

# ТРЕХФАЗНЫЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

В.Г. Лукьященко<sup>1,2</sup>, В.Е. Мессерле<sup>1,3</sup>, А.Б. Устименко<sup>1,2</sup>, С.Х. Акназаров<sup>2</sup>, К.А. Умбеткалиев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ТОО «Плазматехника R&D», ул. Наурызбай батыра, 26/41, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт проблем горения, ул. Богдабай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, пр. академика Лаврентьева 1, Новосибирск, Россия

Дата поступления:

4 Марта 2019

Принято на печать:

28 Марта 2019

Доступно онлайн:

6 Мая 2019

## АННОТАЦИЯ

В статье показаны преимущества применения электромагнитного технологического реактора для плавления минерального вещества. Выполнены термодинамические расчеты процесса нагрева и плавления минеральных веществ в широком диапазоне температур (300-2000 К). Для переработки в электромагнитном реакторе использовалась базальтовая порода Актюбинского месторождения с целью получения минерального волокна из расплава (теплоизоляционного материала), отходы хромового производства – монохроматный шлам с целью перевода токсичного шестивалентного хрома в трехвалентный и пыль после газоочистки на хромовом производстве с целью восстановления оксидов хрома углеродом, содержащимся в Шубаркольском каменном угле. Расчеты показали, что, в исследованном диапазоне температур токсичный шестивалентный хром полностью переходит в безопасное соединение трехвалентного хрома с концентрацией около 6 масс.%. Газовая фаза также не содержит вредных компонентов и представлена в основном водяным паром, углекислым газом, азотом и водородом. Удельные энергозатраты на процесс нагрева и плавления изменяются от 0,6 до 0,9 кВт ч/кг для различных технологических смесей. Эксперименты показали, что средние удельные энергозатраты на получение расплава исследованных минеральных веществ в ЭМР составляют 1 кВт ч/кг. Полученные результаты термодинамических расчетов и экспериментов подтверждают возможность использования программы TERRA для расчета процесса нагрева и плавления минеральных веществ в ЭМР и определения исходных данных для его проектирования. Проведенные исследования показали высокую эффективность плавления минеральных веществ в ЭМР.

*Ключевые слова:* базальт, монохроматный шлам, каменный уголь, электромагнитный реактор, плавление, удельные энергозатраты.

## Введение

Основное загрязнение соединениями хрома в Западном Казахстане и Оренбургской области России осуществляется промышленными стоками Актюбинского завода хромовых соединений (АЗХС). Отходы АЗХС в основном представлены монохроматными шламами (МХШ), содержащими токсичный шестивалентный хром. Ежегодно в АЗХС образуется более 200 тыс. тонн МХШ [1]. Утилизация МХШ является серьезной проблемой для Казахстана, где скопилось десятки мил-

лионов тонн минеральных отходов. Одним из технических решений этой проблемы является термическая переработка МХШ с получением нетоксичного нейтрального расплава.

Для плавления минерального сырья во всех странах используют в основном громоздкие угольные ваграночные или мазутные и газовые печи [2, 3]. 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

\*Ответственный автор

E-mail: ust@physics.kz (А.Б. Устименко).

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.

В настоящей статье представлены результаты комплексного расчетно-теоретического и экспериментального исследования процесса нагрева и плавления минеральных материалов, включающие базальт, отходы хромового производства и твердое топливо.

### Термодинамические расчеты

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 ми-

нерального сырья были выполнены с помощью универсальной программы расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA [4, 5]. Для переработки в ЭМР было выбрано следующее минеральное сырье (таблица 1): базальтовая порода Актюбинского месторождения (БАМ) с целью получения минерального волокна из расплава (теплоизоляционного материала); отходы хромового производства – монохроматный шлам (МХШ), с целью перевода токсичного шестивалентного хрома ( $\text{CrO}_3$ ) в трехвалентный и пыль после газоочистки на хромовом производстве (МХШГ-О) с целью восстановления оксидов хрома углеродом, содержащимся в Шубаркольском каменном угле (ШКУ).

Температура плавления базальтовых пород находится в области 1500÷1600 К, поэтому с учетом того, что ЭМР не герметичен, все расчеты по плавке базальта выполнялись при давлении 1 атм в интервале температур 400÷2000 К и с учетом эрозии графитовых электродов ( $\text{C}=2\%$ ).

На рис. 1 представлены равновесные составы конденсированной и газовой фаз. Как видно из рисунка, основу расплава при температуре до 1500 К составляют моносилкат кальция ( $\text{CaSiO}_3$ ), трисилкат кальция ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ), моносилкат магния ( $\text{MgSiO}_3$ ), кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ), оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), дисиликат магния ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), оксид железа ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и дисиликат натрия ( $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ). Что касается газовой фазы, то она состоит в основном из оксидов углерода ( $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ) и паров металлов ( $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Mg}$ ).

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 ( $\text{CrO}_3$ ) полностью переходит в безопасное соединение трехвалентного хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) с кон-

**Таблица 1**

Химический состав минерального сырья, массовые %

Сырье	С	О	Н	N	S	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	
ШКУ	57,83	13,95	4,38	0,85	1,09	15,35	4,92	1,09	0,30	0,19	0,05	0,05	
БАМ						$\text{TiO}_2$ 1,25	47,29	12,93	13,56	13,98	7,91	0,13	2,95
МХШГ-О	4,27	–	–	–	0,18	9,26	6,41	21,97	0,45	18,26		$\text{Cr}_2\text{O}_3$ 39,2	
МХШ	–	22,7	2,8	–	–	7,0	4,0	6,5	24,0	23,5	$\text{Cr}_2\text{O}_3$ 7,0	$\text{CrO}_3$ 2,5	

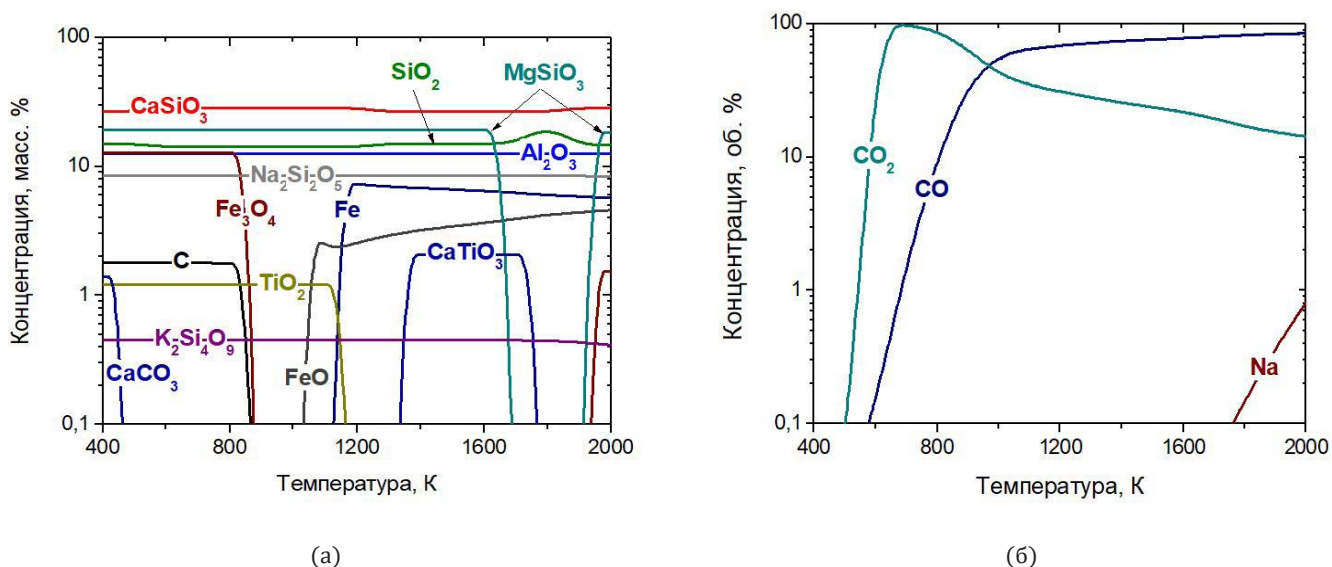


Рис. 1. Температурная зависимость состава расплава актюбинского базальта (а) и газовой фазы (б) с учетом 2% добавки углерода.

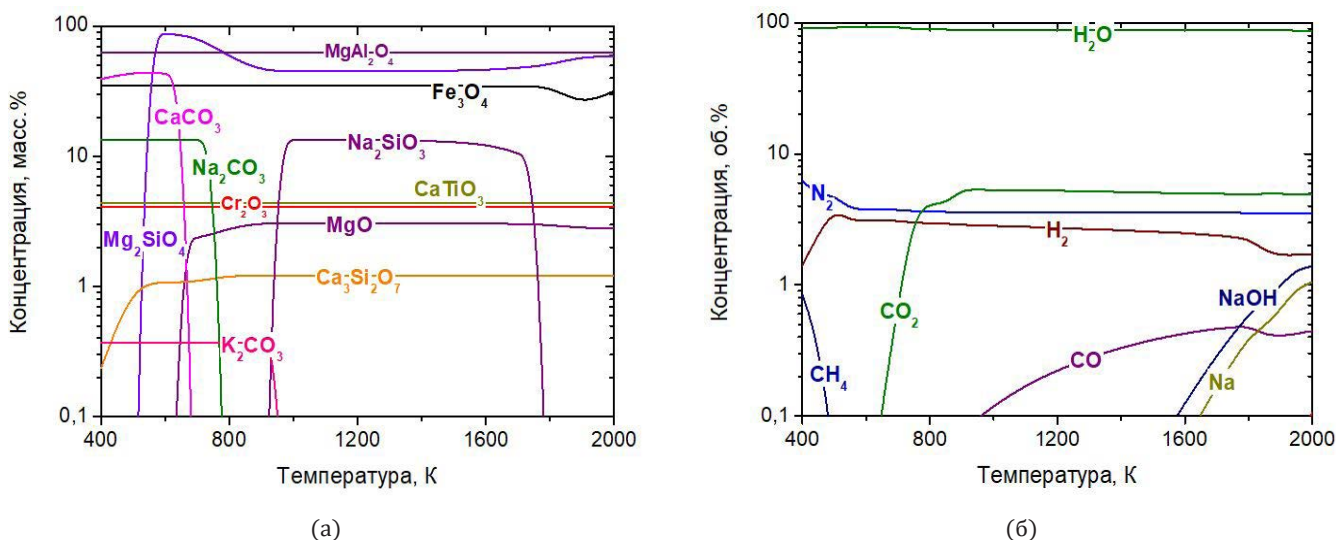


Рис. 2. Состав расплава смеси монокроматного шлама с базальтом (а) и газовой фазы над расплавом (б) в процессе его нагрева.

центрацией 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 был выполнен расчеты нагрева смеси монокроматного шлама с углем (70 кг шлама + 30 кг ШКУ).

На рис. 3 представлен равновесный состав расплава (а) и газовая фаза (б) смеси монокроматного шлама с углем от температуры. Как видно из рисунка, основу расплава при температуре до 1300 К составляют оксид хрома и моносилкат магния ( $\text{MgSiO}_3$ ). Кроме того, расплав

представлен также такими соединениями как моносилкат кальция ( $\text{CaSiO}_3$ ), оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) и углерод (C). При температуре выше 1300 К оксиды хрома, реагируя с углеродом образуют карбид хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ).

При повышении температуры выше 2200 К карбид хрома реагирует с кремнийсодержащими веществами, образуя в интервале температур 2300-2400 К хромкарбосилиций ( $\text{Cr}_3\text{SiC}$ ). 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. 3б) представлена главным образом, синтез-газом ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ), концентрация

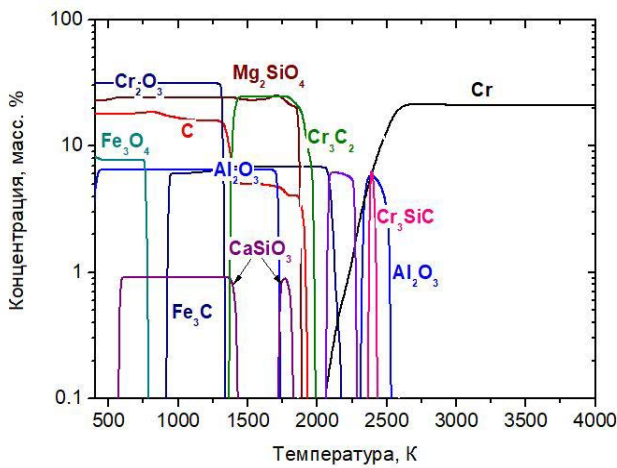
которого достигает при 1500 К 98,7%. При этом суммарная концентрация атомарного и молекулярного водорода выше концентрации монооксида углерода во всем диапазоне температур и изменяется в интервале 48-59%. С увеличением температуры концентрация монооксида углерода снижается от 60% при 1500 К до 41% при 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.

На рис. 4 представлены результаты расчетов удельных энергозатрат на нагрев и плавление БАМ (1), МХШ (2) и смеси МХШ с БАМ (3). Из рисунка видно, что удельные энергозатраты на

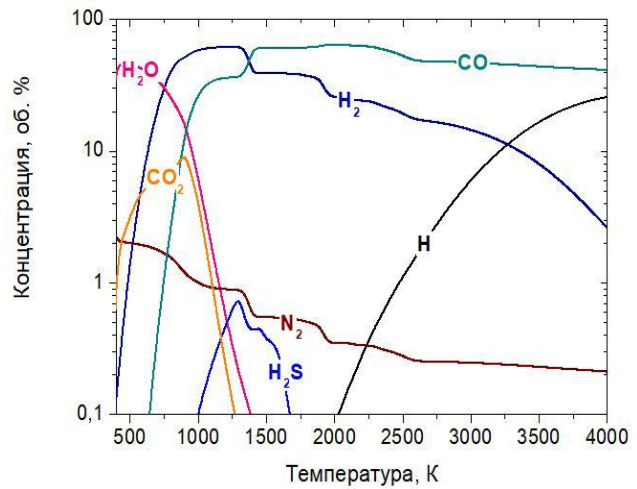
плавление материала возрастают с увеличением температуры.

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 БАМ, МХШ и их смеси соответственно.

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



(a)



(б)

Рис. 3. Равновесный состав расплава смеси монохроматного шлама с ШКУ (а) и газовой фазы (б) в зависимости от температуры.

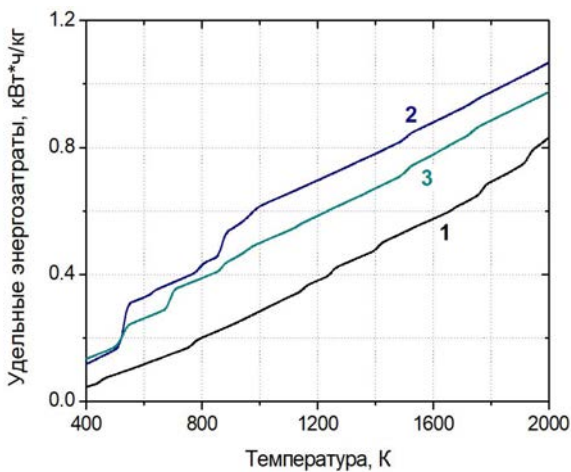


Рис. 4. Температурная зависимость удельных энергозатрат на нагрев и плавление БАМ (1), МХШ (2) и смеси МХШ с БАМ (3).

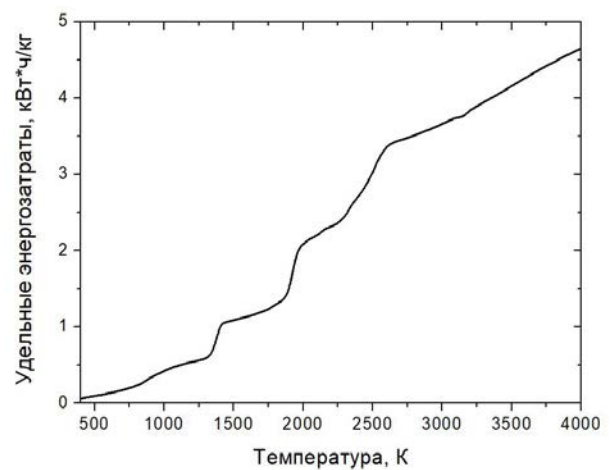


Рис. 5. Температурная зависимость удельных энергозатрат на процесс плавления пробы пыли газоочистки 1 с добавлением 30% ШКУ.

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.

## Эксперименты

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 патрубков отходящих газов, а снизу охлаждаемым дном (подиной) с леткой выпуска расплава (рис. 6). На рисунке 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, выполняющий 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 до 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.

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. 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

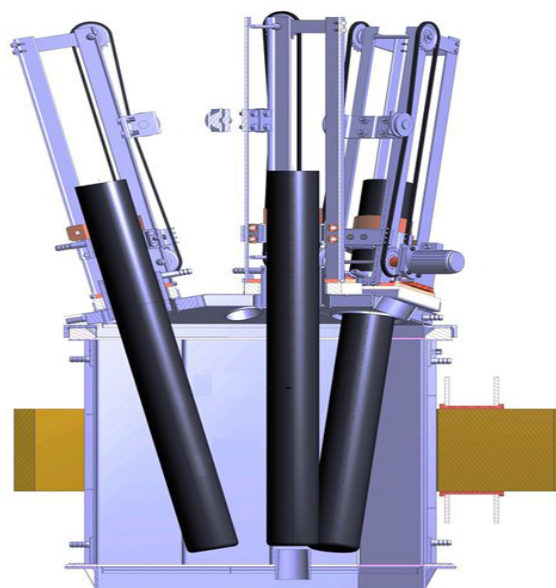


Рис. 6. Общий вид электромагнитного реактора с нейтральным центральным электродом и силовыми электродами, расположенными под определенным углом относительно оси камеры.

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°. Кроме трех силовых электродов в реакторе целесообразно установить центральный нейтральный электрод по оси камеры, который также снабжен механизмом перемещения.

Расплав из ЭМР выпускается с температурой струи на выходе равной 1450-1650 °С и, как показали экспериментальные плавки, он оказался чрезвычайно агрессивным к различным тугоплавким керамическим материалам, используемым 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).

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 из пыли газоочистки, однако для этого температуру переработки смеси надо поднимать до 2500 К и выше, что в свою очередь приведет к увеличению удельных энергозатрат 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.

При проведении экспериментальных исследований по плавке хромового шлама и шихты базальт-хромовый шлам определено их оптимальное содержание. Так при плавке смеси МХШ

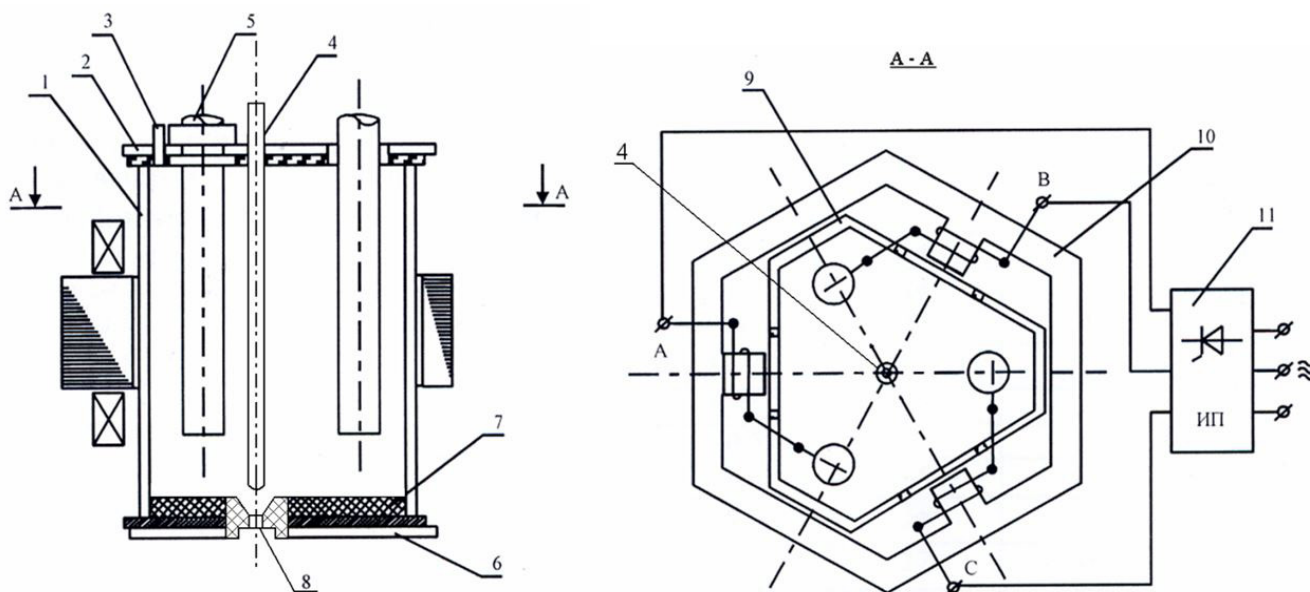


Рис. 7. Схема трехфазного электромагнитного реактора с тремя погружными электродами: 1 – плавильная камера; 2 – крышка реактора; 3 – патрубок ввода базальтовой крошки; 4 – центральный графитовый электрод; 5 – графитовые электроды; 6 – дно реактора; 7 – огнеупорная футеровка дна реактора; 8 – летка выпуска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

и базальтовой крошки с процентным содержанием МХШ более 45% наблюдалось вспучивание расплава, что могло привести к аварийной ситуации так, как ЭМР не герметичен. Поэтому был выбран оптимальный состав технологической смеси: 40% МХШ и 60% базальтовой крошки. На рисунке 9 представлены фотографии исходного МХШ и образца полученного застывшего расплава смеси шлама с БАМ. Из рисунка видно, что из смеси исходного порошка МХШ с базальтовой крошкой получен практически однородный расплав с некоторым количеством включений, представляющих собой газовые пузырьки. Разлом образца представляет собой серую мелкозернистую структуру, схожую с ситаллами, пригодными для изготовления жаропрочных керамик. Полученный расплав представляет собой стекловидную массу с характерным блеском и характеризуется повышенной твердостью.

Качественный рентгенофазовый анализ с использованием дифрактометра ДРОН-3М проведён для образца, отобранного после плавки смеси МХШ с базальтовой крошкой (рис. 10).

Рентгенограммы показали, что основной фазой расплава, содержащей хром, является фаза  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . При этом фаза токсичного шестивалентного хрома  $\text{CrO}_3$  на рентгенограмме не зафиксирована, что полностью подтверждает результаты термодинамического анализа.

Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных показало их совместимость. Так экспериментально показано, что удельные энергозатраты на плавление базальта не превышают 1 кВт/час. Также показано, что при плавлении токсичных шламов хромового производства в смеси с базальтом приводит к их обезвреживанию.

Таким образом, показано, что плавка смеси базальта (60%) и шлама (40%) позволяет получить безопасный слив струи их расплава с дальнейшим использованием продуктов расплава для производства строительных огнеупорных изделий.



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



(а)



(б)

Рис. 9. Фотографии исходного МХШ (а) и образцов плавки смеси шлама с базальтом (б).

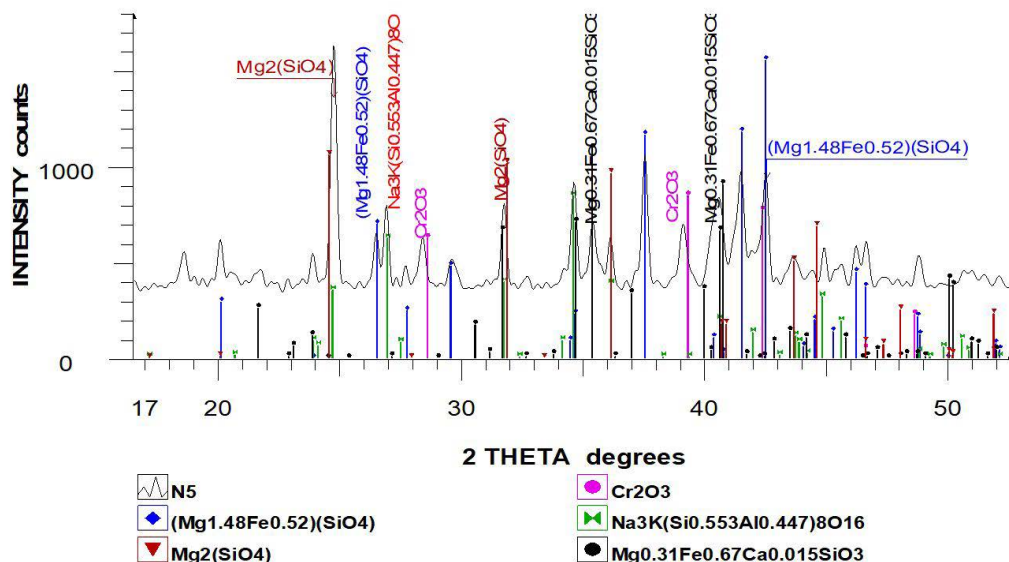


Рис. 10. Дифрактограмма образца проплавленной смеси монохроматного шлама и базальтовой крошки.

## Заключение

Выполнены термодинамические расчеты процесса нагрева и плавления минеральных веществ в широком диапазоне температур (300-2000 К). Для переработки в электромагнитном реакторе использовалась базальтовая порода Актюбинского месторождения с целью получения минерального волокна из расплава (теплоизоляционного материала), отходы хромового производства – монохроматный шлак с целью перевода токсичного шестивалентного хрома в трехвалентный и пыль после газоочистки на хромовом производстве с целью восстановления оксидов хрома углеродом, содержащимся в Шубаркольском каменном угле. Расчеты показали, что, в исследованном диапазоне температур токсичный шестивалентный хром полностью переходит в безопасное соединение трехвалентного хрома с концентрацией около 6 масс.%. Газовая фаза также не содержит вредных компонентов и представлена в основном водяным паром, углекислым газом, азотом и водородом. Удельные энергозатраты на процесс нагрева и плавления изменяются от 0,6 до 0,9 кВт ч/кг для различных технологических смесей.

Эксперименты показали, что средние удельные энергозатраты на получение расплава исследованных минеральных веществ в ЭМР составляют 1 кВт ч/кг.

Полученные результаты термодинамических расчетов и экспериментов подтверждают возможность использования программы TERRA для расчета процесса нагрева и плавления минеральных веществ в ЭМР и определения исходных данных для его проектирования.

Проведенные исследования показали высокую эффективность плавления минеральных веществ в ЭМР. Относительно низкие удельные энергозатраты на плавление и получение струи расплава выгодно отличают технологию ЭМР от известных технологий плавления минеральных материалов, включая технологические смеси, содержащих базальт, отходы хромового производства и твердое топливо.

## Благодарность

Настоящая работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования научных исследований (BR05236507 и BR05236498).

## Список литературы

- [1]. Олейников Д.В., Чекмарева О.В. Характеристика предприятия, как источника загрязнения окружающей среды (на примере производства хромовых соединений) – [https://conference.osu.ru/assets/files/conf\\_reports/conf11/143.doc](https://conference.osu.ru/assets/files/conf_reports/conf11/143.doc)
- [2]. S.E. Ladue. Progress Report on electric melting // The glass industry. June. –1979. –P.12-16.
- [3]. 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.
- [4]. Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Акназаров С.Х., Мансуров З.А., Умбеткалиев К.А., Сейсенова А.Б.



нова 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.

- [5]. M. Gorokhovskii, E.I. Karpenko, F.C. Lockwood, V.E. Messerle, V.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.

### Минералды материалдарды өңдеу үшін үшфазалы универсалды электромагнитті технологиялық реактор

В.Г. Лукьященко<sup>1,2</sup>, В.Е. Мессерле<sup>1-3</sup>, А.Б. Устименко<sup>1,2</sup>, С.Х. Акназаров<sup>2</sup>, К.А. Умбеткалиев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ЖШС «Плазматехника R&D», Қазақстан, 050000, Алматы, Наурызбай батыр көшесі, 26/41

<sup>2</sup>Жану проблемалар институты, Қазақстан, 050012, Алматы, ул. Богенбай батыр көшесі, 172

<sup>3</sup>РФА СБ С.С. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, 630090, Новосибир, академик Лаврентьев даңғылы, 1

### АНДАТПА

Бұл мақалада минералды заттарды балқытуға арналған электромагнитті реакторды қолданудың артықшылықтары көрсетілген. Кең температуралық аралықтарда (300-2000 К) минералды заттарды қыздыру мен балқыту үрдісінің термодинамикалық есептеулері орындалған. Балқымадан минералды талшықтарын (жылу оқшаулаушы материалды) алу үшін Ақтөбе кен орнын базальт рудалары, хром өндірісінің қалдықтарының улы алты валенті хромды үш валенті хромға алмастыру үшін – монохроматты шлам және Шұбаркөл тас көміріндегі көміртекті хром оксидтерін тотықсыздандыру мақсатымен хром өндірісіндегі газды тазалаудан кейінгі шаң электромагнитті реакторда қолданды. Есептеулер нәтижесінде, зерттелген температура аралығында улы алтываленті хром толығымен қауіпсіз үшваленті хром қосылыстарына ауысады және оның концентрациясы шамамен 6 масс.% құрайды. Газ фазасында зиянды компоненттер жоқ және негізінен су буымен, көмірқышқыл газымен, азотпен және сутекпен көрсетілген. Әртүрлі технологиялық қоспаларды қыздыру мен балқыту үдерісі үшін меншікті энергия шығындары 0,6-дан 0,9 кВтс/кг-ға дейін өзгереді. Эксперименттер нәтижесінде, ЭМР-де зерттелген минералды заттардың балқыманы алу үшін орташа энергия

шығыны 1 кВтс/кг құрайды. Алынған термодинамикалық есептеулер мен эксперименттердің нәтижелері ЭМР-де минералды заттарды қыздыру мен балқыту үрдісінің есептеу арналған TERRA бағдарламасының қолдануың және оны жобалау үшін бастапқы мәліметтерді анықтауға дәлелдеді. Орындалған зерттеулер ЭМР-де минералды заттарды балқытуың жоғары тиімділігін көрсетті. Балқытпаның алу мен балқытудың салыстырмалы төмен энергия шығындары, базальт, хром өндірісінің қалдықтары және қатты отындары бар технологиялық қоспаларды қосқанда, ЭМР технологиясы минералды заттарды балқыту басқа белгілі технологияларға қарағанда, өзінің ерекшеліктерін көрсетті.

*Түйінді сөздер:* базальт, монохроматты шлам, тас көмірі, электромагнитті реактор, балқыту, меншікті энергия шығындар.

### Three-phase universal electromagnetic technological reactor for mineral substances processing

V.G. Lukyachshenko<sup>1,2</sup>, V.E. Messerle<sup>1-3</sup>, A.B. Ustimenko<sup>1,2</sup>, S.Kh. Aknazarov<sup>2</sup>, K.A. Umbetkaliev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plasmatechnics R&D LLP, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Combustion Problems Institute, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>S. Kutateladze Institute of Thermophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia

### ABSTRACT

This paper presents advantages of application electromagnetic technological reactor for mineral substance melting. Thermodynamic calculations of the process of heating and melting mineral substances in a wide temperature range (300–2000 K) were performed. For processing in electromagnetic reactor a following materials were used: basalt rock from Aktobe field to obtain a mineral fiber from melt (heat-insulating material), chrome production waste – monochromatic sludge to convert toxic hexavalent chromium to trivalent and dust after gas cleaning at chromium production to reduce carbon chromium oxides, contained in Shubarkol bituminous coal. Calculations have shown that in studied temperature range, a toxic hexavalent chromium is completely transferred into a safe trivalent chromium with concentration of about 6 wt.%. The gas phase does not contain harmful components and represented mainly by water steam, carbon dioxide, nitrogen and hydrogen. For various technological mixtures, a specific energy consumption for heating and melting process changes from 0.6 up to 0.9 kWh/kg. In

experiments, an average specific energy consumption for obtaining a melt of studied mineral substances in EMR was 1 kWh/kg. Results of thermodynamic calculations and experiments confirm the possibility of application TERRA software for calculation of mineral substances heating and melting process in EMR and for determining an initial data for its design. Fulfilled studies have shown a high efficiency of mineral substances melting in EMR. A relatively low specific energy consumption for melting and melt jet production favorably distinguish technology EMR from the known melting technologies of mineral materials, including technological mixtures containing basalt, chrome production wastes and solid fuels.

**Key words:** basalt, monochromatic slime, bituminous coal, electromagnetic reactor, melting, specific energy consumption.