

В полевых опытах на Килийской рисовой оросительной системе удельный дренажный сток с картовых дренажно-сбросных каналов при действующем напоре  $h=1.7\text{м}$  составил  $6,43\text{л/с}$  с  $1\text{ км}$ , а при напоре  $h = 0,3\text{м}$  - соответственно  $0,32\text{л/с}$ , то есть он уменьшился практически в 20 раз.

### **Заключение**

Таким образом, можно отметить, что с целью создания благоприятной природно-мелиоративной обстановки на рисовых полях дренажно-сбросная сеть должна обеспечить приемлемые скорости фильтрации ( $5-10\text{ мм/сутки}$ ) в верхнем слое почвы по всей площади рисового чека в течении всего вегетационного периода риса. Создавая подпоры уровней воды в картовых дренажно-сбросных каналах на протяжении вегетационного периода можно достичь значительного уменьшения потерь воды из затопляемых рисовых чеков.

### **Список литературы**

1. Жовтоног, Н.И. О расчете скоростей фильтрации воды на рисовых чеках / Н.И. Жовтоног // Мелиорация и водное хозяйство. М. : Урожай, 1984. – Вып. 61. – с. 7 – 11.
2. Зайцев, В.Б. Рисовая оросительная система. – М. 1975.
3. Кропивко С.М. Исследование эффективности карт-чеков широкого фронта затопления с дренажем (на примере рисовых оросительных систем дельты Дуная): Автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 06.01.02 «Мелиорация и орошаемой земледелие» / С.М. Кропивко. – Ровно, 1987. – 20 с.
4. Олейник, А.Я. Методические рекомендации по проектированию дренажа на рисовых оросительных системах: рекомендации / А.Я. Олейник, И.С. Жовтоног. – М. : Минводхоз УССР, 1981. – 135 с.
5. Попов, В.А. Регулирование грунтовых вод на рисовых системах / В.А. Попов. – Краснодар, 1984. – 96 с.
6. Рис в Україні: [колективна монографія] / за ред. д.т.н., професора, член-кор. НААНУ В.А. Сташука, д.т.н., професора А.М. Рокочинського, д.е.н., професора Л.М. Грановської. Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 976 с.

УДК 691.54669-1

## **РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ**

**Хайдаров Б.Б., Мазов И.Н., Кузнецов Д.В., Суворов Д.С.**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» [bekzod1991@mail.ru](mailto:bekzod1991@mail.ru)

*This article addresses the issue of recycling blast furnace slag for cementless binders materials. As a method of processing apparatus provides the use of the vortex layer. This technology is characterized by high energy efficiency. The paper examined the effect of processing conditions on the physico - chemical properties of the resulting slag uncemented materials. Investigations of concrete on the basis of the cementless binders. X-ray diffraction phase composition.*

### **Введение**

Известно, что металлургическое производство связано с образованием значительного количества технологических отходов (шлаков, шламов, окалины,

пыли газоочистки и др.), которые накапливаются на металлургических предприятиях, причем совершенствование технологий не всегда сопровождается сокращением объема этих отходов. Удельный выход шлака при производстве черного металла изменяется в широких пределах – в доменном производстве от 280 до 960 кг/т чугуна, в сталеплавильном – от 80 до 250 кг/т стали, а в ферросплавном в несколько раз превышает выход выплавляемого металла.

Основную проблему представляют шлаки, накопленные в виде отвалов – терриконов высотой до 45–50 м. В России, по некоторым оценкам, только сталеплавильных шлаков накоплено свыше 250 млн. т, они занимают площадь около 1,3 тыс. га. Дополнительно к этому в отвалы ежегодно сваливается около 5–7 млн. тонн шлаков. Наибольший объем переработки шлака текущего производства достигнут в доменном переделе. Доменный шлак, как правило, перерабатывается в жидком состоянии, при этом производится гранулированный шлак, шлаковая пемза или вата. Содержание металлических включений в доменных шлаках, по различным оценкам, не превышает 3 %. В процессе транспортировки и переработки жидкой части в продукцию металлические включения осаждаются и концентрируются в ковшовых остатках, где их доля достигает 5–9 %. Таким образом, отвальные доменные шлаки представляют интерес как сырье для производства строительных материалов, а также как источник вторичного металла. В зависимости от способа первичной переработки продолжительность вылеживания для получения устойчивой структуры составляет от 90 дней до 4–9 лет. Таким образом, задача эффективной переработки и утилизации отвальных шлаков металлургической промышленности является актуальной и важной. Успешное решение данной задачи позволит значительно снизить экологическую нагрузку в регионах расположения металлургических предприятий, в перспективе – рекультивировать или ввести в хозяйственный оборот значительный объем площадей, а также позволит получить коммерчески востребованную продукцию.

Одним из перспективных путей применения доменных шлаков является их использование в качестве компонентов и исходного сырья для получения вяжущих смесей для гражданского и дорожного строительства. Постепенно возрастающий объем строительства делает чрезвычайно актуальной задачу получения высококачественных строительных материалов из максимально дешевого сырья местного производства. Использование металлургических шлаков в качестве сырья для получения вяжущих имеет ряд преимуществ, описанных выше. Однако необходимо отметить, что в настоящий момент не существует технологий, которые бы позволяли эффективно использовать шлаки металлургического производства в дорожной отрасли. Существующие подходы к использованию – получение гравия, щебеночных материалов и т.п. не позволяют эффективно использовать пылевидную фракцию шлака, т.н. шлаковую мелочь. Кроме того, протекание процессов выветривания и разрушения структуры шлаков при хранении, ограничивает возможность для использования шлаковых отходов как строительного материала в строительстве «как есть».

### **Исследование исходного гранулированного доменного шлака**

В качестве исходного материала был выбран гранулированный доменный шлак ПАО «Северсталь», город Череповец. Выбор этого предприятия обусловлен достаточно высоким постоянством составов шлаков благодаря использованию собственных месторождений коксующихся углей и железной руды. Состав его шлаков можно считать типичным для всех крупных (т.е. заводы полного цикла, производящие более 3 млн. тонн в пересчете на жидкий металл) ме-

таллургических предприятий РФ благодаря схожести построенных в СССР технологических циклов предприятий. В качестве исходных образцов шлаков были использованы образцы, представленные центральной заводской лабораторией предприятия. Усреднение проб проводилось на предприятии в соответствии с внутренними действующими регламентами.

Исследование фазового и химического составов гранулированного шлака проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL 9900. На основании анализа различной технической литературы по предметной области исследования установлено, что для определения химического состава наиболее удобным является применение спектрометра ARL 9900. Данный прибор производит бесстандартный анализ. Особенностью является то, что ARL 9900 анализирует количество элементов, содержание которых менее 1%. Широкий диапазон – от Be до U также относится к преимуществам прибора. ARL 9900 предназначен для изучения химического состава металлов, руд, бетонных материалов, огнеупоров. Высокая воспроизводимость результатов обеспечивается за счет контроля прибора встроенным процессором. Данные по химическому и фазовому составам показаны в таблице.

**Таблица 1 – Химический состав доменного гранулированного шлака**

Соединение	Содержание, ат. %
Na <sub>2</sub> O	0.28
MgO	12.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.91
SiO <sub>2</sub>	34.85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01
K <sub>2</sub> O	0.43
CaO	40.03
TiO <sub>2</sub>	1.06
MnO	0.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.22
ППП	0.81
Сумма	99.9

Из полученных данных по химическому составу были рассчитаны

Модуль основности  $M_o = 1.19$

Индекс активности  $M_a = 3.19$

Коэффициент основности  $K_o = 1.15$

Коэффициент качества  $K_k = 1.59$

Согласно полученным данным основных параметров для образца граншлака доменного, можно сделать вывод о том, что данный шлак является основным, а значение коэффициента качества показывает, что данный шлак относится к II сорту.

Анализ химического состава шлака показывает наличие малого содержания оксида марганца (не превышает допустимого значения), что не будет оказывать влияние на гидравлические свойства шлака. Кроме того, содержание балластных компонентов, таких как оксид железа, в данном образце незначительно.

Фазы, присутствующие в шлаке, показаны в порядке убывания: мелилит, геленит, марвинит, родонит, муллит. Влажность образца по данным термогравиметрии составляет 1,5%.

Согласно проведенному анализу, химический и фазовый состав образца доменного граншлака, а также незначительная влажность позволяют использовать его в качестве исходного материала ВМШ для получения бесклинкерных вяжущих.

**Таблица 2 – Фазовый состав доменного гранулированного шлака**

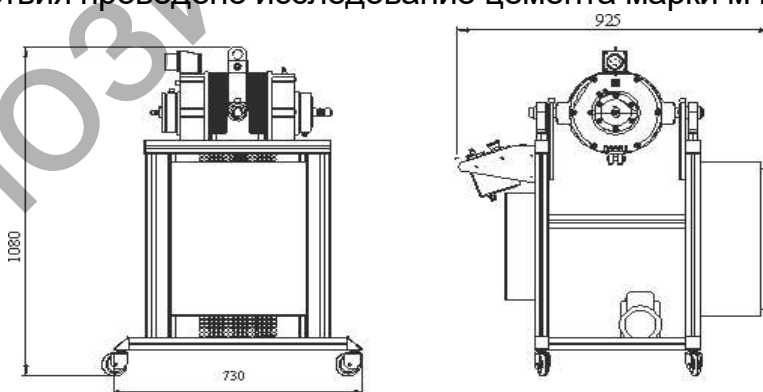
Фаза	Состав
Мелилит	$\text{Ca}_2(\text{Al, Mg, Si})\text{Si}_2\text{O}_7$
Геленит	$2\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$
Маривинит	$\text{CaO} \times \text{MgO} \times 2\text{SiO}_2$
Родонит	$\text{Mn} \times \text{SiO}_2$
Муллит	$\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$
Гидрогеленит	$\text{CaO} \times \text{SiO} \times 13\text{H}_2\text{O}$
Гидроалюминат кальция	$\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$

### Исследование влияния параметров обработки на физико – химические свойства шлака

В настоящей работе для создания технологии получения бесклинкерных вяжущих путем переработки доменных шлаков используется аппарат вихревого слоя (АВС). Данный выбор обоснован рядом технологических преимуществ по сравнению с имеющимися технологическими решениями. Современные технологии включают применение барабанных и планетарных мельниц, но энергоэффективность данных устройств значительно ниже применяемого в данной работе прибора. При проведении работы было установлено, что использование метода АВС позволяет обеспечить существенно более высокую производительность и снизить удельный расход энергии при проведении процесса механической активации шлаковых материалов.

АВС представляет собой электромагнитный индуктор, заключенный в охлаждаемый корпус, в рабочую зону которого помещена сменная вставка из нержавеющей стали с ферромагнитными частицами.

Для проведения исследования по созданию вяжущих материалов было проведено дополнительное обоснование оптимальных параметров работы прибора АВС (рисунок 1). Для проведения оптимизации было проведено исследование влияния режимов обработки на структуры шлаков. В качестве переменных рассматривались соотношение между шлаком и стержнями (магнитные частицы) и время обработки. Исследовалось изменение физико – химических свойств, таких как удельная поверхность, средний размер и морфология частиц. Так же для оценки соответствия проведено исследование цемента марки М400.



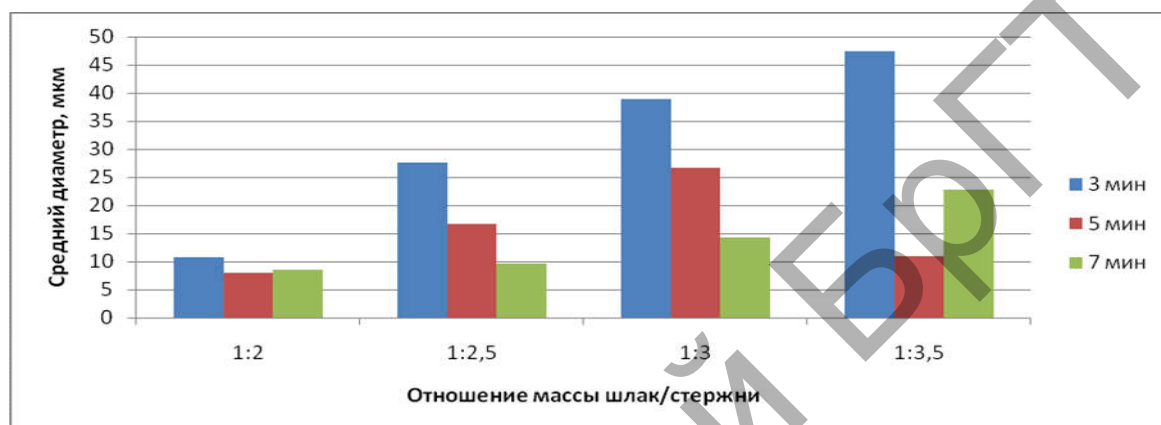
**Рисунок 1 – Внешний вид прибора АВС – 80**

Исследование гранулометрического состава образцов ВМШ после АВС проводилось на анализаторе распределения частиц по размерам Analysette 22. Был рассчитан среднеарифметический диаметр частиц шлака. Расчет производился с применением математического аппарата программного обеспечения, которое используется при работе анализатора частиц. Результаты измерения среднего размера частиц показаны в таблице 3.

**Таблица 3 – Средний диаметр частиц шлака после активации в АВС при различных режимах**

Отношение шлак/цилиндры (масс, г)	3 мин	5 мин	7 мин
1:2	10,77 мкм	8,02 мкм	8,46 мкм
1:2,5	27,57 мкм	16,69 мкм	9,69 мкм
1:3	38,85 мкм	26,58 мкм	14,17 мкм
1:3,5	47,33 мкм	10,91 мкм	22,75 мкм

Средние значения диаметров частиц так же показаны в гистограмме, представленной на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Зависимость среднего размера частиц доменного гранулированного шлака после обработки в АВС от параметров работы прибора**

Анализ представленных зависимостей показал, что повышение времени обработки ВМШ уменьшает средний размер частиц. Однако относительное изменение среднего размера зависит от соотношения между шлаком и стержнями, что показано на рисунке 2. Увеличение данного отношения отрицательно сказывается на среднем размере частиц.

Удельная поверхность измерялась на анализаторе удельной поверхности Nova 1200. Данные представлены в таблице 4.

**Таблица 4 – Данные по удельной поверхности**

Отношение шлак/цилиндры (масс, г)	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г		
	3 мин	5 мин	7 мин
1:2	1,509	2,244	3,267
1:2,5	1,454	2,256	2,154
1:3	1,39	1,362	2,489
1:3,5	0,61	1,379	1,917

Анализ изменения величины удельной поверхности от параметров помола доменного гранулированного шлака показал четкую зависимость – увеличение отношения количества стержней по отношению к ВМШ приводит к значительному снижению удельной поверхности. Стоит отметить, что период помола также сказывается на величине удельной поверхности.

Так же проведено исследование цемента марки М400 для установления соответствия полученных данных. Удельная поверхность цемента марки М400 составила 1,784 м<sup>2</sup>/г, а средний размер частицы 16,66 мкм.

Для оценки энергоэффективности проведено исследование молотого гранулированного шлака, полученного при обработке в шаровой мельнице. Время обработки составило 24 часа, количество обрабатываемого материала 3,12 кг. При исследовании установлено, что в составе образца присутствуют частицы с размером 10 мкм, однако имеются и более крупные с размером более 20 мкм, удельная поверхность – 2,37 м<sup>2</sup>/г.

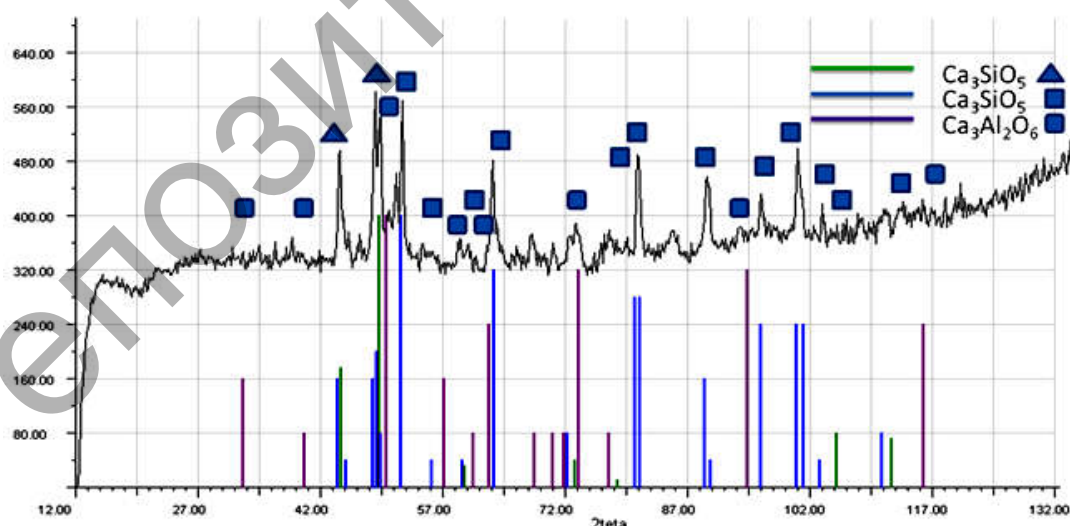
На основе проведенных исследований были получены образцы вяжущих материалов с различными добавками, такими как зола уноса (Рефтинская ГРЭС), NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Добавки были введены непосредственно при обработке гранулированного шлака в приборе ABC. Были приготовлены образцы бетонов модельного состава. Водошлаковое отношение, которое выдерживалось при приготовлении бетонов, составляло 0,22.

Для определения фазового состава вяжущих образцов был применен метод рентгеновской дифракции.

Для проведения исследования были выбраны следующие образцы: портландцемент марки М400, образец бетона, полученный из портландцемента марки М400, гранулированный доменный шлак после помола в ABC, образец бетона из механоактивированного доменного гранулированного шлака, гранулированный доменный шлак после помола с щелочными добавками, образцы бетонов, полученные из доменного гранулированного шлака с щелочными добавками, нормального твердения и с применением ТВО.

Данное исследование проводилось с целью идентификации наличествующих в образцах кристаллических фаз, способных к гидратации при помоле высокоосновных гранулированных доменных шлаков в ABC, а также с целью получения информации о влиянии щелочных добавок на возможность образования гидратируемых фаз при механохимической активации ВМШ.

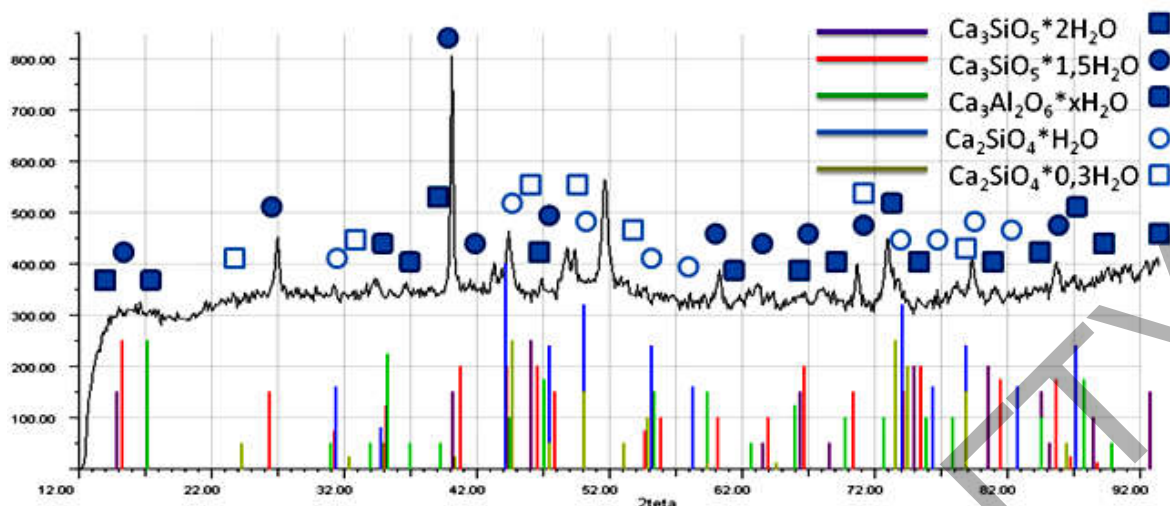
Для исследования наличия гидратируемых фаз было проведено исследование тестового образца портландцемента марки М400 (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Дифрактограмма образца портландцемент М400

В составе образца ПЦ М400 присутствуют гидратируемые фазы алита (С3S) и белита (С2S). Суммарное содержание данных фаз в портландцементе может находиться на уровне 59–90%. Данные фазы являются основными в клинкере, они определяют его высокую прочность при отверждении. Стоит отметить, что для цементов высоких марок важно содержание фазы алита размером 4–20 мкм.

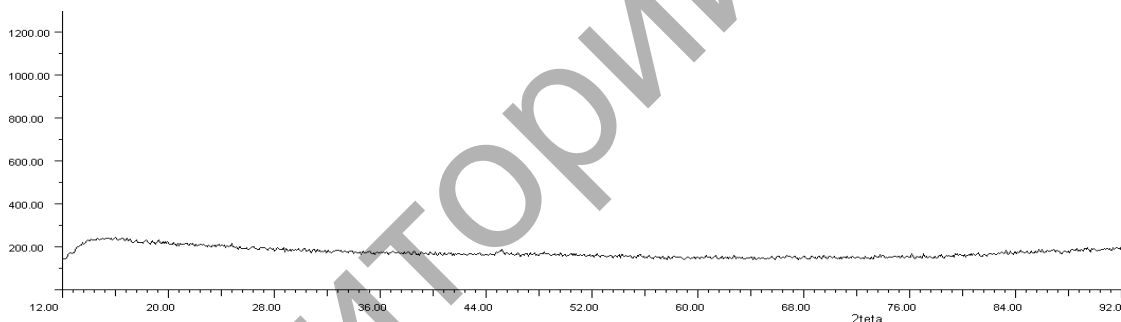
Результат исследования бетона на основе цемента М400 показан на рисунке 4.



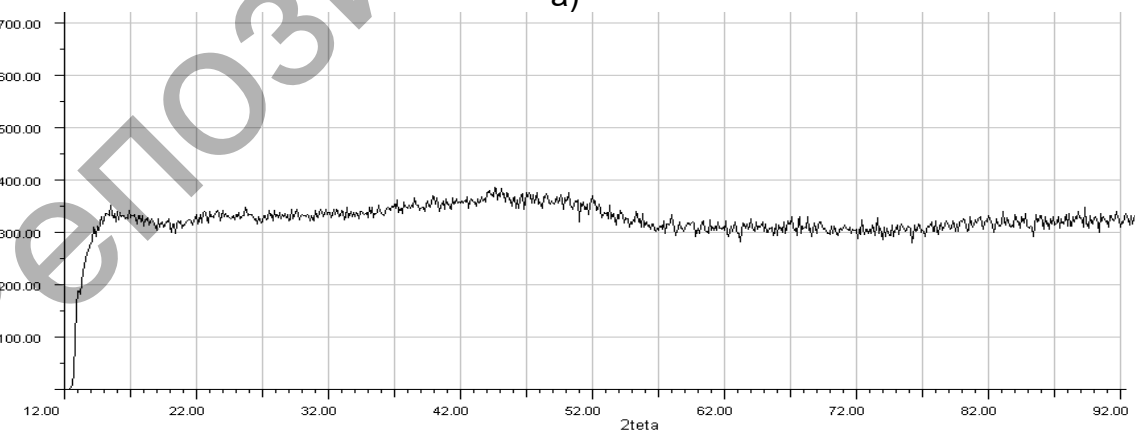
**Рисунок 4** – Дифрактограмма образца бетона на основе портландцемента М400

На рисунке 4 показана дифрактограмма бетона на основе портландцемента М400. Отмечено наличие гидратированных фаз алита и белита. Дифракционные максимумы показывают наличие фаз с разной степенью гидратации.

Дальнейшее исследование проводилось с доменным гранулированным шлаком. На рисунке 5 показаны дифрактограммы ВМШ.



а)



б)

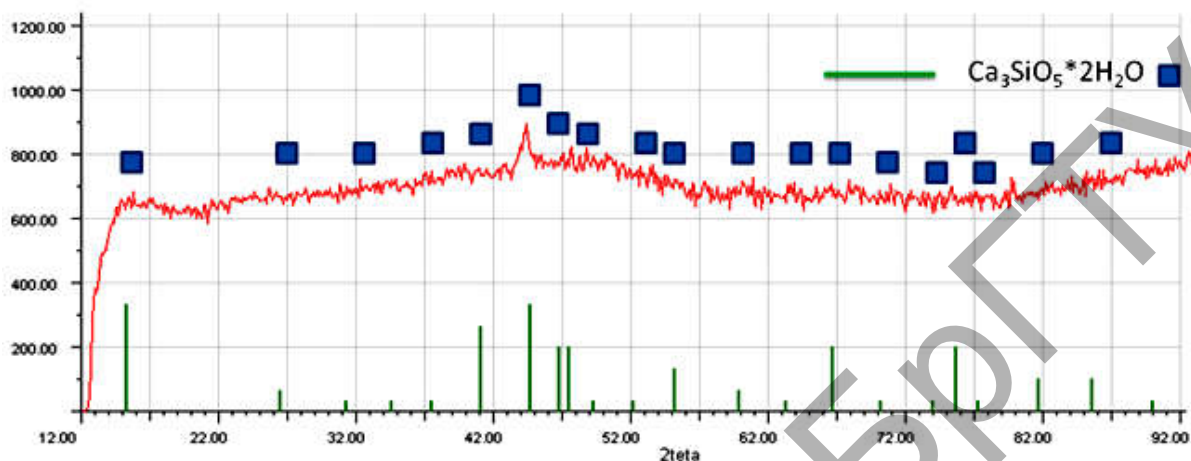
**Рисунок 5** – Дифрактограмма образца ВМШ: а) не обработанный, б) после механохимической активации с использованием АВС

Оба представленных образца имеют аморфную структуру, что показывает аморфное гало и отсутствие выраженных пиков рентгеновской дифракции. Количество аморфной фазы значительно превышает количество кристаллической фазы.



Необходимо отметить, что при механохимической активации с использованием АВС в образцах образуется некоторое количество кристаллической фазы, точное определение которой затруднено. Предположительно данная фаза является одной из модификаций фазы алита.

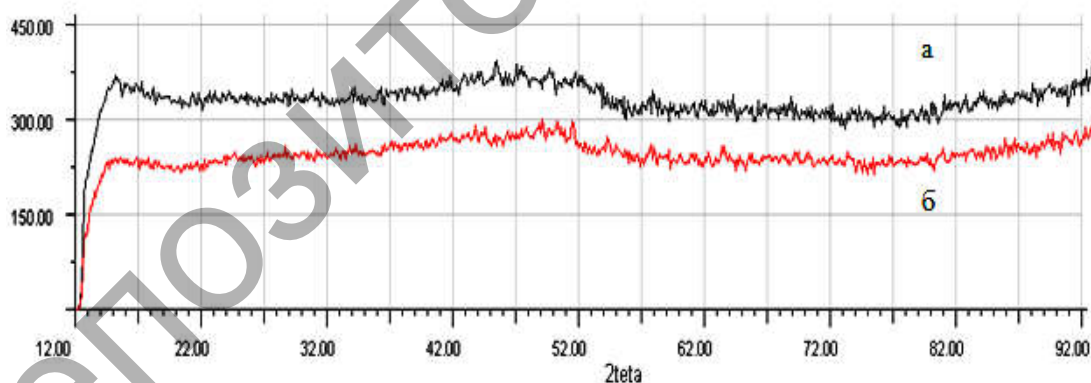
Дифрактограмма образца бетона на основе шлака без дополнительных добавок показана на рисунке 6.



**Рисунок 6** – Дифрактограмма образца бетона на основе ВМШ

На дифрактограмме образца бетона на основе ВМШ (рисунок 6) наблюдаются пики, которые соответствуют гидратированной фазе алита, что подтверждает предположение относительно наличия фазы алита в ВМШ после помола в АВС. Наличие данной фазы обеспечивает прочность отвержденных образцов бетонов на основе ВМШ.

Изменение фазового состава при давлении  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  показано на рисунке 7.

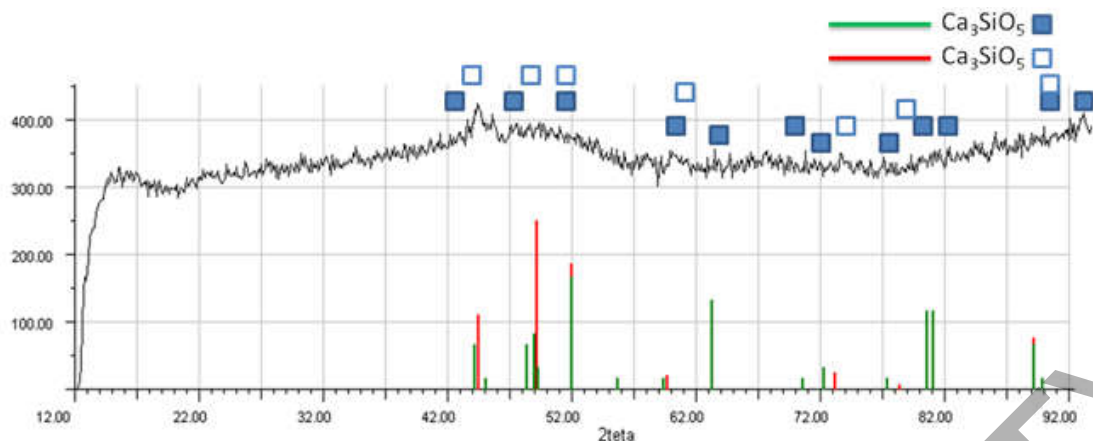


**Рисунок 7** – Дифрактограмма образца: а) шлак после АВС-обработки с добавлением  $\text{NaOH}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , б) бетон на основе шлака после АВС-обработки с добавлением  $\text{NaOH}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

На рисунке 8 показаны дифрактограммы шлака и бетона на основе шлака после АВС-обработки с добавлением щелочных компонентов. Стоит отметить, что структура механоактивированного шлака с щелочными компонентами в целом совпадает со структурой чистого механоактивированного шлака. Образец бетона на основе шлака с добавлением щелочного компонента не имеет в своем составе достаточного количества гидратированных фаз, что сказывается на прочностных свойствах данного материала.

Дифрактограмма вяжущего на основе ВМШ с  $\text{NaOH}$  показана на рисунке 8.

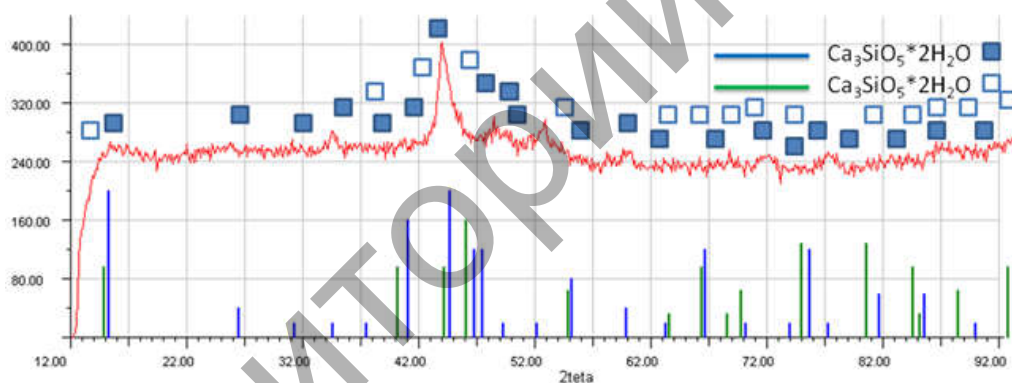




**Рисунок 8** – Дифрактограмма образца ВМШ после помола в АВС с добавлением NaOH

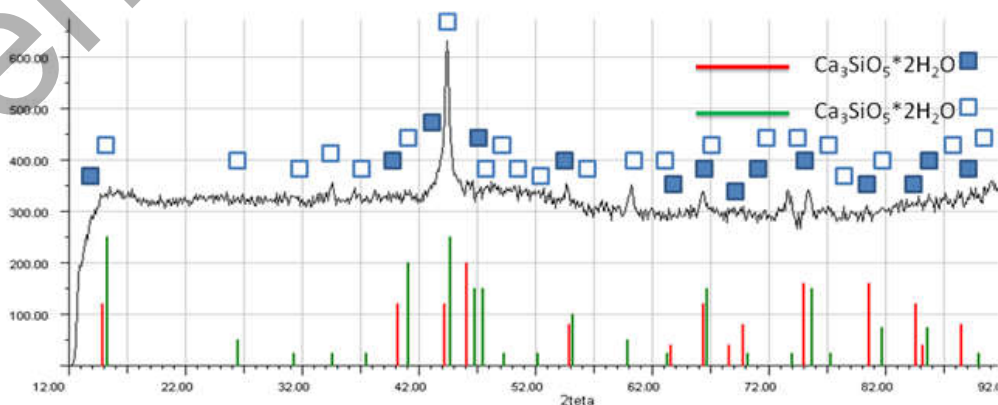
На рисунке 8 показана дифрактограмма образца ВМШ после помола в АВС с добавлением NaOH. Максимумы, которые присутствуют на дифрактограмме, показывают наличие фаз алита в различных модификациях. Отмечено, что содержание кристаллической фазы превышает содержание таковой в образце чистого шлака.

Дифрактограмма образца бетона нормального твердения на основе ВМШ с добавлением NaOH, приведенная на рисунке 9, показывает наличие гидратированных фаз. Содержание кристаллической фазы в данном образце значительно выше образцов бетонов, полученных с использованием чистого ВМШ.



**Рисунок 9** – Дифрактограмма образца бетона на основе ВМШ с добавлением NaOH

На рисунке 10 показана дифрактограмма образца бетона, прошедшего ТВО, с добавлением NaOH. Гидратированные фазы алита, присутствующие в образце, выражены значительно сильнее, чем в образце нормального твердения.



**Рисунок 10** – Дифрактограмма образца бетона на основе ВМШ с добавлением NaOH после ТВО

Исследование прочностных свойств полученных бетонов проводилось на образцах кубической формы с ребром 2 см. Исследование проводилось с применением разрывной машины Instron 150 LX. Результаты исследования показаны в таблице 5.

**Таблица 5 – Результаты прочностных испытаний бетонов на основе бесклинкерных вяжущих**

Образец	Прочность
ПЦ М400	39,5 МПа
ВМШ + 5% ЗУ	42,1 МПа
ВМШ + 7% NaOH (1:2.5)	32,3 МПа
ВМШ + 1% SiO <sub>2</sub> (1:3)	39,4 МПа

Авторы работы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ за финансовую поддержку (проект RFMEFI57814X0099)

### Список литературы

1. Escalante Garcia J.I, Mendez Nonell J., Gorokhovskiy A., Fraire Luna P.E., Mancha Molinar H., Mendoza Suarez G., Reactividad y propiedades mecanicas de escoria de alto horno activada por alcalis, Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio, 2002, Vol.41, No 5, 451–458.

2. Рекомендации по изготовлению шлакощелочных бетонов и изделий на их основе. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 55с.

3. Боженов П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология. – М.: изд-во АСВ, 1994. – 264 с.

4. Горшков, В.С., Александров, С.Е., Иващенко, С.И., Горшкова, И.В. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве. – М. : Стройиздат, 1985. – 273 с.

УДК 697.922.2

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ АЭРОСТАТИКИ, АЭРОДИНАМИКИ, ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА АЭРАЦИИ ЦЕХОВ С ТЕПЛОИЗБЫТКАМИ

**Широкова О.Н., Липко В.И.**

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, Республика Беларусь, [kafedratsv@mail.ru](mailto:kafedratsv@mail.ru)

*The article outlines the conceptual possibilities and methods of physico-mathematical modeling of static, dynamic and heat and mass transfer processes in the shops of the extract in terms of exposure to gravitational forces and wind pressure on the building when natural ventilation is active by a method of aeration by the "bottom-up".*

### Введение

Технология литейного производства характеризуется значительными теплоизбытками, выделяющимися в рабочую зону от технологических печей, технологического оборудования, нагретых и расплавленных металлов непрерывно или длительно по времени в виде радиационной лучистой тепловой энергии от нагретых поверхностей и конвективной составляющей теплового потока в виде горячих газов или перегретого воздуха, вследствие чего значительно ухудшаются условия труда работающих.