

УДК 662.216.5:546.26

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАВЛЕНИЯ БАЗАЛЬТА И СМЕСИ БАЗАЛЬТО-ШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ НА ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ****С.Х. Акназаров, В.Е. Мессерле, В.Г. Лукьященко, Н.Ю. Головченко,  
К.А. Умбеткалиев, О.Ю. Головченко**<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан.<sup>2</sup>Институт проблем горения, г. Алматы, Казахстан.**Аннотация**

Представлены лабораторные испытания пилотной установки, проведены экспериментальные исследования и получены образцы готовой продукции. Экспериментальные исследования плавки базальта Актюбинского месторождения с целью получения образцов готовой продукции в виде базальтового волокна из струи расплава и смеси базальто-шлаковых отходов с монохроматным шламом позволили перевести токсичный шестивалентный хром в трёхвалентный безопасный. Произведено сравнение полученных экспериментальных и расчётных данных, что позволило скорректировать расчётные модели и технологические параметры процесса переработки минеральных веществ. Получены готовые образцы базальтового волокна.

**Ключевые слова:** электромагнитный реактор, базальт, смеси, шлак, термодинамический анализ, технологические параметры.

**Введение**

На лабораторном электро-магнитном реакторе (ЭМР) проведены экспериментальные исследования по плавлению базальта Актюбинского месторождения и шихты с добавлением к базальту оксида кальция (CaO) и базальто-шлаковых отходов металлургического комбината г. Тимиртау с получением струи расплава, вытекающей из лётки. Плавки проводились с использованием двух источников питания (ИП): ИП1 - переменного трёхфазного регулируемого тока, включенного через электромагнитные катушки в цепь силовых электродов и ИП2 - дополнительного выпрямленного регулируемого тока, включенного в цепь: центральный электрод – расплав – лётка. Мощность, выделяемая в ЭМР от ИП1, составляла порядка 80-86 кВт, а мощность от ИП2 - варьировалась от 0 до 12 кВт. Подготовка к экспериментальным плавкам на ЭМР осуществлялась следующим образом: центральный электрод опускался до лётки выпуска расплава и затворял её; силовые электроды поднимались на 100÷200 мм над уровнем дна плавильной камеры; до их концов производилась засыпка шихты; и на её поверхности между концами электродов прокладывались графитовые дорожки, которые служат проводниками для первоначального протекания токов

при подаче напряжения на ЭМР; далее подсыпалась шихта до уровня верхней плоскости электромагнита реактора; разогрев ЭМР и набор ванны расплава осуществляется ИП1 с периодической подсыпкой шихты; затем поднимали центральный электрод, освобождали лётку, отключали ИП1, прогревали нижнюю область ванны расплава с помощью ИП2 и выводили расплав в виде струи; в некоторых случаях догревали расплав в ЭМР с помощью ИП1, отключив при этом ИП2.

**Эксперимент**

В таблице 1 приведен технологический регламент плавки базальта с его подшихтовкой базальто-шлаковыми отходами металлургического комбината г. Тимиртау в количестве 15 %. Из технологического регламента видно, что основным параметром, измеряемым в ходе проведения экспериментов, служит температура струи расплава.

Экспериментальные исследования базальта показали, что температура струи должна соответствовать 1300 °С. Погрешность измерения температуры зависит от интервала температур, в котором производится измерение. Так при измерении температуры до 1500 °С погрешность составляет до ±0,5 % от измеряемой величины, в интервале 1500-2000 °С - ±1 %, при измерении свыше 2000 °С погрешность возрастает до ±2 % от измеряемой величины температуры. Разрешение по температуре не хуже 1 °С.

Таблица 1 - Технический регламент плавления базальта Актюбинского месторождения с подшихтовкой базальто-шлаковыми отходами металлургического комбината г. Темиртау в количестве 15%

Время, мин	J[A]	U[V]	t лётки, °C	t шамот, °C	Примечания
0		~310	17	18	
10	210/200/200	300	18	18	Режим стабилизировался, нет больших колебаний тока
20	205/205/200	240	27	19	
30	200/205/195	210	48	21	Дали воду на секции
42	205/200/200	205	79	49	
1:00	210/200/200	200	92	70	
1:30	210/205/210	190	185	89	
2:00	210/200/205	≤190	377	150	Подъём Эц на 40 мм
2:15	=150	=140	389	159	Переход на «нижний» ИП
2:30	↑200	170	495	480	Лётка малиновая; t°505(пирометр)
2:35	205/200/210	~220	770	490	Переход на ИП~ с поднятием эл-дов на 100 мм
2:45	=200	=160	778	494	Переход к ИП= («нижний»)
2:50			807	505	Струя ~1110÷1050
3:00	↓=100	=140			t струи =1420°C
3:10	↓=50	100			t струи =1350°C
3:20	↑120	170			t струи =1450°C
3:30	↑150	210		810	t струи =1553°C
3:40	↓50	98		855	t струи =1410°C
	↑100	145			Слив расплава

Экспериментальные исследования смеси базальто-шлаковых отходов показали, что температура струи значительно ниже и соответствует 1110 °C. Погрешность измерения температуры такая же, как в эксперименте с базальтом и соответствует  $\pm 0,5 \pm 1$  %.

Таким образом, для оптимизации технологических параметров реактора были выполнены экспериментальные исследования по плавлению базальта и смеси базальто-шлаковых отходов. По приведённым экспериментальным результатам плавок показана эффективность применения дополнительного ИП2, с помощью которого возможно регулировать температуру истекающей струи в необходимом диапазоне для эффективного раздува расплава в минеральное волокно. Так же подтверждены расчётные показатели по уменьшению температуры плавления базальта с его подшихтовкой. Так начальная температура струи чистого базальта превысила 1300 °C, а с подшихтовкой 15 % металлургическим базальто-шлаковым отходами она составила 1050 – 1110 °C. Температура поверхности расплава в реакторе и температура истекающей струи за-

мерялась с помощью оптического пирометра марки ULTIMAX (infrared thermometer) фирмы IRCON (США).

На основе результатов многочисленных наладочных экспериментов по плавке минеральных веществ, включая базальт и хромовый шлак, на универсальном трёхфазном электромагнитном реакторе были определены пути улучшения его технологических параметров.

С этой целью были разработаны и доведены до рабочих чертежей и изделий модернизированная крышка реактора с одним центральным электродом и тремя рабочими электродами, расположенными под углом 12,5° относительно оси плавильной камеры, что позволило сократить время выхода реактора с холодного до рабочего, и водоохлаждаемый блок сборки лётки выпуска расплава со вставкой из силицированного графита, диаметром 8 мм, с увеличением срока её службы в 2-3 раза. Также были определены технологические характеристики реактора:

- Напряжение питания, В - 380, трехфазное;
- Род тока – переменный;

- Сила тока в режиме разогрева, А - 50-120;  
в рабочем режиме, А - 300-350;
- Номинальная электрическая мощность, кВт – 150;
- Максимальная электрическая мощность, кВт – 200;
- Мощность дополнительного источника, кВт – 20;
- Диаметр фракции используемой шихты, мм - до 7;
- Производительность по расплаву, кг/ч - 150-200;
- Охлаждение водяное, принудительное с замкнутой циркуляцией воды, с расходом при давлении 2,5-3 атм.;
- Суммарный износ силовых электродов, кг/ч - около 0,6;
- Диаметр силовых электродов, мм - 75-100;
- Удельные энергозатраты кВт/ч на 1 кг расплава - 0,8-1,0.

Изготовлена пилотная установка, включающая электромагнитный реактор (ЭМР), эстакаду и питатель минерального сырья. Электромагнитный реактор (рисунок 11) содержит плавильную камеру, состоящую из двенадцати продольных нержавеющей изолированных и водоохлаждаемых секций, крышку реактора с механизмами подачи и токоподвода их электродов, дно реактора с устройством выпуска расплава и трёхфазный электромагнит поперечного переменного магнитного поля.

Изготовлены силовой щит электропитания и управления реактора, трёхфазный регулируемый тиристорный источник питания ЭМР на токи до 500А, подключенный соответственно через электромагнитные катушки к силовым электродам и дополнительный регулируемый тиристорный выпрямитель, подключенный к центральному электроду и летке.

Монтаж электропитания электромагнитного реактора выполнен от трех электрических систем: двух тиристорных систем управления питающих силовых цепей реактора и блока питания управления подачи электродов и вспомогательными цепями. Тиристорный регулятор запитан от разделительного трансформатора мощностью 250 кВА, с изолированной нейтралью для повышения электробезопасности при эксплуатации пилотной установки.

На рисунке 1 представлена пилотная установка с электромагнитным реактором, установленная на эстакаде в рабочем помещении.

Выполнен монтаж пилотной установки с дополнительным источником, который также запитан от разделительного трансформатора и подключен между центральным электродом реактора “искусственная средняя точка” и леткой выпуска расплава, что создает цепь протекания тока через узел выпуска расплава, изменяя электрическую мощность, прилагаемую к вытекающему объему расплава, что дает возможность менять и стабилизировать температуру вытекающей струи.

Для завершения монтажа пилотной установки от входного силового щита проложен силовой кабель к разделительному трансформатору 250 кВА с изолированной нейтралью, от которого, через силовой щит электропитания, запитаны основной трёхфазный и дополнительный постоянного тока источники питания, от которых подаётся напряжение на ЭМР. Питание двигателей вспомогательных устройств (вентиляция, водяные насосы, механизмы подачи электродов, вентиляция радиатора градильни, прибор измерения температуры термомпарами и т.д.) подключены к сети 220/380В от трансформатора с заземлённой нейтралью.

В целях экономии воды охлаждение всех узлов реактора и тиристорного источника питания осуществляется от оборотного водоснабжения. Система оборотного водоснабжения представляет собой две ёмкости объёмом 2 м<sup>3</sup> с циркуляцией воды от двух водяных насосов и коллекторов с запорными элементами подачи и очистного сооружения в виде слива воды. В линию подачи воды, с целью её охлаждения, врезан радиатор с дутьевым вентилятором.

Установка плазменной технологии получения теплоизоляционных и других строительных материалов из минерального и техногенного сырья на базе управляемого трёхфазного электромагнитного реактора оснащена контрольно-измерительными приборами (КИП) (амперметры, вольтметры, ротаметры расхода воды и воздуха, приборы измерения температуры термомпарами). Основным параметром, измеряемым в ходе проведения экспериментов, служит температура струи расплава. Для проведения высокотемпературных измерений в электромагнитном реакторе используется пирометрический термометр Iacon

Ultrimax Plus UX10P для измерения температуры от 600 до 3000 °С. Погрешность измерения температуры зависит от интервала температур, в котором производится измерение. Так при измерении температуры до 1500 °С погрешность составляет до ±0,5 % от измеряемой

величины, в интервале 1500-2000 °С - ±1 %, при измерении свыше 2000 °С погрешность возрастает до ±2 % от измеряемой величины температуры. Разрешение по температуре не хуже 1 °С.



Рисунок 1 – Общий вид пилотной установки с электромагнитным реактором, установленного на эстакаде

Выполнен монтаж пилотной установки, включая сборочный чертеж трёхфазного электромагнита поперечного магнитного поля, систем электроснабжения, вентиляции, водоснабжения и системы контрольно-измерительных приборов (КИП). Проведены экспериментальные исследования плавки базальта Актюбинского месторождения с целью получения образцов готовой продукции в виде базальтового волокна из струи расплава и сме-

си базальта с монохроматным шламом с целью перевода токсичного шестивалентного хрома в трёхвалентный. При производстве хромовых соединений образуются токсичные отходы в виде монохроматного шлама. Особое беспокойство вызывает загрязнение промзоны г. Актюбинска и трансграничной реки Илек шестивалентным хромом, содержащихся в монохроматных шламах, состав которых приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав монохроматного шлама, масс. %

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

Выполнены экспериментальные работы по переводу токсичного шестивалентного хрома в безопасный трехвалентный хром и разработана технология плавления монохроматных шламов в плазменном реакторе с электромагнитным управлением, созданном для плавления природных базальтов. В ходе экспериментальных исследований выполнены работы по определению оптимальных параметров этой технологии и сделаны термодинамические расчеты процесса нагрева и плавления

монохроматного шлама с добавлением Актюбинского базальта (рисунок 2, таблица 3). Для термодинамического анализа высокотемпературных процессов плавления базальта и шихты была использована универсальная программа расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA. Анализ результатов расчетов нагрева и плавления монохроматного шлама показал, что в исследованном диапазоне температур токсичный шестивалентный хром (Cr) в соединении CrO<sub>3</sub> полностью пере-



ходит в безопасное соединение трехвалентного хрома  $Cr_2O_3$  с суммарной концентрацией около 9 мас.%. Газовая фаза представлена в основ-

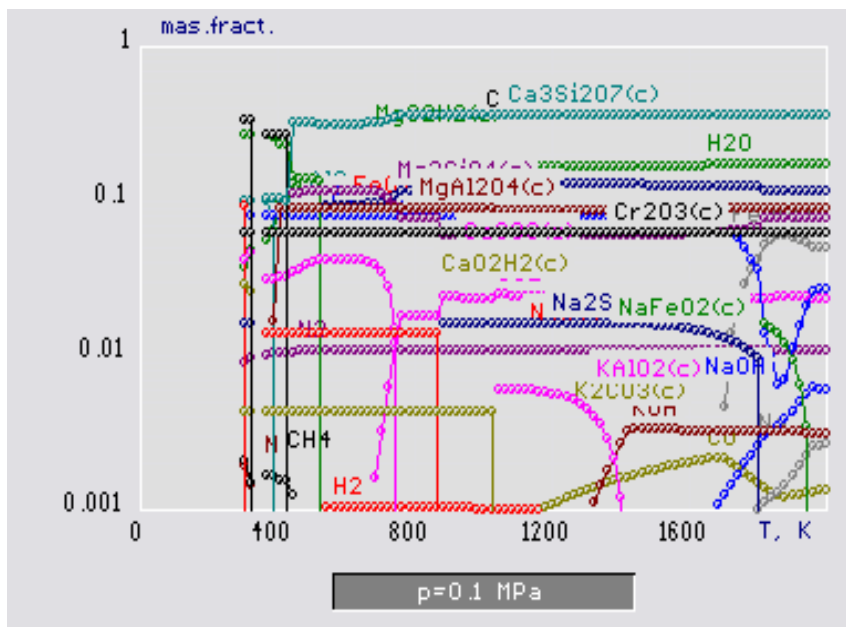
ном водяным паром, водородом, углекислым газом и азотом и практически не содержит вредных компонентов (рисунок 3).



Рисунок 2 – Струя расплава шихты, состоящей из смеси базальта и хромового шлама

Таблица 3 – Химический состав базальта Актюбинского месторождения, масс. %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
47,29	12,93	13,56	1,25	7,91	13,98	2,95	0,13



1

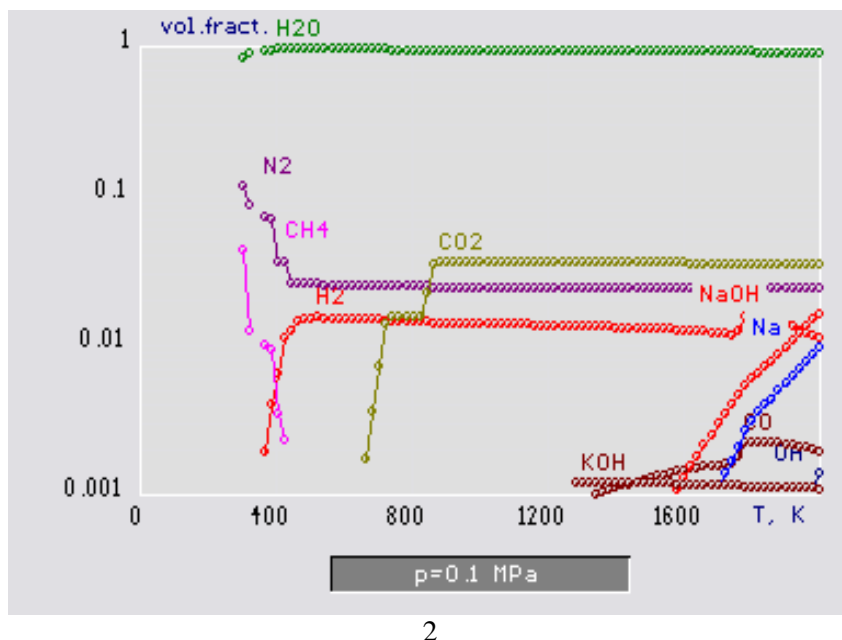


Рисунок 3 – Состав расплава смеси монохроматного шлама с базальтом (1) и газовой фазы над расплавом (2) в процессе его нагрева

На рисунке 4 представлены результаты расчетных данных по удельным энергозатратам 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.

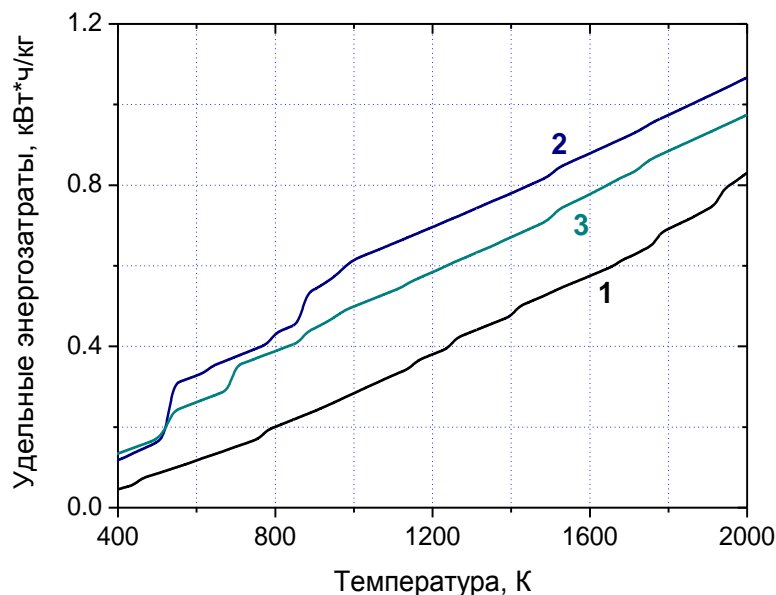


Рисунок 4 – Расчетные данные температурной зависимости удельных энергозатрат на нагрев и плавление актюбинского базальта (1), монохроматного шлама (2) и смеси монохроматного шлама с актюбинским базальтом (3)

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.

Сравнение результатов экспериментальных и расчетных данных плавки показали, что чистый хромовый шлам и шихта, где процент шлама превышает 50 %, приводит к вспучиванию расплава, что может привести к аварийным ситуациям. Поэтому для переработки хромового шлама использовалась шихта состоящая из базальта и шлама в пропорции 50-50%

Проведены сравнение полученных экспериментальных и расчётных данных и после корректировки расчётных моделей и технологических параметров процесса переработки минеральных веществ, включая получение базальтового волокна, были получены образцы продуктов плавления, которые приведены на рисунке 5.

Из рисунка 5 а видно, что в случае с плавленным базальтом мы имеем стекловидную массу с характерным блеском и повышенной твёрдостью, а в случае с плавленной шихтой разлом образца представляет собой серую мелкозернистую структуру, схожую с ситгалами пригодными для жаропрочных строительных изделий.

Качественный рентгенофазовый анализ с использованием дифрактометра ДРОН-3М проведён для образцов исходного шлама и одного из образцов, отобранных после плавки смеси шлама с базальтом. Рентгенограммы показали, что основной фазой расплава, содержащей хром, является фаза  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . При этом фаза шестивалентного хрома  $\text{CrO}_3$  на рентгенограмме не зафиксирована, что полностью подтверждает результаты термодинамического анализа.



а



б



в



г

а – образец плавки чистого базальта; б, в – образцы расплава шихты базальт + хромовый шлам; г – образец базальтовой ваты

Рисунок 17 – Образцы готовой продукции, полученных в результате плавки минерального сырья, включая получение базальтового волокна (ваты)

На рисунке 6 представлена дифрактограмма образца проплавленной шихты шлам/базальт в соотношении 1/1.

Экспериментальные результаты и расчетные данные показали, что удельные энергозатраты на плавление базальта не превышают 1кВт/час. Также показано, что при плавлении токсичных шламов хромового производства в смеси с базальтом приводит к их обезвреживанию.

Определены технологические параметры процесса переработки минеральных пород на ЭМР.

На основе экспериментальных исследований по плавке минеральных веществ определено преимущество работы реактора с дополнительным центральным электродом и тремя рабочими электродами, расположенными относительно оси под углом 12.5°.

Предлагаемая к производству минеральная вата из горных базальтовых пород имеет следующие характеристики:

- Влажность, % - 0,29
- Содержание органических веществ, % - 0,00

- Водостойкость, рН - 2,22
- Плотность под удельной нагрузкой ( $98 \pm 1,5$ ) Па, кг/м<sup>3</sup>, не более - 35;
- Средний диаметр волокна, мкм, не более - 8мм
- Содержание неволоконистых включений размером свыше 0,25 мм, % не более - 10
- Коэффициент теплопроводности, при 25 °С, Вт/мК, на уровне - 0,038
- Предельная температура применения, °С - 700
- Коэффициент звукопоглощения при частотах 160 – 1800 Гц - 0,19-0,66.

В результате экспериментальных плавки в электромагнитном реакторе с объемам плавильной зоне 0,2 м<sup>3</sup> получены следующие обобщенные результаты:

Мощность – 170 – 200 кВт;

Производительность по расплаву – 180 – 200 кг/ч;

Температура истекающей струи расплава – 1450 – 1500 °С.

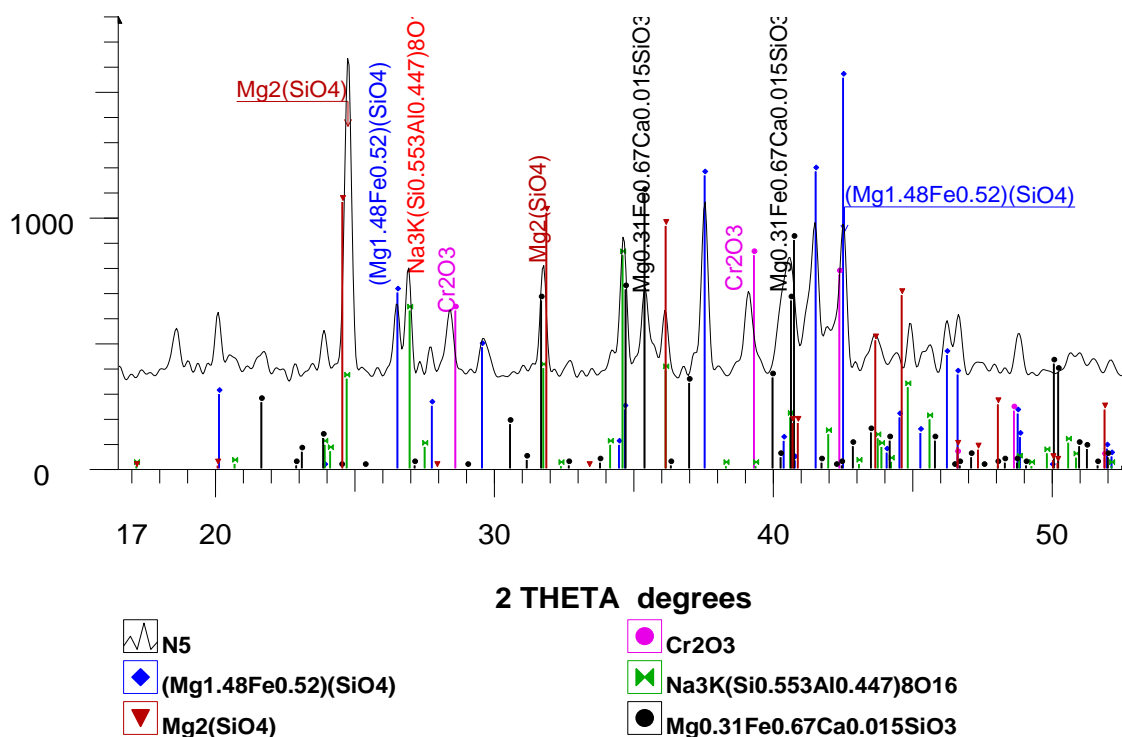


Рисунок 6 – Дифрактограмма образца проплавленной шихты шлам/базальт в соотношении 1/1

Сравнение полученных экспериментальных результатов и расчётных данных показало

их совместимость. Получены образцы базальтового волокна.



## Выводы

Таким образом, пуско-наладочные работы на установке позволили провести лабораторные испытания пилотной установки, провести экспериментальные исследования и получить образцы готовой продукции. Экспериментальные исследования плавки базальта Актюбинского месторождения с целью получения образцов готовой продукции в виде базальтового волокна из струи расплава и смеси базальто-шлаковых отходов с монохроматным шламом позволили перевести токсичный шестивалентный хром в трёхвалентный безопасный.

Произведено сравнение полученных экспериментальных и расчётных данных, что позволило скорректировать расчётные модели и технологические параметры процесса переработки минеральных веществ. Получены готовые образцы базальтового волокна.

## Литература

- 1 Аблесимов Н.Е. Горные породы: исторический аспект // Научно-технический отраслевой журнал «Базальтовые технологии». – Пермь, 2013. – С.25-28.
- 2 Земцов А.Н. Базальтовая вата как объект минералогического исследования // Сборник материалов “Базальтовая вата: история и современность”. – Пермь, 2003. – 23 с.
- 3 Ladue S.E. Progress Report on electric melting // The glass industry, June. – 1979. – p.12-16.
- 4 Карпенко Е.Н., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменный электромагнитный реактор и технологическая установка для переработки энергетических шлаков и получения минерального волокна // Энерг – №3. – С.41-44.
- 5 ГОСТ 4640-93. Вата минеральная. – Введ. 1995-01-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
- 6 Chin. J. Обезвреживающая обработка хромового шлама в промышленных отходах путем твердофазного восстановления // Nonferrous Metals. – 2006. – Т.16, № 5. – С. 919-923.
- 7 Солошенко А.А., Кравченко Г.А. Переработка шлама хроматного производства на шлакоситаллы // Тезисы докл. II Межд. конгресса по управлению отходами ВэйстТэк. – М., 2001. – 193 с.
- 8 Солошенко А.А., Кравченко Г.А. Переработка шлама хроматного производства на шлакоситаллы // Тезисы докл. II Межд. конгресса по управлению отходами ВэйстТэк. – М., 2001. – 195 с.
- 9 Пат. 27146 РК. Способ переработки шлама хроматного производства / Акназаров С.Х., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Умбеткалиев К.А., Устименко А.Б., Шевченко В.Н., Головченко О.Ю.; опубл. 15.07.13, Бюл. №7. – 2 с: ил.
- 10 Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Межд. Симпозиум «Горение и плазмохимия». – Алматы, 2005. – С.52-58.
- 11 Messerle V.E., Karpenko E.I., Trusov B.G. A Comparative Analysis of Plasma and Fire Technologies of Pulverized Coal Ignition, Combustion and Gasification Using a Mathematical Model of Chemically Nonequilibrium System // Thermophysics and Aeromechanics. – 1995. – Vol. 2, № 3. – P.245-250.
- 12 Пат 2225685 РФ. Электромагнитный технологический реактор и способ его пуска / Карпенко Е.И., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Иванов А.А., Малых А.В.; опубл. 10.03.04, Бюл. № 7. – 2 с: ил.
- 13 Пат 18229 РК. Электромагнитный технологический реактор (варианты) и стержневой электрод, используемый в реакторе. / Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Нестеренков А.Г., Шевченко В.Н., Устименко А.Б., Осадчий С.Ф., Гольш В.И., Нестеренков В.А.; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1. – 2 с: ил.