

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

---

ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ  
МЕН ТЕХНИКАСЫ

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



НАУКА И ТЕХНИКА  
КАЗАХСТАНА

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2024)

---

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**  
выходит 1 раз в квартал

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ KZ51VPY00036165

выдано

Министерством информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем  
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,  
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

**Подписной индекс – 76129**

<https://doi.org/10.48081/IYNS2338>

**Импакт-фактор РИНЦ – 0,342**

---

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);  
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);  
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);  
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);  
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);  
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);  
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);  
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);  
Зарубежные члены редакционной коллегии:  
Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);  
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);  
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);  
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);  
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);  
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);  
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);  
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);  
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);  
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);  
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);  
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);  
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

**П. О. Быков<sup>1</sup>, А. К. Жунусова<sup>2</sup>, \*А. Б. Куандыков<sup>3</sup>,  
Р. Б. Муканов<sup>4</sup>, Э. Сименс<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

<sup>4</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>5</sup>Университет прикладных наук Анхальта, Федеративная Республика Германия, г. Кётен

\*e-mail: [azeka200892@mail.ru](mailto:azeka200892@mail.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7540-7882>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8842-6433>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6075-1603>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9637-0513>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2986-3614>

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ДОИЗВЛЕЧЕНИЮ ЖЕЛЕЗА ИЗ БОКСИТОВ КАЗАХСТАНА АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ (ВОССТАНОВЛЕНИЕ УГЛЕРОДОМ)**

*Авторами проведен анализ возможности вовлечения в переработку железосодержащих отходов, образующихся при производстве глинозема из бокситов Казахстана с использованием альтернативных углероду (C и CO) восстановителей – водорода (H<sub>2</sub>) и метана (CH<sub>4</sub>).*

*В данной статье представлены результаты первого этапа экспериментальных исследований по использованию кокса для восстановления минералов, входящих в состав железистых песков и отвальных шламов.*

*Экспериментально установлено, что лимитирующей стадией процесса является процесс разделения образованных чугуна и шлака, который из-за высокого содержания оксидов алюминия в шлаке не протекает в полной мере при температуре 1200 – 1300 °С, что требует увеличения температуры протекания процесса до 1400 – 1500 °С и увеличения количества извести в рудоугольных брикетах.*

*В работе запланированы дальнейшие исследования по восстановлению железа из железистых песков и отвальных шламов производства глинозема с использованием восстановителей альтернативных углероду (коксу).*

*Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по конкурсу на грантовое финансирование по научным и (или) научно-техническим проектам на 2024-2026 годы по проекту АР23487674 «Комплексная переработка бокситов Казахстана с доизвлечением железа альтернативными восстановителями при реализации стратегии низкоуглеродистого развития».*

*Ключевые слова: боксит, железо, глинозем, углеродная нейтральность, кокс, рециклинг.*

### **Введение**

Республика Казахстан в новом Экологическом кодексе, утвержденном в 2021 и других нормативных документах продвигает вопросы устойчивого развития, которые включают в себя задачи развития замкнутых циклов производств, «постоянный круговорот материалов при производстве и потреблении, исключая образование отходов, накапливающихся в окружающей среде», путей достижения углеродной нейтральности до 2060 года [1–7].

В Павлодарской области Республики Казахстан основными видами промышленных отходов при переработке руд и сжигания энергетических углей являются золошлаковые отходы тепловых электростанций, отходы металлургических предприятий от производства стали, глинозема, алюминия и ферросплавов, химических производств. Вопросами комплексного использования руд и вовлечения переработку промышленных отходов занимаются ряд научных коллективов, которыми успешно проведены исследования и предложены варианты дальнейшего использования отходов в металлургии для доизвлечения металлов и в строительной индустрии для производства бетона и изделий из него [8–19].

Анализ показывает, что предлагаемые авторами исследований варианты по вовлечению в переработку металлосодержащих отходов для доизвлечения металлов в качестве восстановителей используют углеродсодержащие материалы, которые отрицательно влияют на экологию, образуя выбросы CO и CO<sup>2</sup>, тем самым не способствуют успешному достижению заявленной Казахстаном углеродной нейтральности до 2060 года.

В целом в мире основным восстановителем для металлов остаётся углерод, что требует разработки новых более «экологичных» вариантов производства металлов для достижения Целей устойчивого развития ООН и углеродной нейтральности в металлургии.

При производстве глинозёма из низкокачественных бокситов Казахстана на Павлодарском алюминиевом заводе используют «последовательно-параллельную схему Байер-спекание». Данный способ обусловлен химическим составом бокситов, поступающих на переработку [20]. Для снижения негативного влияния на технологические переделы производства глинозема бокситовых примесей, поступление которых в производственный цикл с переработкой краснооктябрьского боксита по Байеровской технологии увеличилось в несколько раз, разработаны и внедрены две схемы обогащения боксита на стадии размола: схема вывода каолиновой составляющей и схема вывода железистых песков [20].

В настоящее время образующиеся железистые пески направляются на шламовые поля и являются отходами.

### **Материалы и методы**

Авторами проведен анализ возможности вовлечения в переработку железосодержащих отходов, образующихся при производстве глинозема из бокситов Казахстана с использованием углеродистых (C и CO) и альтернативных углероду восстановителей – водорода (H<sub>2</sub>) и метана (CH<sub>4</sub>).

В данной статье представлены результаты первого этапа экспериментальных исследований по использованию кокса для восстановления минералов, входящих в состав железистых песков и отвальных шламов.

Состав железосодержащих отходов глиноземного производства Павлодарского алюминиевого завода приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав железосодержащих шламов Павлодарского алюминиевого завода [20]

Компоненты, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
Железистые пески	17–20	0,5–0,8	52–56	4,6–5,6	6,2–8,2	2–3	9–12,0	2,2–3,0
Отвальные шламы	4,3–5,0	0,9–1,5	27–32	39–44	19–21	≤2	0,8–1,0	

Объем образующихся железистых песков определяется уровнем производства глинозема в АО «Алюминий Казахстана». При современном уровне производства в АО «Алюминий Казахстана» (~1,6 миллиона тонн глинозема в год) с железистыми песками теряется до 220 тысяч тонн Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> поступающего с бокситом и до 75 тысяч тонн Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Гранулометрический состав железистых песков колеблется в пределах от 0,15 до 5 мм и определяется технологическими параметрами процесса их вывода при реализации схемы обогащения боксита с выводом железистых песков в АО «Алюминий Казахстана» [20].

Основными минералами железистых песков, выделяемых при обогащении Краснооктябрьских бокситов на АО «Алюминий Казахстана» являются гематит (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), сидерит (FeCO<sub>3</sub>), пирит (FeS<sub>2</sub>), магнетит (FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), гетит (FeO(OH)), кальцит (CaCO<sub>3</sub>), гиббсит (Al(OH)<sub>3</sub>) и др. [20].

Объем образующихся отвальных шламов существенно больше железистых песков, однако содержание оксидов железа в них существенно меньше. В отвальных шламах представлены аналогичные железистым пескам минералы [20].

Объектом исследования являлись железистые пески АО «Алюминий Казахстана» и технология твердофазного восстановления железа. Химический состав железистых песков приведен в таблице 1.

Общий вид железистых песков приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Железистые пески АО «Алюминий Казахстана»

Получение железа из железистых песков осуществлялось из рудугольных брикетов (рисунок 2).



Рисунок 2 – Общий вид рудоугольных брикетов

В качестве материалов для изготовления рудоугольных брикетов использовались следующие материалы:

- железистые пески АО «Алюминий Казахстана»;
- Экибастузский уголь;
- металлургический кокс;
- свежесожженная известь;
- бентонит.

Экибастузский уголь и металлургический кокс чередовался при изготовлении брикетов разных партий.

Характеристика Экибастузского угля. Уголь высокозольный (более 40 %), с относительно высоким содержанием примесей:

- тип угля Экибастузский 1СС;
- общая влага в рабочем состоянии топлива – 6,5 %;
- влага гигроскопическая – 4 %;
- зольность в сухом состоянии топлива – 36,9 %;
- сера общая в сухом состоянии топлива – 0,7 %;
- летучие вещества в сухом беззольном состоянии топлива – 25 %;
- низшая теплота сгорания в рабочем состоянии топлива – 17,38 МДж/кг;
- коэффициент размолоспособности топлива методом ВТИ – 1,29;
- сера колчеданная в сухом беззольном состоянии топлива – 0,3 %;
- сера органическая в сухом беззольном состоянии топлива – 0,4 %;
- углерод в сухом беззольном состоянии топлива – 44,8 %;
- водород в сухом беззольном состоянии топлива – 3 %;
- азот в сухом беззольном состоянии топлива – 0,8 %;
- кислород (по разности) в сухом беззольном состоянии топлива – 7,3 %.

Химический состав металлургического кокса приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав металлургического кокса

Компоненты, %	C	S	A	V	W
Металлургический кокс	78,69	0,63	1,87	0,65	0,63

Химический состав свежееобожженной извести приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав свежееобожженной извести

Компоненты, %	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S
Свежееобожженная известь	88	2	1,5	1,5	0,15

Подобно другим процессам производства чугуна, на производственные и экономические показатели процесса твердофазного восстановления оказывают влияние примеси в железорудном сырье, в особенности глинозём (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Важнейшей стадией процесса является разделение шлака и металла, для образования чугунных корольков более благоприятны кремнистые руды с относительно низкой температурой ликвидуса образованного шлака. В исследуемых железистых песках главной примесью является глинозём, что обуславливает высокую температуру ликвидуса и затрудненное образование металлических корольков из-за плохого разделения шлака и металла.

В работе была поставлена задача выявления влияния глинозёма на разделение шлака и металла, степень восстановления оксидов железа, а также влияние содержания углерода, температуры восстановления и величины добавки извести на разделение шлака и металла с образованием металлических корольков из железистых песков.

Как известно, при переработке железных руд процессом ПТмкЗ, рудоугольные окатыши, содержащие мелкозернистую руду, загружают в два или три слоя в печь с вращающимся подом. Когда окатыши нагревается до температуры около 1300–1400 °С оксида железа, происходит его частичное или полное расплавления и насыщение углеродом. Оксиды из состава руды, зола угля и вяжущие взаимодействует с образованием шлака. Чтобы облегчить разделение металла и шлака и образования чугунных корольков, температуру восстановления в этом процессе поддерживает несколько выше температуры ликвидуса науглероженного металла и шлака. Разделение шлака и металла является ключевой стадией данного процесса. Чугунные корольки содержат 3–5 % углерода и пригодны для переработки в дуговой печи или кислородном конверте в качестве заменители лома.

В ходе исследования были приготовлены брикеты из следующих материалов: железистые пески АО «Алюминий Казахстана»; Экибастузский уголь; металлургический кокс; свежееобожженная известь; бентонит. Брикеты были высушены при температуре 110 0С в течении 60 минут и далее прессовались при усиллии 5кН на универсальной испытательной машине WDW-200.



Рисунок 3 – Изготовление рудоугольного брикета на универсальной испытательной машине WDW-200

Рудоугольные брикеты имели следующие размеры: диаметр – 27 мм, высота – 20 мм (рисунок 2.2), масса брикетов составляла 17 грамм.

Каждая серия экспериментов осуществлялась из рудоугольных брикетов с различным соотношением и фракцией компонентов (таблица 4).

Таблица 4 – Состав и фракция компонентов по различным сериям экспериментов

Серия экспериментов	№ 1		№2		№3	
П о д с е р и я экспериментов	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
Состав рудоугольных брикетов, %						
Железистые пески	60	60	65	65	70	70
Кокс металлургический	20	20	15	15	10	10
Известь	10	10	10	10	10	10
Бентонит	10	10	10	10	10	10
Вода (сверх 100 %)	15	15	15	15	15	15
Фракция компонентов рудоугольных брикетов, мм						
Железистые пески	0,63	0,4	0,63	0,4	0,63	0,4
Кокс металлургический	0,63	0,4	0,63	0,4	0,63	0,4
Известь	0,63	0,4	0,63	0,4	0,63	0,4

Выбор соотношения компонентов и фракции осуществлялся из следующих соображений:

- величина фракции выбрана в пределах 0,4 – 0,63 мм, учитывая, что фракция железистых песков АО «Алюминий Казахстана» находится в пределах от – 2 до + 0 мм, причем фракция от + 0,63 до + 0,15 составляет более 64 %;

- количество кокса металлургического выбиралось из технологических соображений – дальнейшего получение полностью или частично восстановленных брикетов;

- количество извести бралось достаточным для образования жидкого шлака;

- количество бентонита бралось в количестве необходимом для получения брикета с необходимой сырой прочностью, при этом учитывалось, что увеличение связующего в дальнейшем снижает степень восстановимости железа.

Далее рудоугольные брикеты каждой серии экспериментов восстанавливались в муфельной печи при температуре 1200 °С и 1300 °С. Общий вид брикетов восстановленных при различной температуре приведен на рисунке 4.



а)

б)

а) – брикеты восстановленные при температуре 1200 °С; б) – брикеты восстановленные при температуре 1300 °С;

Рисунок 4 – Восстановленные брикеты (чугун + шлак)

Далее осуществляли дробление восстановленных брикетов и магнитную сепарацию металлической фазы и шлака.

#### **Результаты и обсуждение**

Из экспериментальных данных можно отметить, что на протекание процесса твердофазного восстановления железа и дальнейшее разделение металла и шлака оказывает влияние температура процесса, количество углерода (кокса) и извести.

Из рисунка 4 видно, что при температуре 1200 °С в восстановленных брикетах не произошло расплавление металла и шлака и тем самым процесс разделения металла и шлака не произошел.

В брикетах восстановленных при температуре 1300 °С (рисунок 4) видно, что процесс расплавления произошел, тем самым были созданы условия для разделения чугуна и шлака.

Следует отметить, что на процесс разделения чугуна и шлака, оказало сильное влияние высокое содержание оксидов алюминия в железистых песках АО «Алюминий Казахстана», образовавшиеся шлаки имеют более высокую температуру плавления, что в итоге препятствовало объединению расплавленных капель, образовавшегося чугуна.

Таким образом, для успешного протекания процесса необходимо дальнейшее увеличение температуры процесса до 1400–1500 °С. Однако повышение температуры ведет к снижению технико-экономических показателей процесса, что лимитирует данный процесс.

#### **Выводы**

По результатам первого этапа проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– исследованы основные характеристики железосодержащих отходов глиноземного производства Павлодарского региона и установлено, что наиболее

подходящими для переработки на чугун являются железистые пески (хвосты обогащения Краснооктябрьских бокситов), содержащие более 50 % оксидов железа. Основными минералами являются: гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), сидерит ( $\text{FeCO}_3$ ), пирит ( $\text{FeS}_2$ ), магнетит ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), гетит ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ), гиббсит ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) и др. Гранулометрический состав железистых песков колеблется в пределах от 0,15 до 5 мм;

– установлено, что годовой объем образующихся железистых песков позволяет обеспечить производство чугуна до 100–150 тысяч тонн;

– экспериментально установлена возможность получения чугуна из железосодержащих отходов глиноземного производства Павлодарского региона твердофазным восстановлением;

– экспериментально установлено, что лимитирующей стадией процесса является процесс разделения образованных чугуна и шлака, который из-за высокого содержания оксидов алюминия в шлаке не протекает в полной мере, что требует увеличения температуры протекания процесса до 1400 – 1500 °С и увеличения количества извести в брикетах;

– в работе запланированы дальнейшие исследования по восстановлению железа из железистых песков и отвальных шламов производства глинозема с использованием восстановителей альтернативных углероду (коксу).

#### **Информация о финансировании**

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по конкурсу на грантовое финансирование по научным и (или) научно-техническим проектам на 2024-2026 годы по проекту AP23487674 «Комплексная переработка бокситов Казахстана с доизвлечением железа альтернативными восстановителями при реализации стратегии низкоуглеродистого развития».

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 Экологический кодекс Республики Казахстан, утвержденный Президентом РК от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК.

2 Концепция развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 20 декабря 2018 года № 846.

3 Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121.

4 Казахстан 2019: Добровольный национальный обзор о реализации Повестки до 2030 года в области устойчивого развития, 2019. – 160 с.

5 Казахстан 2022: Добровольный национальный обзор о реализации Повестки до 2030 года в области устойчивого развития, 2022. – 258 с.

6 Завтра было поздно. Экологические риски Казахстана / под рук. Сатпаева Д.А., Януш-Павлетта Б. – Алматы : 2021. – 300 с.

7 Диагностика горнорудного сектора – Казахстан: Отчет. – The World Bank, 2023. – 123 с.

8 **Abdrakhmanov, Y. S., Bykov, P. O., Bogomolov, A. V.** Thermal Capacity of Enriched Fuel Briquets Produced from the Fine of Ekibastuz Coal // *Solid State Phenomena*, 2018. – Vol. 284. – P. 731–736.

9 **Kaliakparov, A. G., Suslov, A. V., Nurmaganbetova, B. N., Yaroshenko, Y. G., Zhdanov, A. V., Nurmaganbetov, Z. O.** Smelting of high-carbon ferrochrome from chromium agglomerate produced with alumina-silica flux // *Steel in Translation*, Volume 47, Issue 1, 1 January 2017, P. 65–69.

10 **Zhunusov, A., Tolymbekova, L., Abdulabekov, Ye., Zholdubayeva, Zh. Bykov, P.** Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan // *Metallurgija*, 2021. – 60 1–2, P. 101–103.

11 **Ibraev, I. K., Ibraeva, O. T., Suyundikov, M. M.** Recycling chromium-bearing wastes // *Metallurgist*, Volume 56, Issue 9–10, January 2013, P. 727–730.

12 **Торпищев, Ш. К.** Легкие бетоны с использованием бокситовых шламов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, – Москва: Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона Госстроя СССР, 1991.

13 **Арынгазин, К. Ш., Ларичкин, В. В., Алдунгарова, А. К., Свидерский А. К., Богомоллов, А. В., Быков, П. О., Глеулесов, А. К., Маусымбаева, Д. К.** Инновационное использование твердых техногенных отходов предприятий теплоэнергетики и металлургии Павлодарской области в производстве строительных материалов // *Наука и техника Казахстана*, 2016. – № 3–4. – С. 34–39.

14 **Zhunusov, A. K., Bykov, P. O., Kenzhebekova, A. Ye., Zhunussova, A. K., Rahmat Azis Nabawi.** Study of the isothermal kinetics of reduction from mill scale // *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra*, 2024, №1(328). – P. 59 – 67.

15 **Zhunussova, A. K., Bykov, P. O., Zhunusov, A. K., Kenzhebekova, A. Ye.** Research of the production of iron ore sinter from bauxite processing waste // *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra*, 2024. – №2(329). – P. 73–81.

16 **Spreitzer, D., Schenk, J.** Reduction of Iron Oxides with Hydrogen – A Review // *Steel research*, 2019. – <https://dx.doi.org/10.1002/srin.20190108>

17 **Rukini, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G. A., Van den Bulck A.** Metals Production and Oxides Reduction Using Hydrogen : A Review // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2022. – 8:1-24. <https://dx.doi.org/10.1007/s40831-021-00486-5>.

18 **Zenkov, V. S., Pasichnyi, V. V., Red'ko, V. P.** Reduction of iron-conyaaining metallurgical waste to obtain hydrogen with iron vapor method // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 47, Nos.11–12, 2008. – P. 733–742.

19 **Plaul, J. F., Krieger, W., Back, E.** Reduction of Fine Ores in Argon-Hydrogen Plasma // *Steel Research*, 76 (2005), № 8.

20 **Ибрагимов, А. Т., Будон, С. В.** Развитие технологии производства глинозема из бокситов Казахстана. – Павлодар, 2010. – 304 с.

## REFERENCES

1 Ecologicheskii kodeks Respubliki Kazakhstan ot 02.01.2021 №400-VI ZRK (s izmeneniyami ot 05.07.2023 №17-VIII) [Environmental Code of the Republic of Kazakhstan, approved by the President of the Republic of Kazakhstan dated January 2, 2021 No. 400-VI ЗРК]

2 Koncepciya razvitiya obrabatyvayuscheii promyshlennosti Respubliki Kazakhstan na 2023 – 2029 gody, utverzhdannaya Pravitelstvom Respubliki Kazakhstan ot 20 decabriya 2018 goda № 846. [Concept of Development of the Manufacturing Industry of the Republic of Kazakhstan for 2023–2029, approved by the Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated December 20, 2018 No. 846.]

3 Strategiya dostizheniya uglerodnoi ntitralnosti Respubliki Kazakhstan do 2060 goda, utverzhdannaya Ukazom Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 2 fevraliya 2023 goda № 121. [On Approval of the Strategy for Achieving Carbon Neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060, Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated February 2, 2023 No. 121.]

4 Kazakhstan 2019: Dobrovolnyi nacionalnyi obzor o realizacii Povestki do 2030 goda v oblasti ustoichivogo razvitiya [Kazakhstan 2019: Voluntary National Review on the Implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development], 2019. – 160 p.

5 Kazakhstan 2022: Dobrovolnyi nacionalnyi obzor o realizacii Povestki do 2030 goda v oblasti ustoichivogo razvitiya [Kazakhstan 2022: Voluntary National Review on the Implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development], 2022. – 258 p.

6 Zavtra bylo pozdno. Ecologicheskie ryski Kazakhstana [Tomorrow was too late. Environmental risks of Kazakhstan] / under the supervision of Satpayev D.A., Janusz-Pavletta B. – Almaty: 2021. – 300 p.

7 Diagnostika gornorydnogo sektora – Kazakhstan [Diagnostics of the mining sector - Kazakhstan]: Report. – The World Bank, 2023. – 123 p.

8 **Abdrakhmanov, Y. S., Bykov, P. O., Bogomolov, A. V.** Thermal Capacity of Enriched Fuel Briquets Produced from the Fine of Ekibastuz Coal // Solid State Phenomena, 2018. – Vol. 284. – P. 731–736

9 **Kaliakparov, A. G., Suslov, A. V., Nurmaganbetova, B. N., Yaroshenko, Y. G., Zhdanov, A. V., Nurmaganbetov, Z. O.** Smelting of high-carbon ferrochrome from chromium agglomerate produced with alumina-silica flux // Steel in Translation, Volume 47, Issue 1, 1 January 2017, P. 65 – 69.

10 **Zhunusov, A., Tolymbekova, L., Abdulabekov, Ye., Zholdubayeva, Zh. Bykov P.** Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan // Metallurgija 60. – 2021. 1–2. – P. 101–103.

11 **Ibraev, I. K., Ibraeva, O. T., Suyundikov, M. M.** Recycling chromium-bearing wastes // Metallurgist, Vol.56, Issue 9–10, January 2013. – P. 727–730.

12 **Torpischev, Sh. K.** Legkie betony s ispolzovaniem boksitovyh shlamov: dissertaciya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tehnikeskikh nauk [Lightweight concretes using bauxite slurries: dissertation for the degree of candidate of technical

sciences], - Moscow: Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete of the USSR Gosstroy, 1991.

13 **Aryngazin, K. Sh., Larichkin, V. V., Aldungarova, A. K., Sviderskii, A. K., Bogomolov, A. V., Bykov, P. O., Tleulessov, A. K., Mausymbayeva, D. K.** Innovacionnoe ispolzovanie tverdyh tehnogenykh othodov predpriyatii teploenergetiki I metallurgii Pavlodarskoi oblasti v proizvodstve stroitelnykh materialov [Innovative use of solid technogenic waste from thermal power engineering and metallurgy enterprises of the Pavlodar region in the production of building materials] // Science and Technology of Kazakhstan, 2016. – № 3. – 4. – P. 34–39.

14 **Zhunosov, A. K., Bykov, P. O., Kenzhebekova, A. Ye., Zhunussova, A. K., Rahmat Azis Nabawi.** Study of the isothermal kinetics of reduction from mill scale // Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra, 2024. – № 1(328). – P. 59–67.

15 **Zhunussova, A. K., Bykov, P. O., Zhunosov, A. K., Kenzhebekova, A. Ye.** Research of the production of iron ore sinter from bauxite processing waste // Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra, 2024, №2(329). – P. 73–81.

16 **Spreitzer, D., Schenk, J.** Reduction of Iron Oxides with Hydrogen – A Review // Steel research, 2019. <https://dx.doi.org/10.1002/srin.20190108>

17 **Rukini, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G. A., Van den Bulck A.** Metals Production and Oxides Reduction Using Hydrogen : A Review // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2022. – 8:1-24. – <https://dx.doi.org/doi.org/10.1007/s40831-021-00486-5>.

18 **Zenkov, V. S., Pasichnyi, V. V., Red’ko, V. P.** Reduction of iron-conyaaining metallurgical waste to obtain hydrogen with iron vapor method // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 47, Nos.11–12, 2008. – P. – 733 – 742.

19 **Plaul, J. F., Krieger, W., Back, E.** Reduction of Fine Ores in Argon-Hydrogen Plasma // Steel Research, 2005. – 76. – № 8.

20 **Ibragimov, A. T., Budon, S. V.** Razvitie tehnologii proizvodstva glinozema iz boksitov Kazakhstana [Development of technology for the production of alumina from bauxites of Kazakhstan]. – Pavlodar, 2010. – 304 p.

Поступило в редакцию 24.08.24.

Поступило с исправлениями 25.08.24.

Принято в печать 29.08.2024.

**П. О. Быков<sup>1</sup>, А. К. Жунусова<sup>2</sup>, \*А. Б. Куандыков<sup>3</sup>, Р. Б. Муканов<sup>4</sup>, Э. Сименс<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

<sup>4</sup>Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>5</sup>Анхальт қолданбалы ғылымдар университеті, Германия Федеративтік Республикасы, Кетен қ.

24.08.24 ж. баспаға түсті.

25.08.24 ж. түзетулерімен түсті.

29.08.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

**ҚАЗАҚСТАН БОКСИТТЕРІНЕН ТЕМІРДІ БАЛАМАЛЫ  
ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРҒЫШТАРМЕН  
(КӨМІРТЕКТІ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРУ) АЛУ БОЙЫНША  
САЛЫСТЫРМАЛЫ ЗЕРТТЕУЛЕР**

*Авторлар көміртегіге (C және CO) балама тотықсыздандырғыштар – сутегі (H<sub>2</sub>) және метан (CH<sub>4</sub>) пайдалана отырып, Қазақстан бокситтерінен алюминий тотығын өндіру кезінде түзілетін құрамында темір бар қалдықтарды өңдеуге тарту мүмкіндігіне талдау жүргізді.*

*Бұл мақалада безді құмдар мен үйінді шламдарының құрамына кіретін минералдарды қалпына келтіру үшін коксты қолдану бойынша эксперименттік зерттеулердің бірінші кезеңінің нәтижелері келтірілген.*

*Процестің шекті сатысы түзілген шойын мен қожды бөлу процесі болып табылады, ол қождағы алюминий оксидтерінің жоғары болуына байланысты 1200–1300 °C температурада толық жүрмейді, бұл процестің температурасын 1400–1500 °C дейін арттыруды және кенді брикеттердегі әк мөлшерін көбейтуді талап етеді.*

*Жұмыста көміртегіге (кокс) балама тотықсыздандырғыштарды пайдалана отырып, алюминий тотығы өндірісінің темір құмдары мен үйінді шламдарынан темірді қалпына келтіру бойынша одан әрі зерттеулер жоспарланған.*

*Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің 2024–2026 жылдарға арналған ғылыми және (немесе) ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландыруға арналған конкурс бойынша гранттық қаржыландыру шеңберінде «Төмен көміртекті даму стратегиясын іске асыру кезінде баламалы тотықсыздандырғыштармен темірді толық ала отырып, Қазақстан бокситтерін кешенді қайта өңдеу» AP23487674 жобасы бойынша жүргізілді.*

*Кілтті сөздер: боксит, темір, глинозем, көміртегі бейтараптығы, кокс, қайта өңдеу.*

***P. O. Bykov<sup>1</sup>, A. K. Zhunussova<sup>2</sup>, \*A. B. Kuandykov<sup>3</sup>, R. B. Mukanov<sup>4</sup>, E. Siemens<sup>5</sup>***

<sup>1,2,3</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

<sup>4</sup>K. I. Satpayev Kazakh National Research Technical University,  
Republic of Kazakhstan, Almaty

<sup>5</sup>Anhalt University of Applied Sciences, Federal Republic of Germany, Keten

Received 24.08.24.

Received in revised form 25.08.24.

Accepted for publication 29.08.24.

**COMPARATIVE STUDIES ON THE RECOVERY  
OF IRON FROM KAZAKHSTAN BAUXITE BY ALTERNATIVE  
REDUCING AGENTS (CARBON REDUCTION)**

*The authors analyzed the possibility of involving in the processing of iron-containing waste generated during the production of alumina from bauxite in Kazakhstan using alternative carbon (C and CO) reducing agents - hydrogen (H<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>).*

*This article presents the results of the first stage of experimental studies on the use of coke for the recovery of minerals that make up ferrous sands and dump sludge.*

*It has been experimentally established that the limiting stage of the process is the separation of the formed cast iron and slag, which, due to the high content of aluminum oxides in the slag, does not fully proceed at a temperature of 1200–1300 °C, which requires an increase in the temperature of the process to 1400 – 1500 °C and an increase in the amount of lime in ore-coal briquettes.*

*Further research is planned on the recovery of iron from ferrous sands and landfill slurries of alumina production using reducing agents alternative to carbon (coke).*

*The research was carried out within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for a competition for grant funding for scientific and (or) scientific and technical projects for 2024–2026 under the project AR23487674 «Integrated processing of bauxite in Kazakhstan with additional iron recovery by alternative reducing agents in the implementation of the low-carbon development strategy».*

*Keywords: bauxite, iron, alumina, carbon neutrality, coke, recycling.*

Теруге 13.09.24 ж. жіберілді. Басуға 30.09.24 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 1,09 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс № 4279

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[nitk.tou.edu.kz](http://nitk.tou.edu.kz)