пределах и в отдельных случаях, в частности, при загромождениях горна, достигает 10–13%, что объясняется авторами работы [3] образованием механической смеси шлака с графитом. Поэтому в работе [3] исследована вязкость натуральных магнезиально–глиноземистых шлаков с добавкой 10% коксовой мелочи и графитовой спели. Установлено, что графичность повышает их кажущуюся вязкость во всем диапазоне текучести, причем это влияние на кислых шлаках сказывается сильнее, чем на основных. При этом уместно заметить, что вязкость шлаков определяли на вибровискозиметре, и, по мнению авторов, вибрация датчика способствовала перемешиванию шлака и углеродистой добавки. Это позволило предотвратить в определенной степени всплытие добавки и опреде-

лить ее влияние на кажущуюся вязкость шлака во всем диапазоне текучести.

Для объективной количественной характеристики влияния различных добавок на свойства шлаковых расплавов (вязкость,  $T_{\text{солидус}}$ ,  $T_{\text{ликвидус}}$  и др.) нами предложено использовать градиент – критерий, показывающий относительное изменение величины свойства в процентах на каждый процент добавки. Так для вязкости:

$$\Delta\eta = \frac{(\eta_{\text{доб}} - \eta_0) \times 100}{\eta_0 \times D_{\text{доб}}}, \quad (1)$$

где  $\eta_0$  – вязкость чистого шлака, Па\*с;  $\eta_{\text{доб}}$  – вязкость шлака с добавкой, Па\*с;  $D_{\text{доб}}$  – количество добавки в% к массе шлака;  $\Delta\eta$  – градиент вязкости, %/% добавки.

Аналогично определяются градиенты  $\Delta T_c$  и  $\Delta T_l$ .

С учетом разработанного в ИЧМ подхода к трактовке структуры оксидных систем [5] полученные в работе [3] экспериментальные данные о влиянии углеродсодержащих добавок на вязкость магнезиально–глиноземистых шлаков представлены в виде зависимости:

$$\Delta\eta = 70.4 - 64.92 \times \rho - 15.42 \times \frac{T}{1000}, \quad R = 0.95 \quad (2)$$

где  $\Delta\eta$  – градиент вязкости, %/% добавки;  $\rho$  – стехиометрия шлака, равная отношению числа катионов к числу анионов;  $T$  – температура, °С;  $R$  – коэффициент корреляции.

Уравнение (2) позволяет по составу шлака и температуре в пределах изученных рассчитать градиент вязкости, а затем с учетом количества углеродсодержащей добавки рассчитать вязкость гетерогенного шлака  $\eta_{\text{доб}}$  по уравнению (3), которое получается преобразованием уравнения (1):

$$\eta_{\text{доб}} = \eta_0 \times \left( 1 + \frac{\Delta\eta \times D_{\text{доб}}}{100} \right), \text{ Па*с.} \quad (3)$$

Для изучения влияния количества твердой фазы на вязкость шлака состава (масс.%): СаО – 45; SiO<sub>2</sub> – 34; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 12; MgO – 9 авторы работы [6] использовали тощий уголь Краснобродского месторождения фракции 0.1–0.2мм в количестве от 1 до 13% (по массе). Содержание по данным [7] в угле составляет (масс.%): углерода – 65.7; золы – 16,2; летучих – 13; влаги – 10. Исследования вязкости шлаков проводили в инертной среде в молибденовых тиглях при помощи ротационного вискозиметра марки ЭВИ–72м при температурах 1500, 1550, 1650 и 1720°С.

Для каждой из этих температур получены уравнения парабол, описывающие зависимость вязкости шлака от процентного содержания угля, по которым могут быть вычислены градиенты вязкости. Так, при температуре 1500°С градиент вязкости шлака, содержащего 13% угля, составляет

29,3%/оугля, а при нагреве до 1720<sup>0</sup>С величина градиента снижается до  $\Delta\eta=23,2\%/о$  угля.

В работе [8] исследована вязкость гетерогенного шлака состава (масс.%): CaO – 41,4; SiO<sub>2</sub> – 38,1; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 9,6; MgO – 9,7; MnO – 0,61; Fe<sub>общ</sub> – 0,45, основность CaO/SiO<sub>2</sub>=1,09, с добавками 2% по массе анжерского тощего угля фракций: до 0.063; 0,8–1,6; 4–7мм.

Вязкость шлаков измеряли на торсионном вискозиметре. Навеску шлака и угля массой 180г. тщательно перемешивали, нагревали в графитовом тигле до 1500<sup>0</sup>С, производили выдержку 20 мин. и замеры вязкости при охлаждении со скоростью 2<sup>0</sup>С/мин.

Представленные в работе кривые зависимости вязкости от температуры  $\eta=f(T)$  не в полной мере соответствуют описанию их авторами. Тем не менее, очевидно, что при введении топлива любой фракции повышается вязкость шлака во всем диапазоне температур, а также увеличивается температура кристаллизации исходного шлака с 1270<sup>0</sup>С до 1300<sup>0</sup>С независимо от размера фракции, т.е. около 15<sup>0</sup>С на каждый процент гетерогенной добавки ( $\Delta T_c \approx 1.2\%/о$  добавки).

Установлено, что наиболее существенно вязкость шлака повышает добавка угля самой тонкой фракции 0,063мм. Численно это влияние может быть оценено в области температур 1500–1350<sup>0</sup>С величиной градиента вязкости около  $\Delta\eta \approx 200\%/о$  угля.

В процессе накопления опыта использования пылеугольного топлива было установлено ухудшение свойств шлака из-за примешивания неостывших частиц пыли. Это приводит к ухудшению дренажа жидких продуктов плавки в горне доменной печи. В связи с этим в работе [9] были проведены систематические исследования свойств синтетических шлаков системы CaO – SiO<sub>2</sub> – MgO – 5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1%MnO – 1%FeO – 0,5%K<sub>2</sub>O – 2%S с добавками угольной пыли крупностью до 0,1мм из тощих углей Чумаковской ЦОФ следующего технического анализа (%):  $C^p=78$ ,  $V^p=11$ ,  $A^p=8.6$ ,  $S^p=1.9$ ,  $W=0.7$ .

В качестве базовых были приняты 26 составов шлаков, изученных ранее [10], в которые вводили 0,5 и 5% пылеугольного топлива, тщательно перемешивали и дополнительно гомогенизировали. Определение вязкости и плавкости (температуры при вязкости 2 Па\*с) проводили в индукционной печи в графитовых тиглях с использованием торсионного вискозиметра после гомогенизации при 1500–1560<sup>0</sup>С в течение 25–30 мин.

Совместный анализ свойств синтетических шлаков по данным [9] и [10] показал, что добавка пылеугольного топлива повышает их вязкость с градиентом в среднем  $\Delta\eta=70\%/о$  и плавкость –  $\Delta T_c=2.5\%/о$ .

Аналогичные результаты получены на натуральных доменных шлаках различной основности CaO/SiO<sub>2</sub> – 1,2; 1,27; 1,34 Донецкого металлургического завода и комбината им. Ильича (CaO/SiO<sub>2</sub> – 1,21; 1,25; 1,28). При этом установлено, следующее:

– влияние пылеугольного топлива на вязкость шлака, нагретого выше температуры плавления на 100–200<sup>0</sup>С до гомогенного состояния существенно меньше ( $\Delta\eta \approx 20\%/%$ ), чем в области температуры кристаллизации, когда градиент достигает 200%/ и более;

– влияние первых порций углеродсодержащей добавки (0,5%) на свойства шлаков проявляется сильнее, чем последующих (до 5%). Особенно это заметно на плавкости, градиент которой при добавке 0,5% составляет  $\approx 5\%/%$ , а при 5% снижается до  $\approx 1\%/%$ . Эти данные подтверждают результаты работы [6] о количественном влиянии углеродсодержащих добавок на свойства шлаков.

Зависимость градиентов вязкости  $\Delta\eta$  и плавкости  $\Delta T_{\text{п}}$  от количества добавки угольной пыли ( $D_{\text{доб}}, \%$ ), температуры ( $T, ^\circ\text{C}$  – для вязкости) и химического состава шлака, «свернутого» в виде коэффициента стехиометрии ( $\rho$ ), обобщается уравнениями:

$$\Delta\eta = 998.6 - 10.38 * D_{\text{доб}} - 0.807 * T + 463.39 * \rho, \quad R = 0.6 \quad (4)$$

$$\Delta T_{\text{п}} = -6.26 - 0.71 * D_{\text{доб}} + 15.27 * \rho, \quad R = 0.8 \quad (5)$$

Наиболее полные и обстоятельные исследования влияния углеродсодержащих добавок на свойства реальных доменных шлаков выполнены в работах [11, 12]. Изучены шлаки меткомбината им. Ильича состава (масс.%): CaO– 45,09–48,7; SiO<sub>2</sub>– 36–39,9; MgO– 4,8–6,25; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– 5,06–6,15; MnO– 0,45–0,9; FeO– 0,5–1,1; K<sub>2</sub>O– 0,52–0,61; S– 1,65–1,9; CaO/SiO<sub>2</sub>– 1,15–1,35 и меткомбината «Азовсталь» состава (масс.%): CaO– 44,37–48,96; SiO<sub>2</sub>– 37–39; MgO– 4–5,09; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– 6,54–7,16; MnO– 0,33–0,96; FeO– 0,43–0,86; S– 1,61–2,02; CaO/SiO<sub>2</sub>– 1,15–1,3.

В качестве углеродсодержащих добавок в количестве 0,5% от массы шлака использовали коксовую пыль различных коксохимических заводов, полученную просеиванием коксовой мелочи через сито 0,1мм, а также угольную пыль, полученную из тощих углей Чумаковской ЦОФ, крупностью 0,1мм (50,7% частиц фракции 0,05–0,1мм; 49,3% 0–0,05мм). Кроме этого использовали сажу, полученную сжиганием природного газа в токе кислорода, и золу состава (масс.%): CaO – 3,34; SiO<sub>2</sub> – 40,2; MgO – 1,8; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 23; Fe – 17,2. Характеристика углеродсодержащих добавок по данным [7; 13] представлена в таблице 1.

Исследовано влияние названных добавок на температурную зависимость вязкости ( $\eta$ ) шлаков, по которой определены также температуры:  $T_{\text{л}}$  – в точке перегиба при  $\eta = 1,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$  и  $T_{\text{с}}$  при вязкости  $5,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , когда шлак практически затвердевает.

Нами по вышеописанной методике с использованием экспериментальных данных [11; 12] рассчитаны градиенты вязкости ( $\Delta\eta$ ) шлаков с добавками в области перегрева над температурой ликвидус на 50–200<sup>0</sup>С, т.е. при 1350–1550<sup>0</sup>С, а также градиенты  $\Delta T_{\text{л}}$  и  $\Delta T_{\text{с}}$ . Результаты представлены в табл.2.

Приведенные в табл.2 средние величины градиентов свидетельствуют о том, что углеродсодержащие добавки повышают вязкость,  $T_l$  и  $T_c$  шлаков и только зола кокса уменьшает эти свойства вследствие ее взаимодействия с жидкими шлаками и некотором снижении их основности, а, следовательно, снижении их вязкости и плавкости. По увеличению силы воздействия на свойства шлаков углеродсодержащие добавки располагаются в ряду: коксы коксохимзаводов Рутченковского → Донецкого → Мариупольского → Авдеевского → Алчевского → Горловского → Ясиновского → угольная пыль → пылеугольное топливо → сажа.

Так, градиенты вязкости и плавкости при добавлении одинакового количества коксовой пыли с размерами частиц до 100мкм Рутченковского КХЗ в 2–3.5 раза меньше, чем Ясиновского КХЗ.

Сравнение состава и свойств коксов различных коксохимзаводов в сопоставлении с их влиянием на повышение вязкости и температур плавления не позволяет выявить связи между склонностью различных коксов загущать шлаки и такими характеристиками коксов, как прочность, содержание в них углерода, летучих компонентов, количества и состава золы. Вероятно, превалирующим фактором является фракционный состав коксовой пыли, которая была получена просеиванием коксовой мелочи через сито с отверстием 0,1мм. Можно предположить, что в результате естественного истирания при транспортировке различных коксов количество мелких пылеватых частиц в пределах фракции до 0,1мм было различным и увеличивалось в вышеназванном ряду. Вследствие этого усиливалось негативное воздействие коксовой пыли на свойства шлака. Подтверждением решающего влияния фракции является увеличение градиентов вязкости и плавкости в 1,3–1,5 раз при введении в шлак угольной пыли по сравнению с пылью кокса Ясиновского КХЗ. В составе же угольной пыли по данным [11, 12] содержится 50% мелких частиц размером до 50 мкм, остальные – размером 50–100мкм.

По рекомендации Андропова В.Н. и Плоткина З.И. для улучшения горения угольной пыли в гоне доменной печи размер ее частиц должен быть менее 35 мкм [13].

Существенно более мелкие частицы (0,02–0,3 мкм) имеет сажа, образующаяся в результате пиролиза при сжигании природного газа [14]. Вследствие этого градиент вязкости шлака при введении сажи вместо пылеугольного топлива увеличивается в 1,4–1,6 раза, а градиент плавкости в 1,2–1,4 раза.

Выполнен корреляционно–регрессионный анализ связи градиентов  $\Delta\eta$ ,  $\Delta T_l$  и  $\Delta T_c$  с химическим составом шлака, свернутым в ивиде модельных параметров структуры:  $\Delta e$  – химического эквивалента состава и  $\rho$  – стехиометрии [5]. Получены уравнения для прогнозирования влияния различных углеродсодержащих добавок на свойства доменных шлаков по их составу. Характеристики уравнений для каждого вида добавок представлены в табл.2.

Таблица 1. Характеристика углеродсодержащих добавок

Добавка	Технический анализ, %				Прочность, %				Состав золы кокса, %						Размер частиц, мкм
	W <sup>p</sup>	A <sup>p</sup>	S <sup>p</sup>	V <sup>p</sup>	C <sup>p</sup>	M25	M10	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O		
Кокс Рутченковского КХЗ	2,6	9,4	1,77	0,7	88,13	87,7	7,1	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	До 100	
Кокс Донецкого КХЗ	3,2	9,3	1,26	1,03	84,67	87,7	7,1	38,7	22,3	27,5	3	1,91	1,66	До 100	
Кокс Мариупольского КХЗ	3,5	9,7	1,69	1,0	83,56	85,9	7,1	38,7	23,2	28,7	2,8	1,8	1,6	До 100	
Кокс Авдеевского КХЗ	2,3	9,6	1,62	0,73	85,1	88,5	6,1	38,5	23	29,6	2,65	1,8	1,7	До 100	
Кокс Алчевского КХЗ	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	До 100	
Кокс Горловского КХЗ	3,6	9,4	1,65	1,0	83,8	87,2	7,4	38,9	20,6	28,7	3,33	1,91	1,44	До 100	
Кокс Ясиновского КХЗ	3,3	9,4	1,35	1,0	84,38	85,6	7,3	39,7	22,4	27,4	3,0	1,92	1,88	До 100	
Угольная пыль Чумаковской ЦОФ	0,7	8,6	1,9	11	78	-	-	-	-	-	-	-	-	50% до 50 мкм 50% 50–100 мкм	
Зола кокса	-	-	-	-	≈	-	-	40,2	23,0	24,6	3,34	1,8	-	До 100	
Сажа	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02–0,3	

Таблица 2. Влияние углеродсодержащих добавок на свойства доменных шлаков

Добавка	Средние величины градиентов, %/°				Коэффициенты корреляции зависимостей			
	$\Delta\eta$	$\Delta T_{\text{л}}$	$\Delta T_{\text{с}}$	$\Delta T_{\text{г}}$	Вязкость	$T$ ликвидус	$T$ солидус	
Кокс Рутченковского КХЗ	29,7	2,62	2,78	0,57	$\Delta\eta = f(\Delta c, \rho)$	$\Delta T_{\text{л}} = f(\Delta c, \rho)$	$\Delta T_{\text{с}} = f(\Delta c, \rho)$	
Кокс Донецкого КХЗ	46	3,37	3,76	0,72	0,79	0,77	0,89	
Кокс Мариупольского КХЗ	62	3,78	4,52	0,68	0,80	0,80	0,98	
Кокс Авдеевского КХЗ	76,4	4,91	5,28	0,69	0,81	0,81	0,97	
Кокс Алчевского КХЗ	84,2	6,1	Н.д.	0,92	0,99	0,99	Н.д.	
Кокс Горловского КХЗ	96	6,85	Н.д.	0,53	0,96	0,96	Н.д.	
Кокс Ясиновского КХЗ	101,6	5,28	6,04	0,78	0,80	0,80	0,98	
Угольная пыль Чумаковской ЦОФ	133,6	6,22	6,84	0,91	0,60	0,60	0,98	
Пылеугольное топливо	158,2	7,51	7,28	0,53	0,89	0,89	0,92	
Сажа	218,4	8,88	8,98	0,45	0,90	0,90	0,83	
Зола кокса	-28,1	-3,52	-3,66	0,65	0,77	0,77	0,93	

Использование рассчитанных градиентов для оценки влияния углеродсодержащих добавок (с учетом их количества) на свойства доменных шлаков производится по формуле (3).

### **Выводы**

Выполнено аналитическое исследование влияния различных типов углеродсодержащих добавок на вязкость и интервал плавления доменных шлаков.

Для объективной количественной характеристики влияния добавок на свойства шлаков предложен критерий – градиент  $\Delta\eta$ ,  $\Delta T_l$  и  $\Delta T_c$ , показывающий относительное изменение величины свойства в процентах на каждый процент добавки.

Определена решающая роль размера частиц углеродсодержащих добавок в повышении вязкости, температур солидус и ликвидус гетерогенных шлаковых расплавов.

Предложена методика расчета величин градиентов  $\Delta\eta$ ,  $\Delta T_l$  и  $\Delta T_c$  в зависимости от химического состава шлаков с учетом модельных параметров их структуры и методика оценки свойств гетерогенных углеродсодержащих шлаков по свойствам шлаков без добавок.

1. *Старшинов Б.Н., Синицкий В.Д.* О влиянии коксовой мелочи на физические свойства шлаков в доменной печи. // Шлаковый режим доменных печей. – М.: Metallurgy. – 1967. – С.216–233.
2. *Влияние режима сжигания природного газа на горение фурм доменной печи.* / И.П. Семик, К.М. Бугаев и др. // Сталь. – 1968. – №6 – С. 490–493.
3. *Жеребин Б.Н., Горбачев В.П., Кудояров М.С.* Влияние заграфиченности на физические свойства магнезиально–глиноземистых доменных шлаков. // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1972. – №6 – С.22–25.
4. *Пономаренко А.Г., Козлов Ю.Е.* О растворимости углерода в шлаках. // Металлы. – 1974. – №5 – С. 73–80.
5. *Приходько Э.В., Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н.* Строение и физико–химические свойства металлургических шлаковых расплавов. // Экспрессинформация, ин-т «Черметинформация», – М. – 1983. – 21с.
6. *Поляков А.А., Вегман Е.Ф., Валавин В.С.* Исследование вязкости гетерогенных шлаков. // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1985. – №1 – с.146.
7. *Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии.* / В.М.Бабошин, Е.А.Кричевцов, В.М.Абзалов и др. – М.: Metallurgy, 1982. – 152с.
8. *Чижикова В.М., Бачинин А.А., Нестеренко С.В.* Вязкость гетерогенных шлаков, содержащих топливо. // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1987. – №5 – С.145– 146.
9. *Нестеренко С.В., Хоменко В.М.* Исследование физических свойств шлаков системы CaO – MgO – SiO<sub>2</sub> – 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2% S – 1% MnO – 1% FeO – 0,5% K<sub>2</sub>O с добавками пылеугольного топлива. // Сталь. – 1989. – №8. – С.15– 20.
10. *Нестеренко С.В., Хоменко В.М.* Изучение физических свойств шлаков системы CaO – MgO – SiO<sub>2</sub> – 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с добавками 2% S, 1% MnO, 1% FeO – 0,5% K<sub>2</sub>O // Изв. АН СССР. Металлы. – 1982. – № 5. – С. 48– 52.

11. *Результаты* изучения физических свойств доменных шлаков металлургического комбината им. Ильича./ А.А.Бачинин, С.В.Нестеренко, Г.А.Бачинина и др. // *Сталь*. – 1996. – №10. – С.7– 13.
12. *Исследование* физических свойств натуральных доменных шлаков различной основности. / А.А.Бачинин, С.В.Нестеренко, В.М.Хоменко и др. // *Металлы*. – 1997 – №4 – С.31– 37.
13. *Андронов В.Н., Плоткин З.Ш.* Горение угольной пыли в горне доменной печи. – *Сталь*. – 1974. – №7. – с.587– 589.
14. *Михеев В.П., Медников Ю.П.* Сжигание природного газа. – Л.: «Недра», 1975. – 391 с.

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Э.В.Приходько*