

УДК:539.141;537.868;531

ТРЕХФАЗНЫЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ**В.Г. Лукьященко, В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, С.Х. Акназаров,
З.А. Мансуров, К.А. Умбеткалиев, В.Н. Шевченко**

Институт проблем горения КН МОН РК, КазНУ им. аль-Фараби

Аннотация

В данной работе рассматриваются вопросы технологии электроплавки и переработки минеральных пород с температурой плавления до 2200 К в трехфазном универсальном технологическом реакторе. Приведены результаты термодинамических расчетов плавки различных материалов, включая базальт, хромовый шлак и отходы пылеочистки хромового производства. В результате расчетов было показано, что в газовой и конденсированной фазах отсутствуют токсичные вещества, а при плавке монохроматного шлама токсичный шестивалентный хром полностью переходит в безопасный трехвалентный. Приведены результаты экспериментальных плавок указанных минеральных веществ, на основе которых определены оптимальные технологические параметры реактора и показана перспективность переработки минеральных веществ при их электроплавке с электромагнитным перемешиванием расплава. При этом, на основе расчетных и экспериментальных данных, определено, что удельные энергозатраты на переработку базальта и хромового шлама не превышает 1 кВт·ч/кг, а при восстановлении оксидов хрома до его карбидов – 1,5 кВт·ч/кг.

Ключевые слова: реактор, минеральное сырье, электроплавка, расплав

Введение

Для плавления минерального сырья во всех странах используют в основном громоздкие угольные ваграночные или мазутные и газовые печи [1, 2]. В последние годы в связи с ужесточением требований по экологии и с тем, что традиционные виды ископаемого углеводородного топлива становятся все более дефицитными и дорогостоящими, пристальное практическое внимание привлекают электрические печи. В финансовые затраты, связанные с работой электрической печи, входят не только стоимость электроэнергии.

Достаточно обоснованное сравнение стоимости двух печей можно сделать только для периода 10-12 лет. В оценку необходимо включить начальные капитальные затраты, процентную ставку на капитал, материальные и трудовые затраты на ремонт, время простоя, потери продукции во время простоя, стоимость потребления энергии в рабочий и нерабочий периоды, расходы на техобслуживание, эксплуатацию и стоимость партии.

Электрические печи для плавки минерального стекла при суточной производительности менее 25 тонн оказываются экономически более выгодными. Если

учесть необходимость использования дорогостоящего оборудования для снижения загрязнения, создаваемого обычной печью, то преимущества электрической печи возрастают.

При этом надо учитывать, что традиционные электропечи представляют громоздкие сооружения, футерованные дорогостоящей керамикой. Указанных недостатков лишен электромагнитный реактор (ЭМР) с объемным электромагнитным перемешиванием расплава для плавки базальта и другого минерального сырья с тремя силовыми электродами.

1. Расчетно-теоретическая часть

Для определения оптимальных параметров осуществления технологии плавки минеральных веществ были выполнены термодинамические расчеты процесса нагрева и плавления в электромагнитном реакторе.

Термодинамический анализ высокотемпературных процессов плавки и переработки минерального сырья были выполнены с помощью универсальной программы расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA [3, 4].

Для переработки в ЭМР было выбрано следующее сырье: базальтовая порода (таблица 1) с целью получения минерального волокна из расплава (теплоизоляционного материала); отходы хромового производства -

монохроматный шлам (таблица 2), с целью перевода токсичного шестивалентного хрома в трехвалентный и пыль газоочистки хромового

производства (таблица 3), с целью восстановления оксидов хрома углеродом, содержащимся в шубаркольском угле (таблица 4).

Таблица 1 – Химический состав горных пород базальта

Месторождение	Содержание, масс. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
Актюбинское	47,29	12,93	13,56	1,25	7,91	13,98	2,95	0,13	-	-
Архарлы	51,14	16,44	10,96	1,87	4,07	10,4	2,84	1,46	0,15	0,67
Малайсары	49,93	19,30	11,41	0,98	5,12	9,55	2,67	0,66	0,18	0,20

Таблица 2 – Химический состав монохроматного шлама, масс. %

Cr ₂ O ₃	CrO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	H ₂ O
7,0	2,5	7,0	4,0	6,5	23,5	24,0	25,5

Таблица 3 – Химический состав пыли газоочистки-1 и газоочистки-2

Наименование материалов	Химический состав, %							
	C	S	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	CaO
Пыль газоочистки-1	4,8	0,2	44,0	10,4	20,5	7,2	11,1	0,5
Пыль газоочистки-2	0,6	0,3	4,9	31,0	42,7	17,6	1,1	2,9

Таблица 4 – Химический состав Шубаркольского каменного угля, массовые %

C	O ₂	H ₂	N ₂	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
57.83	13.95	4.38	0.85	1.09	15.35	4.92	1.09	0.30	0.19	0.05	0.05

Температура плавления базальтовых пород находится в области 1500÷1600 К, поэтому с учетом того, что ЭМР не гермитичен, все расчеты по плавке базальта выполнялись при давлении 1 атм в интервале температур

400÷2000 К и с учетом эрозии графитовых электродов (C=2%).

На рис. 1 представлены равновесные составы конденсированной и газовой фаз.

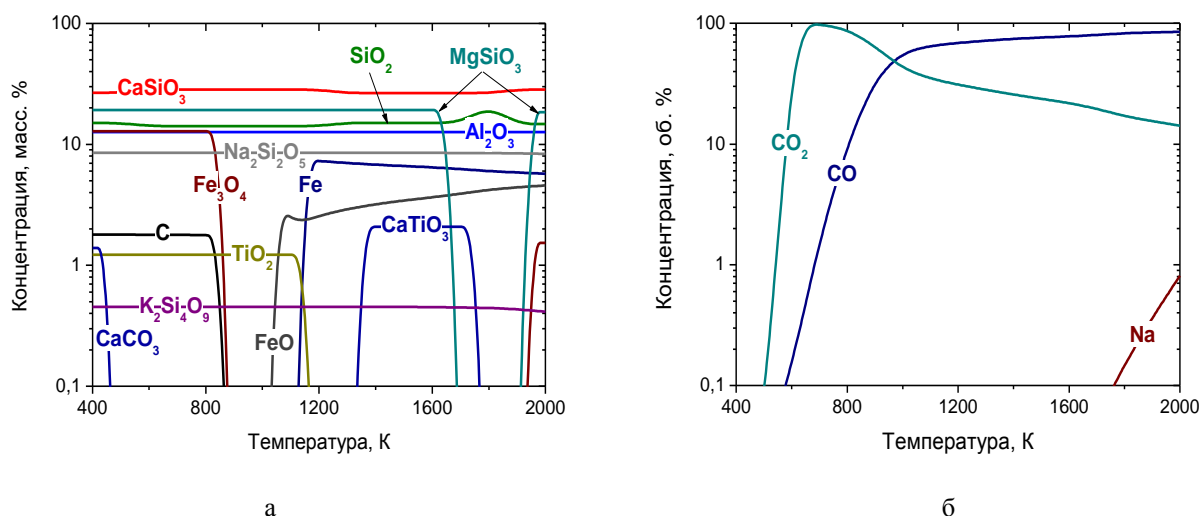


Рис. 1 – Температурная зависимость состава расплава актюбинского базальта (а) и газовой фазы (б) с учетом 2% добавки углерода

Как видно из рисунка, основу расплава при температуре до 1500 К составляют моносиликаты кальция (CaSiO_3), трисиликаты кальция ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$), моносиликаты магния (MgSiO_3), кремнезем (SiO_2), оксид алюминия (Al_2O_3), дисиликаты магния (Mg_2SiO_4), оксид железа (Fe_3O_4) и дисиликаты натрия ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$). Что касается газовой фазы, то она состоит в основном из оксидов углерода (CO и CO_2) и паров металлов (Na , K , Mg).

Для понимания физико-химических процессов плавления смеси монохроматного шлама и базальта в реакторе был рассчитан вариант состава технологической смеси с добавкой базальта равной 40% в интервале температур 400 – 2000 К и давлении 1 атм. В расчетах учитывался электрохимический износ графитовых электродов (1% С) и присосы воздуха в реактор (2%) (Рис. 2). Как видно из рисунка, в исследованном диапазоне температур токсичный шестивалентный хром (CrO_3) полностью переходит в безопасное соединение трехвалентного хрома (Cr_2O_3) с концентрацией около 6 масс.%. Газовая фаза также не содержит

вредных компонентов и представлена в основном водяным паром, углекислым газом, азотом и водородом.

Так же представляет промышленный интерес технология процесса восстановления хрома из пыли газоочистки хромового производства. С этой целью были выполнены расчеты нагрева двух смесей монохроматного шлама с углем: смесь №1 (70 кг Проба 1 + 30 кг ШКУ) и смесь № 2 (70 кг Проба 2 + 30 кг ШКУ).

На рис. 3 представлен равновесный состав расплава (а) и газовая фаза (б) смеси № 1 от температуры. Как видно из рисунка, основу расплава при температуре до 1300 К составляют оксид хрома и моносиликаты магния (MgSiO_3). Кроме того, расплав представлен также такими соединениями как моносиликаты кальция (CaSiO_3), оксид алюминия (Al_2O_3), карбид железа (Fe_3C) и углерод (С). При температуре выше 1300 К оксиды хрома, реагируя с углеродом образуют карбид хрома (Cr_3C_2).

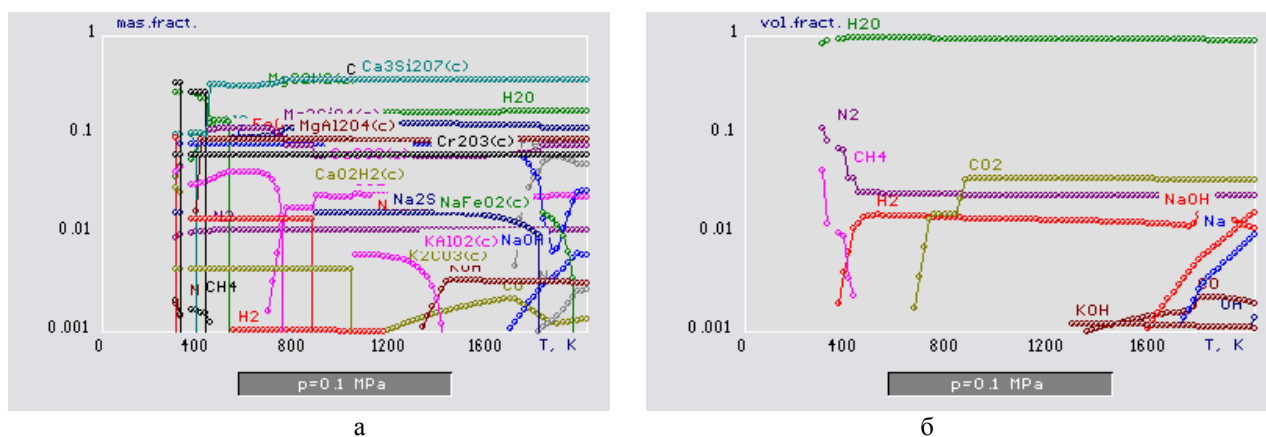


Рис. 2 – Состав расплава смеси монохроматного шлама с базальтом (а) и газовой фазы над расплавом (б) в процессе его нагрева

При повышении температуры выше 2200 К карбид хрома реагирует с кремний содержащими веществами, образуя в интервале температур 2300-2400 К хромкарбосилиций (Cr_3SiC). В газовой фазе чистый хром наблюдается, начиная с температуры 2100 К. Его концентрация равномерно возрастает, достигая максимума при температуре 2600 К, при которой все конденсированные компоненты переходят в газовую фазу. Газовая фаза (Рис. 3 б) представлена главным образом, синтез-газом ($\text{CO}+\text{H}_2$), концентрация которого достигает при 1500 К 98,7%. При этом сум-

марная концентрация атомарного и молекулярного водорода выше концентрации монооксида углерода во всем диапазоне температур и изменяется в интервале 48-59%. С увеличением температуры концентрация монооксида углерода снижается от 60% при 1500 К до 41% при 2000 К. Изменение концентрации синтез-газа при увеличении температуры связано с появлением в газовой фазе компонентов минеральной массы угля и отходов хромового производства, которые при температуре выше 1600 К начинают интенсивно переходить из конденсированной фазы в газовую.

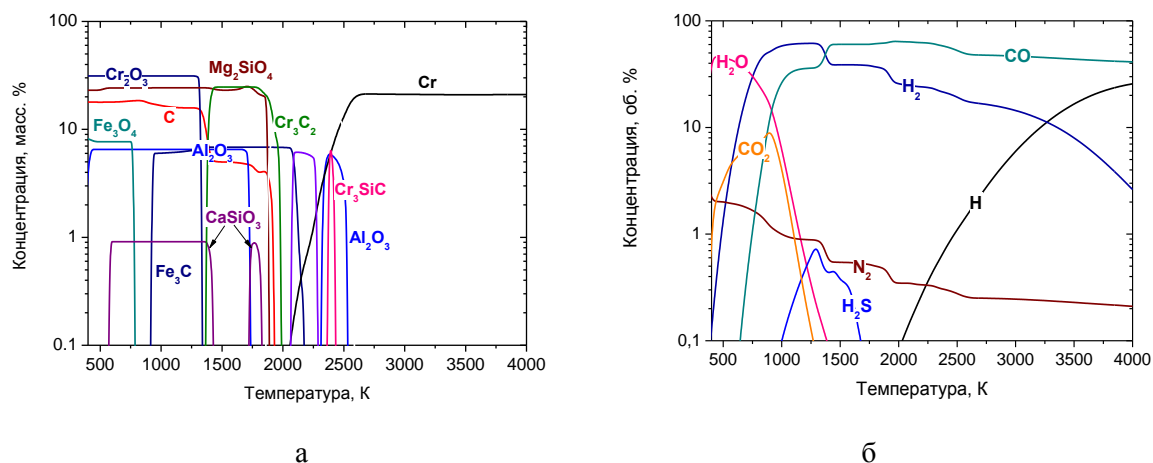


Рис. 3 - Равновесный состав расплава смеси № 1 (а) и газовой фазы (б) в зависимости от температуры

На рис. 4 представлены результаты расчетов удельных энергозатрат на нагрев и плавление актюбинского базальта (1), монохроматного шлама (2) и смеси монохроматного шлама с актюбинским базальтом (3). Из рисунка видно, что удельные энергозатраты на плавление материала возрастают с увеличением температуры.

При этом на нагрев и плавление актюбинского базальта удельные энергозатраты

минимальны, а на нагрев и плавление монохроматного шлама – максимальны во всем диапазоне температур (400-2000 К). В рабочем диапазоне температур (1750-1850 К) удельные энергозатраты составляют на получение расплава составляют 0,69, 0,97 и 0,89 кВт ч/кг для актюбинского базальта, монохроматного шлама и их смеси соответственно.

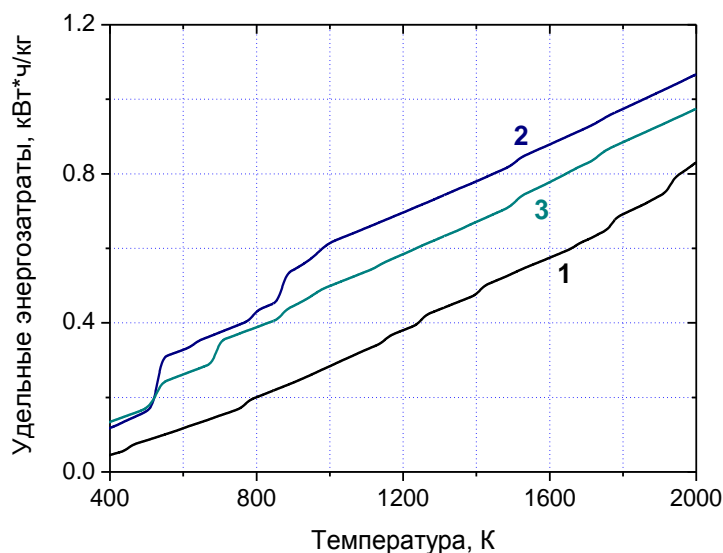


Рис. 4 – Температурная зависимость удельных энергозатрат на нагрев и плавление актюбинского базальта (1), монохроматного шлама (2) и смеси монохроматного шлама с актюбинским базальтом (3)

На рис. 5 показана зависимость удельных энергозатрат от температуры процесса нагрева пыли газоочистки в смеси с ШКУ. Удельные энергозатраты монотонно возрастают от 0,42 кВт ч/кг при температуре 1000 К до 2,08 кВт ч/кг при 2000 К и до 4,7 кВт ч/кг при

4000 К. Как видно из рисунка, в диапазоне нагрева шихты в реакторе в диапазоне до 2000 К удельные энергозатраты на процесс восстановления возрастают более чем в 2 раза, чем в процессе нагрева и плавления без восстановителя.

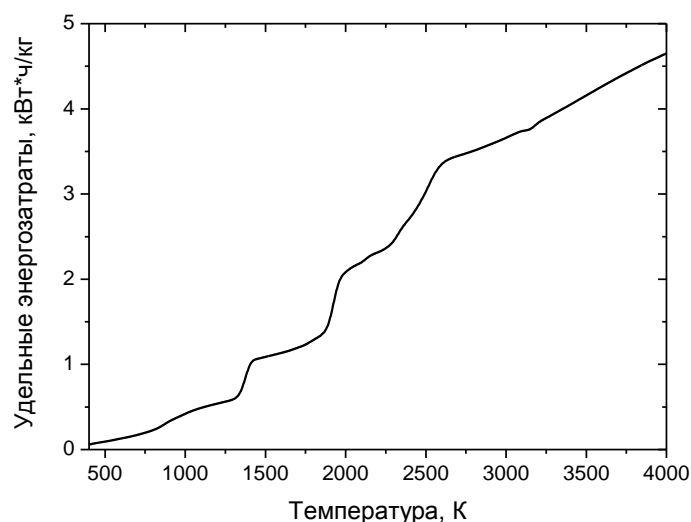


Рис. 5 – Температурная зависимость удельных энергозатрат на процесс плавления пыли газоочистки-1 с добавлением 30 % ШКУ

1. Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования нагрева и плавления плавки минеральных веществ были выполнены на электромагнитном технологическом реакторе с тремя погружными электродами. Электромагнитный реактор (ЭМР) представляет собой плавильную камеру, выполненную из вертикальных водоохлаждаемых изолированных секций из листовой нержавеющей немагнитной стали. Сверху камера ограничена водоохлаждаемой крышкой, на которой расположены устройства ввода трех силовых электродов и одного центрального нейтрального электрода и подачи шихты, а также патрубок отходящих газов, а снизу охлаждаемым дном (подиной) с леткой выпуска расплава (Рис. 6). На рис. 7 представлена схема ЭМР.

Снаружи камеру охватывает трехфазный электромагнит поперечного магнитного поля с обмотками включенными последовательно в цепь электродов. Силовое электропитание реактора осуществляется от трехфазного управляемого тиристорного регулятора, включенного в сеть через разделительный трансформатор.

Запуск реактора осуществляется через замыкание электродов на графит или с помощью дополнительного теплового источника, например, факела плазмотрона. После получения линзы расплава, дальнейший нагрев сырья происходит за счет токов проводимости между

силовыми электродами через расплав.

В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем трехфазного электромагнита возникают силы, действующие на определенные области расплава, что обеспечивает его электромагнитное перемешивание и, как следствие, увеличивается скорость нагрева материалов, улучшается гомогенизация расплава и повышается его тепловой КПД ЭМР.

Кроме этого, движению расплава способствует вращающееся магнитное поле трехфазного электромагнита, охватывающего плавильную зону. Нейтральный электрод выполняет роль затвора летки, так же способствует дополнительному прогреву расплава в нижней части реакционной камеры в районе летки. Диаметр выпускного отверстия летки определен равным 8 мм. При производительности реактора не более 200 кг/ч.

Реакционная камера в разрезе имеет шестиугольную форму. Эта форма выбрана из условий увеличения значения магнитного поля, которое достигается путем сближения полюсов электромагнита при сохранении достаточного большого расстояния между электродами. Это ведет к повышению рабочего напряжения и снижению величины рабочего тока при заданной мощности реактора. Отметим, что снижение величины рабочего тока приводит к уменьшению плотности тока на электродах и, следовательно, к уменьшению их износа.

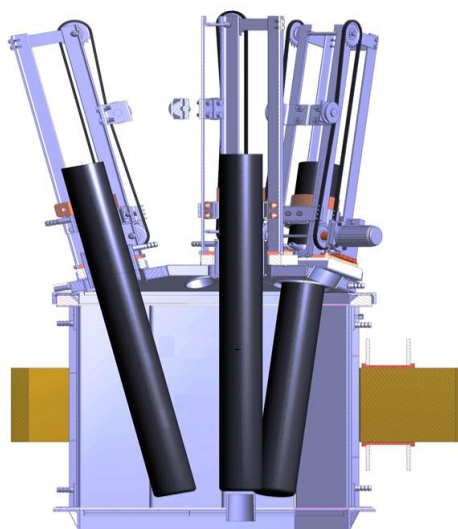
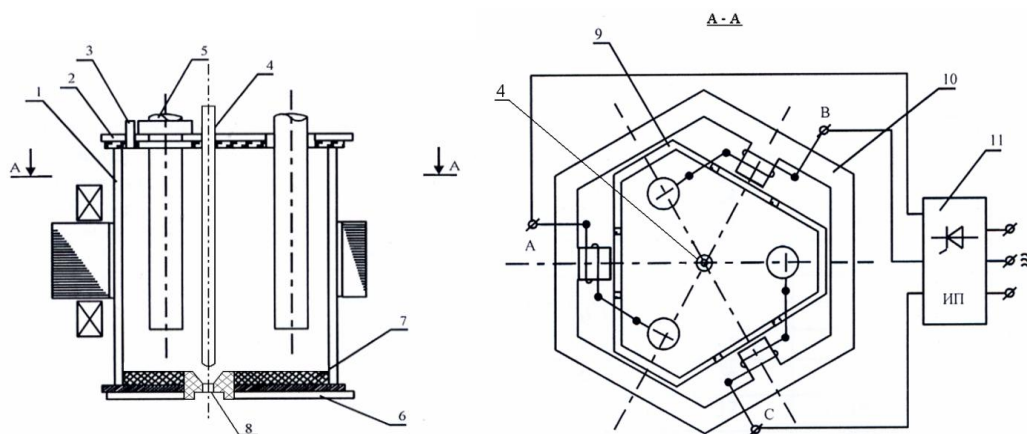


Рис. 6 – Общий вид электромагнитного реактора с нейтральным центральным электродом и силовыми электродами, расположенными под определенным углом относительно оси камеры



1 – плавильная камера; 2 – крышка реактора; 3 – патрубок ввода базальтовой крошки; 4 – центральный графитовый электрод; 5 – графитовые электроды; 6 – дно реактора; 7 – огнеупорная футеровка дна реактора; 8 – летка выпуска струи расплава; 9 – секции камеры реактора; 10 – трехфазный электромагнит; 11 – источник питания.

Рис. 7 – Схема трехфазного электромагнитного реактора с тремя погружными электродами

Запуск реактора осуществляется через замыкание электродов на графит или с помощью дополнительного теплового источника, например, факела плазмотрона. После получения линзы расплава, дальнейший нагрев сырья происходит за счет токов проводимости между силовыми электродами через расплав. В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем трехфазного электромагнита возникают силы, действующие на определенные области расплава, что обеспечивает его электромагнитное перемешивание и, как следст-

вие, увеличивается скорость нагрева материалов, улучшается гомогенизация расплава и повышается его тепловой КПД. Кроме этого, движению расплава способствует вращающееся магнитное поле трехфазного электромагнита, охватывающего плавильную зону.

В результате экспериментов на данном реакторе по плавке базальтового сырья было определено, что в начальный период до образования линзы расплава процесс плавления минералов затруднен, поэтому расстояние между электродами должно быть минимальным.

В рабочем режиме для обеспечения необходимой мощности и повышения напряжения между электродами, электроды должны быть разведены; поэтому силовые электроды вместе с механизмами их подачи ремни крепятся на крышке реактора наклонно, то есть электроды выполняются сходящимся вниз по центру.

По результатам ряда экспериментов угол наклона электродов относительно вертикальной оси электрода выбран равным $12,5^{\circ}$. Кроме трех силовых электродов в реакторе целесообразно установить центральный нейтральный электрод по оси камеры, который также снабжен механизмом перемещения.

Нейтральный электрод выполняет роль затвора летки, так же способствует дополнительному прогреву расплава в нижней части реакционной камеры в районе летки. Диаметр выпускного отверстия летки определен равным 8 мм. При производительности реактора не более 200 кг/ч.

Расплав из ЭМР выпускается с температурой струи на выходе равной $1450-1650^{\circ}\text{C}$ и, как показали многочисленные экспериментальные плавки, он оказался чрезвычайно агрессивным к различным туго-плавким керами-

ческим материалам, используемых для выпуска расплава. Так подвергались поверхностному разрушению (растворению материала струей расплава с поверхности летки) летки изготовленные из кварца, диоксида циркония и нитрида титана. Наилучшие показания были получены для водоохлаждаемых леток, изготовленных из графита.

Вставка из силицированного графита впрессовывается в графитовый стакан, который в свою очередь с помощью нижнего фланца фиксируется в водоохлаждаемой конусной втулке. Вся эта система крепится во втулке подины реактора.

Для теплоизоляции внутренней поверхности плавильной камеры был использован шамотный кирпич, толщиной 40 и 65 мм. В качестве связующей массы была применена смесь перетертых шамота и кварцевого стекла на жидком стекле (силикатный клей).

При работе ЭМР футеровка с поверхности частично разъедалась расплавом продуктов реакции, покрывалась гарниссажем и в дальнейшем образовывала устойчивую ванну плавильной камеры (Рис. 8).



Рис. 8 – Плавильная камера после технологических плавки и отбор проб струи расплава

Заключение

Выполненные расчеты и эксперименты показали перспективность использования ЭМР для технологических процессов плавки базальта, переработки и дезактивации монохроматного шлама. Показано также возможность использования Шубаркульского каменного угля в качестве восстановителя для получения чистого хрома и пыли газоочистки, однако для этого температуру переработки смеси надо

поднимать до 2500 К и выше, что в свою очередь приведет к удельным энергозатратам выше 3 кВт ч/ кг. Поэтому при температурах до 2000 К, соответствующих трехфазному электромагнитному реактору с объемным электромагнитным перемешиванием расплава возможно вести технологический процесс получения карбида хрома при относительно невысоких удельных энергозатратах не более 1,5 кВт ч/ кг.

Литература

1. S.E. Ladue. Progress Report on electric melting // The glass industry. June. –1979. –P.12-16.

2. Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Акназаров С.Х., Умбеткалиев К.А., Устименко А.Б., Шевченко В.Н., Сейсенова А.Б. Трехфазный универсальный электромагнитный технологический реактор (ЭМР) для переработки минеральных веществ // Сборник материалов VII Международного Симпозиума "Горение и плазмохимия". (ISBN 978-601-04-0134-1) – Алматы: Казак университеті, 2013. - С.174-180.

3. Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Акназаров С.Х., Мансуров З.А., Умбеткалиев К.А., Сейсенова А.Б. Термодинамические расчеты переработки минерального сырья при его электроплавке в трехфазном электромагнитном реакторе (ЭМР) // Сборник материалов VII Международного Симпозиума "Горение и плазмохимия". (ISBN 978-601-04-0134-1) – Алматы: Казак университеті, 2013. – С. 216-221.

4. M. Gorokhovski, E.I. Karpenko, F.C. Lockwood, V.E. Messerle, B.G. Trusov and A.B. Ustimenko. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory. // Journal of the Energy Institute. 2005. V. 78. N 4. P. 157-171.

THREE-PHASE UNIVERSAL ELECTROMAGNETIC TECHNOLOGICAL REACTOR FOR PROCESSING OF MINERALS

**V.G. Lukiaschenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, S.Kh. Aknazarov,
Z.A. Mansurov, K.A. Umbetkaliev, V.N. Shevchenko**

Abstract

This paper discusses the issues of technology and processing electromelting mineral rocks with a melting point up to 2200 K in a three-phase universal technological reactor. The results of thermodynamic calculations of melting various materials, including basalt, chrome waste sludge and dust cleaning chromium production are given. The calculations have shown that the gas and the condensed phases are no toxic substance, and in smelting slurry of monohromat toxic hexavalent chrome becomes completely secure trivalent. The results of experimental heats these minerals, which are defined on the basis of the optimal technological parameters of the reactor and shows promising processing minerals in their electromelting with electromagnetic stirring of the melt, are given. Thus, on the basis of calculated and experimental data, it is determined that the specific energy consumption for processing basalt and chromium sludge does not exceed 1 kW·h/kg, and the reduction of oxides of chromium carbides to it - 1.5 kW·h/kg.

**МИНЕРАЛДЫ ЗАТТАРДЫ ӨНДЕУ ҮШІН ҮШФАЗАЛЫ ӘМБЕБАПТЫ
ЭЛЕКТРОМАГНИТТІ ТЕХНОЛОГИЯДАҒЫ РЕАКТОР**

**В.Г. Лукьященко, В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, С.Х. Акназаров,
З.А. Мансуров, К.А. Умбеткалиев, В.Н. Шевченко**

Жану проблемалары институт, 050012, Қазақстан, Алматы, Бөгенбай батыр көш.,172

Аннотация

Үшфазалы әмбебапты электромагнитті технологиядағы реакторда температурасы 2200 К шамасында минералды жыныстарды электробалқыту және қайтадан өңдеу жайлы қарастырылып отырған мақалада қарастырылады. Базальттің, хромды қалдықтардың, хром өндірісі кезіндегі шаңнан тазалау технологиясындағы термодинамикалық есептеулердің нәтижелері көрсетілген. Есептердің анализі кезінде газды және кондинсирленген фазаларда улы заттардың азаюы мен хром өндірісі кезіндегі алты валентті хромның үш валентті хромға айналатыны байқалды. Аталған минералды жыныстар бойынша реакторда эксперименттер жасалынды және технологияның тиімді болудың барлық жағдайлары қарастырылды. Сонымен қатар есептеулер мен эксперименттер нәтижелерінде базальт пен хром қалдықтарын өңдеу үшін реакторға кететін энергия мөлшері 1 кВт·сағ/кг, алты валентті хромның үш валенттіге ауысуына – 1,5 кВт·сағ/кг кететіндігі анықталды.