

СТАТЬИ

УДК 553.64

DOI 10.17513/use.38236

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОРИТОВОЙ РУДЫ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗГОНКИ ЖЕЛТОГО ФОСФОРА****¹Бобков В.И., ¹Быков А.А., ²Незамаев С.В.**¹*Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске,
Смоленск, e-mail: vovabobkoff@mail.ru;*²*АО «Первая горнорудная компания», Москва, e-mail: pgrk@armz.ru*

Аннотация. Исследования проводились на фосфоросодержащем рудном сырье с целью определения его пригодности для производства желтого фосфора. Выполнены расчеты технологических показателей процесса электровозгонки желтого фосфора с использованием в качестве флюса гальки-гравия. Установлено, что галька-гравий в принципе может быть использована в качестве кварцсодержащего флюса в процессе электротермического получения желтого фосфора в рудотермических печах. Однако это приведет к снижению производительности фосфорных рудотермических печей на 10–15% по сравнению с кусковым кварцитом непосредственно с исследуемого месторождения. Научно обосновано, что кусковая руда не может быть использована в производстве желтого фосфора при следующих способах ее термической подготовки: обжиг куска, измельчение сырой руды – окомкование – обжиг. Рассчитана прочность обожженных окатышей в исследованном диапазоне по составу шихт, которая не превысила 120 кг/окатыш, хотя отдельные образцы обладали прочностью до 200 кг/окатыш. Это объясняется возможной сегрегацией, расслоением шихт на составляющие, при которых в потоке комкуемой смеси возникают зоны, обогащенные глиной и обедненные по содержанию кварцевого песка. Выявлено, что кусковой кварцит пригоден для использования в качестве флюса в процессе электровозгонки желтого фосфора и обеспечит получение энергоресурсоэффективных показателей. Анализ химического состава фосфоритовой руды до и после обработки проводили с помощью спектрального метода, а для определения температурных режимов использовали метод высокотемпературной дериватографии. На основе анализа экспериментальных данных были определены оптимальные физико-химические условия переработки желтого фосфора исследуемого месторождения с получением продукции, соответствующей требуемым показателям.

Ключевые слова: фосфоритовая руда, галька-гравий, кварцит, шихта, флюс, окускование, обжиг, температура, прочность

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00335,
<https://rscf.ru/project/22-11-00335/>.*

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL INDICATORS OF PHOSPHORITE
ORE PROCESSING FOR YELLOW PHOSPHORUS ELECTROWINNING****¹Bobkov V.I., ¹Bykov A.A., ²Nezamayev S.V.**¹*Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute, Smolensk,
e-mail: vovabobkoff@mail.ru;*²*JSC First Mining Company, Moscow, e-mail: pgrk@armz.ru*

Annotation. Studies were conducted on phosphorus-containing ore raw materials in order to determine its suitability for the production of yellow phosphorus. Calculations of technological parameters of the process of electric distillation of yellow phosphorus using pebbles-gravel as a flux have been performed. It has been established that pebble-gravel can in principle be used as a quartz-containing flux in the process of electrothermal production of yellow phosphorus in ore-thermal furnaces. However, this will lead to a decrease in the productivity of phosphorus ore-thermal furnaces by 10-15%, compared with lump quartzite directly from the studied deposit. It is scientifically proved that lump ore cannot be used in the production of yellow phosphorus with the following methods of its thermal preparation: firing of a piece, crushing of raw ore – pelletizing – firing. The strength of the fired pellets was calculated in the studied range of charge composition, which did not exceed 120 kg/pellet, although individual samples had a strength of up to 200 kg/pellet. This is explained by the possible segregation, stratification of the charges into components, in which zones enriched with clay and depleted in the content of quartz sand arise in the flow of the lumped mixture. It has been revealed that lump quartzite is suitable for use as a flux in the process of electric distillation of yellow phosphorus and will provide energy-resource-efficient indicators. The analysis of the chemical composition of phosphorite ore before and after processing was determined using the spectral method, and the method of high-temperature derivatography was used to determine temperature conditions. Based on the analysis of experimental data, optimal physico-chemical conditions for processing yellow phosphorus from the studied deposit were determined to obtain products corresponding to the required indicators.

Keywords: phosphorite ore, pebble-gravel, quartzite, charge, flux, pelletizing, roasting, temperature, strength

*The study was supported by the Russian Science Foundation grant № 22-11-00335,
<https://rscf.ru/en/project/22-11-00335/>.*

В настоящее время запасы фосфатных руд в Российской Федерации составляют примерно 2–2,5% общемировых запасов. При этом значительная их часть обладает низким процентом содержания полезного компонента (примерно 12–13%), в отличие от зарубежных месторождений, содержащих 26–28% полезного состава, к тому же относятся к труднообогатимому типу. В результате основу фосфатного производства российских предприятий составляют руды Каратауского фосфоритоносного бассейна с содержанием оксида фосфора P_2O_5 15–25%, Актюбинского фосфоритоносного бассейна и других зарубежных месторождений. Такое состояние делает российскую химическую промышленность уязвимой. В качестве основы сырьевой базы фосфатов предполагается использование месторождения апатитовых руд Хибинской группы, расположенной в Мурманской области, с процентным содержанием оксида фосфора P_2O_5 7,5–17,5%. Однако ориентация на богатые руды, запасы которых на территории России невелики, приведет в дальнейшем к снижению производства фосфора. В связи с этим необходимо разработать эффективную технологию обогащения обедненных фосфатных руд, залегающих в центральных районах нашей страны, в частности в Брянской и Московской областях, а также в новейших месторождениях в Сибири и на Урале. Следует проанализировать возможность применения существующих технологий переработки богатых руд по отношению к обедненным рудам и на основе полученных данных либо адаптировать имеющиеся технологии на основе используемого оборудования российских предприятий, либо разработать принципиально новую технологию. В работах российских исследователей показано, что кусковые фосфатные руды, обладающие благоприятным сочетанием физико-химических свойств (химический состав, высокая механическая и термическая прочность, плавкость и т.д.), после соответствующей подготовки (дробление, сортировка) и термической обработки (сушка, обжиг) могут быть использованы в процессе производства желтого фосфора [1, 2].

Термическая подготовка данного типа руды может осуществляться во вращающей-

ся трубчатой или шахтной печи, на конвейерных машинах ленточного типа [3, 4]. Высушенный или прокаленный рудный материал подвергается грохочению с выделением мелочи, кондиционный по крупности кусок подается в рудотермическую печь [5, 6].

Цель исследования – анализ технологических показателей: гранулометрического, химического состава сырой фосфоритовой руды и добавок флюса – для технико-экономического обоснования вовлечения ее в переработку и термическую подготовку для переплавки в рудотермических фосфорных печах с получением желтого фосфора.

Материалы и методы исследования

Для выявления технологических показателей процесса обжига кускового фосфорита были проведены эксперименты по указанной схеме подготовки сырья [7]. Исследовалась проба отсортированной сырой кусковой руды Софроновского месторождения. Руда, поступившая на исследование, имела следующий гранулометрический состав, приведенный в таблице 1.

Максимальный размер куска – 200 мм.

Химический и минеральный состав руды до и после обжига определяли на основе спектрального метода исследования с применением спектрометра МСА S,P. В таблице 2 приведен химический состав руды по фракциям и средний по всей пробе. Следует учесть, что из-за небольшого веса пробы с учетом максимального размера куска было затруднительно сформировать представительную среднюю пробу для производства всестороннего химического анализа [8, 9].

Показатели химического состава свидетельствуют о том, что крупные фракции фосфорита отличаются более низким содержанием оксида фосфора и более высоким содержанием оксида кальция СаО и двуокиси углерода. Отдельные куски фракции более 50 мм имели содержание оксида фосфора P_2O_5 в пределах 5–6%, в то время как процент двуокиси углерода достигал 35%, то есть, по существу, представляли собой карбонатную породу. Таким образом, куски в пределах узкого класса могут значительно отличаться по химическому и литологическому составу, а следовательно, по физико-химическим свойствам [10, 11].

Таблица 1

Гранулометрический состав руды

мм	Менее 5	От 5 до 10	От 10 до 25	От 25 до 50	От 50 до 70	Более 70
%	5,87	1,15	16,83	18,74	12,45	44,96

Таблица 2

Химический состав кусковой сырой руды по фракциям

Фракция, мм	Содержание компонентов, %											
	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	F	Cl	S	п.п.п.* 1000°C	H ₂ O	Прочие
(0; 5)	22,25	1,59	0,71	50,8	0,65	0,4	2,78	0,24	0,95	18,17	1,16	0,3
(5; 10)	20,31	1,52	0,60	50,3	0,7	0,25	2,68	0,25	0,72	21,2	1	0,47
(10; 25)	19,72	1,43	0,50	50,5	0,6	0,2	2,46	0,09	0,64	22	0,93	1,07
(25; 50)	19,11	1,22	0,35	51,5	0,45	0,2	2,44	0,1	0,62	22,2	0,8	1,01
(50; 70)	18,1	1,21	0,45	51,55	0,40	0,2	2,33	0,1	0,46	24,2	0,61	0,39
Более 70	16,9	1,11	0,67	51,15	0,8	0,2	2,03	0,11	0,4	25,5	0,5	
Средняя	17,93	1,21	0,61	51,44	0,75	0,21	2,23	0,12	0,45	24,15	0,6	0,8

Примечание: п.п.п.* – прочие продукты прокалики.

Таблица 3

Результаты опытов по обжигу кусковой руды

Температура обжига, °C	Гранулометрический состав руды после обжига и воздействия механических нагрузок, мм					Убыль веса при обжиге, %
	Более 50	(25; 50)	(10; 25)	(5; 10)	Менее 5	
800	0,54	35,14	14,05	4,32	45,95	7,5
900	2,35	20,59	14,12	3,53	59,41	14,57
1000		28,75	7,5	3,75	60	20
1100		14,81	23,7	1,48	60	24,5
1100*	1,04	12,5	13,89	4,86	67,71	25

Примечание: * – обжиг произведен в условиях плавного (постепенного) нагрева.

Поскольку крупные фракции отличаются большей карбонатностью, можно предположить, что они обладают и наименьшей термической стойкостью.

Химический анализ средней для пробы сырой руды показал, что содержание оксида фосфора P₂O₅ в ней составляет всего 17,9%, чего недостаточно для процесса производства желтого фосфора с удовлетворительными показателями.

Руда исходной крупности была подвергнута механическому испытанию в барабане. При этом определено, что только под воздействием механических нагрузок, имитирующих процессы складирования, грохочения, падения при перегрузках и так далее, она способна дать до 36% мелочи менее 10 мм, то есть при условии отгрузки с рудника сортированной руды только примерно 60% ее валового количества может быть подвергнуто термической подготовке. Из-за высокого содержания потерь при прокаливании и двуокиси углерода таким методом подготовки может быть только высоко-

температурный обжиг [12]. В таблице 3 приведены данные по обжигу кусковой руды.

Для более полной прокалики (декарбонизации) руды обжиг должен осуществляться при температуре 1100°C. Однако, как видно из таблицы 3, прокаленный кусок обладал низкой механической прочностью. Выход руды класса менее 5 мм составил порядка 60%, а годного для процесса электровазгонки желтого фосфора – не более 40%.

Следовательно, при схеме: рудник → кусок → транспортировка → подготовка → обжиг → рудотермическая печь – из каждой тонны отсортированной на руднике руды в рудотермическую печь попадает лишь четверть тонны кондиционного продукта.

Образующаяся сырая и прокаленная мелочь должна быть или вывезена в отвал, или окускована методом агломерации, брикетирования, окатывания и т.п. Из вышесказанного следует, что технология переработки кусковой руды на желтый фосфор не может рассматриваться как перспективная и энергоресурсоэффективная [13].

Таблица 4

Гранулометрический состав руды

мм	(0; 0,074)	(0,074; 0,1)	(0,1; 0,14)	(0,14; 0,28)	(0,28; 0,56)	Более 0,58
%	72,06	8,14	16,62	2,2	0,88	0,08

Таблица 5

Окомкование сырой руды с добавлением глины и кварцевого песка

№ п/п	Состав шихты, %			Прочность на сжатие окатышей, кг/окатыш		Прочность на сжатие обожженных при температуре °С окатышей, кг/окатыш				
	Руда	Глина	Кварцевый песок	сырых	сухих	1000	1100	1150	1200	1250
1	100	–	–	1,35	5,25	43,8	79,7	82,8	113,1	131,5
2	96	4	–	2,56	5,8	38,8	76	89	105	131,8
3	92	8	–	2,4	6,2	47	79	–	118	119
4	90,4	3,6	6	2,7	5,3	–	–	87,4	83,2	112
5	86,2	3,5	10,3	1,7	–	43,3	70,5	–	116,2	86
6	82,4	3,3	14,3	–	4,8	37,6	61	83,2	97,4	52,8
7	78,1	3,1	18,8	1,7	–	–	54	78,4	87,1	83,7
8	65,8	2,6	31,6	1,45	5,1	–	38,3	89	97,7	92,4

Для выявления технологических показателей окомкования измельченной сырой руды были проведены натурные эксперименты. Исходная руда измельчалась в мельнице сухого помола до крупности менее 0,1 мм. При этом ситовой состав полученной фосфоритной муки характеризовался цифрами, представленными в таблице 4.

Результаты опытов по окомкованию представлены в таблице 5.

При окомковании фосфоритовой муки с добавками глин, как и предполагалось, прочность сырых и сухих окатышей возросла. Однако в процессе обжига положительная роль глины как связующей и упрочняющей добавки не проявилась.

Существенное увеличение прочности окатышей как с глиной, так и без нее наблюдалось при температуре 1200–1250°С, то есть без появления расплава. Однако максимальная прочность не превысила 130 кг/окатыш.

Обожженные при температуре 1200–1250°С окатыши давали большую усадку, что связано с интенсивным разложением карбонатов, выделением двуокси углерода, образованием пор, которые заполнялись расплавом. Процесс декарбонизации снивелировал положительную роль глины [14]. При 1250°С происходило, кроме того, сплавление окатышей между собой.

Введение кварцевого песка вызвало уменьшение прочности сырых и сухих окатышей. Это объясняется тем, что квар-

цевый песок представляет собой инертную для процесса окомкования добавку. При обжиге в силу протекания процесса декарбонизации, уменьшения количества расплава окатыши с добавками кварцевого песка вспучивались, увеличивались в объеме, что в отдельных случаях приводило к их растрескиванию и разрушению [15].

Прочность обожженных окатышей в исследованном диапазоне по составу шихт не превысила 120 кг/окатыш, хотя отдельные образцы обладали прочностью до 200 кг/окатыш. Это может быть объяснено возможной сегрегацией, расслоением шихт на составляющие, при которых в потоке комкуемой смеси возникают зоны, обогащенные глиной и обедненные по содержанию кварцевого песка.

Для проверки полученных результатов проведена серия опытов на таблетках, результаты которых представлены в таблице 6.

Как видно из таблиц 5 и 6, результаты обжига окатышей и таблеток вполне сопоставимы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что производство окатышей из сырой измельченной руды (фосмуки) без связующих, но с использованием глины или с введением кварцевого песка не может быть рекомендовано, так как не обеспечивает необходимой для технологии электровозгонки фосфора прочности окатышей, ведет к усложнению технологической схемы по сравнению с процессом агломерации.

Таблица 6

Результаты опытов по обжигу таблеток

№ п/п	Состав шихты, %			Прочность на сжатие обожженных при температуре °С таблеток		
	Руда	Глина	Кварцевый песок	1100	1150	1200
1	100	–	–	76,6	121,4	130,3
2	96	4	–	52,8	63,4	81,2
3	90,4	3,6	6	50,3	40,9	51,5
4	86,2	3,5	10,3	60,7	54,1	119,5
5	82,4	3,3	14,3	54,1	28,4	66,3
6	78,1	3,1	18,8	45,5	71,3	110,5
7	65,8	2,6	31,6	40,3	56,1	89,4

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований гравия-галечника и кускового кварцита в качестве флюса в производстве желтого фосфора показали, что технология производства желтого фосфора требует обязательного использования кварцитосодержащего сырья. В некоторых природных фосфатных рудах двуокись кремния присутствует в их составе в значительных количествах. В этом случае расход кварцита при плавке может быть невысоким. В исследуемой руде и концентрате содержание диоксида кремния SiO_2 составляет не более 2%, а оксида кальция CaO – 51–57%. Для связывания этого количества оксида кальция CaO в различные силикаты, составляющие основу шлака, необходимо вводить значительное количество кварцитового сырья, которое должно обладать кусковатостью, иметь высокое содержание диоксида кремния SiO_2 , минимальное содержание примесей, обладать хорошими механическими свойствами и термической прочностью.

При агломерации и окомковании в отдельных случаях удается получить частично или полностью офлюсованный продукт. При этом расход кускового кварцита снижается до возможно минимального уровня.

Однако проведенные эксперименты по получению офлюсованных агломерата и

окавшей из исследуемого рудного сырья не дали положительных результатов. В силу этого для осуществления процесса электровозгонки, как показали расчеты, расход кускового кварцита составит от 5,6 до 7,3 т/т желтого фосфора. Как выяснилось, имеющийся рудник не обеспечит потребности завода в этом виде сырья. Поэтому проводились исследования по использованию в качестве флюса гальки-гравия, которая имела гранулометрический состав, представленный в таблице 7.

Все фракции представлены кусками округлой окатанной формы, различающимися по окраске, то есть, как можно предположить, по содержанию примесей.

Для выявления возможных колебаний химического состава выполнен анализ рудного материала по фракциям и определен средний химический состав, представленный в таблице 8.

Из таблицы 8 видно, что по химическому составу различные фракции гальки достаточно стабильны по диоксиду кремния SiO_2 , его содержание колеблется в диапазоне 81,7–84,1%.

Незначительны колебания и по содержанию других основных компонентов. Анализ руды выявил присутствие до 34 литолого-минералогических разновидностей. Их можно объединить в четыре основные группы.

Таблица 7

Гранулометрический состав гальки-гравия

мм	Менее 5	От 5 до 10	От 10 до 25	От 25 до 50	От 50 до 70	Более 70
%	0,17	0,74	49,7	29,76	14,09	5,54

Таблица 8

Химический состав гальки-гравия по фракциям

Фракция, мм	Содержание компонентов, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	п.п.п.* 580°C	п.п.п.* 1000°C	Прочие
Более 50	84,4	2,1	4,9	0,3	1,3	0,2	1,2	3,9	3,0
(25; 50)	80,35	1,6	6,9	0,6	1,6	0,2	1,43	6,24	2,51
(10; 25)	82,32	3,35	4,8	0,32	2,24	0,2	1,7	4,2	2,57
(5; 10)	84,1	2,4	3,7	0,2	1,5	0,2	–	4,6	3,3
(0; 5)	81,7	1,7	5,5	0,5	2,1	0,4	–	4,5	3,6
Средняя	80,3	3,5	5,3	0,6	2,3	0,3	1,7	4,5	2,02

Примечание: п.п.п.* – прочие продукты прокалики.

Таблица 9

Гранулометрический состав гальки-гравия под воздействием нагревания и механических нагрузок

Температура обжига, °С	Гранулометрический состав гальки-гравия после обжига и воздействия механических нагрузок, %						
	Более 70	От 50 до 70	От 25 до 50	От 10 до 25	От 5 до 10	Менее 5	Убыль веса
исходная	5,54	14,09	29,76	49,7	0,74	0,17	–
1000	–	0,76	18,98	43,38	15,18	21,69	3,8
1100	–	1,41	12,43	46,61	18,64	20,9	4,5
1200	–	–	11,14	49,33	18,37	21,16	4,5

1. Обломки интрузивной породы гранитоидного ряда, состоящие из α-кварца, альбита Na₂Al Si₃O₈ и незначительного количества глинистых минералов: мусковита KAl₂[AlSi₃O₁₀](OH)₂, оксидов магния и алюминия 5MgO, Al₂O₃, каолинита Al₂[Si₂O₅](OH)₄, санидина K(AlSi₃)O₈. Данная группа составляла в партии около 20% весовых.

2. Обломки кварца, халцедона белого и серовато-белого цвета, практически мономинеральных с небольшой примесью гематита. Эта группа является преобладающей и составляет около 50%.

3. Обломки различных осадочных кремнистых образований – силицитов. Состоят в основном из кварца, халцедона с небольшой примесью кальцита, хлорита, мусковита, гематита, гетита. Составляют в пробе 25% весовых.

4. Кальцит с небольшим количеством глинистых минералов.

При нагревании до температуры 1250°C в группах 1, 4 наблюдалось частичное оплавление минералов, что свидетельствовало о начале выделения расплава. В первую оче-

редь это связано с присутствием в группах глинистых составляющих.

Галька-гравий в исходном состоянии обладала удовлетворительной механической прочностью. После испытания по методу определения «барабанной пробы» выход мелочи менее 5 мм составил 2,5%. Галька-гравий отличалась и высокой термической прочностью. При нагревании и последующем испытании в барабане выход класс менее 5 мм равнялся 14–21%.

Изменения гранулометрического состава гальки-гравия под воздействием нагревания и механических нагрузок представлены в таблице 9.

Таким образом, галька-гравий может быть использована в производстве желтого фосфора. Однако она имеет следующие отрицательные стороны:

- невысокое содержание основного вещества – диоксида кремния SiO₂ (около 80%);
- значительное содержание примесей, в том числе потерь при прокаливании;
- низкая температура появления жидкой фазы.

Первые два обстоятельства приведут к увеличению расходных коэффициентов по ресурсным сырьевым источникам и электроэнергии, к возможному ухудшению качества фосфора, третий – к возможному образованию в нем спеков, появлению явлений обрушений шихты, повышению температуры под сводом рудотермической печи, увеличению пылеуноса, снижению мощности печи.

Исследовалась проба кускового кварцита. Химический анализ показал, что содержание двуокси кремния составляет в нем 96,9%. Остальные компоненты определены в следующих количествах: Al_2O_3 – 0,15%, CaO – 0,5%, MgO – 0,2%, Fe_2O_3 – 1,5%, P_2O_5 – 0,07%, потери при прокаливании $1000^\circ C$ – 0,31%, прочие – 0,17%. При рентгенографии усредненного образца установлено, что кварцит состоит практически из одного кварца. Кроме того, присутствуют лишь в незначительных количествах гематит и полевой шпат. Температура плавления кварцита лежит за пределами $1500^\circ C$. Поскольку кварцит был поставлен кусками, перед проведением экспериментов по исследованию его механических и термических свойств он был подвергнут дроблению. При этом отмечена его высокая прочность. Для получения сопоставимых результатов навески готовились из смеси двух классов: от 50 до 70 и от 25 до 50 мм. Выход мелочи

менее 5 мм после испытания в барабане исходного кварцита составил 6,25%, после нагревания при температуре $1200^\circ C$ – 26,6%.

Таким образом, кусковой кварцит по химическому составу и физико-химическим свойствам является перспективным видом сырья для производства желтого фосфора. Его использование предпочтительнее гальки-гравия, так как позволит избежать тех недостатков, которые характерны для гальки-гравия.

Для уточнения модуля кислотности процесса электровозгонки фосфора при использовании гальки-гравия и кускового фосфорита проведены опыты по кинетике восстановления агломерата и окатышей. Модуль кислотности изменялся в пределах 0,7–1,1, а температура восстановления составляла 1450 – $1550^\circ C$.

Экспериментально установлено, что оптимальный модуль кислотности для этих видов кварцсодержащего сырья равняется 1. Температура восстановления, при которой процесс протекает интенсивно, должна составлять не менее $1500^\circ C$. Выявлена более высокая реакционная способность гальки-гравия по сравнению с кварцитом. Время, необходимое для восстановления сырья до остаточного содержания оксида фосфора P_2O_5 в шлаке 1,5%, сокращалось в 1,5–2 раза в зависимости от температурного уровня процесса 1450 или $1500^\circ C$.

Таблица 10

Основные расчетные показатели процесса электровозгонки фосфора с использованием в качестве флюса гальки-гравия

№ пп	Наименование показателей	Размерность	Варианты технологического процесса		
			Агломерат из сырой руды	Агломерат из концентрата	Окатыши из концентрата
1	Расходные коэффициенты на тонну фосфора в процессе электровозгонки:				
	агломерат	т/т	10,9	8,73	–
	окатыши	–	–	–	9,22
	кокс	–	1,73	1,65	1,68
	галька-гравий	–	8,26	6,48	6,42
2	Выход продуктов электровозгонки:				
	шлак	–	15,78	12,13	12,55
	фосфор	–	0,22	0,17	0,16
	печной газ	м ³ /т	3620	3330	3360
	коттрельная пыль	т/т	0,173	0,131	0,137
3	Расход электроэнергии на тонну фосфора	кВтч/т	17790	15820	15890
4	Производительность рудотермической печи	т/год	12044	13990	13930

На основании проведенных опытов выполнены расчеты материального и энергетического балансов процесса электровозгонки фосфора с использованием в качестве флюса гальки-гравия. Данные расчетов сведены в таблицу 10.

Из сопоставления показателей таблицы 10 следует, что использование гальки-гравия вместо кварцита приведет к увеличению расхода в процессе электровозгонки желтого фосфора: кокса – на 12–23%, гальки-гравия – на 25–28%, агломерата или окатышей – примерно на 2%. Выход шлака возрастет на 8–10%, печного газа – на 20–26%, расход электроэнергии – на 8–11%, что приведет к соответствующему снижению производительности рудотермической фосфорной печи.

Выводы

В результате проведенной научной работы можно сделать следующие основные выводы.

1. Сырая руда исследуемого месторождения не может быть использована в технологии производства желтого фосфора при переработке ее по схеме: рудник → сортировка → обжиг куска → сортировка → рудотермическая печь – из-за низкой механической и термической прочности.

2. Кусковой кварцит пригоден для использования в качестве флюса в процессе электровозгонки желтого фосфора и обеспечит получение энергоресурсоэффективных показателей.

3. Установлена принципиальная возможность использования гальки-гравия в качестве флюсующей кварцсодержащей добавки. Однако невысокое, по сравнению с кусковым кварцитом, содержание диоксида кремния SiO₂, физико-химические особенности гальки-гравия приведут к снижению производительности рудотермической фосфорной печи и к увеличению ряда расходных показателей, в том числе электроэнергии.

4. Сырая измельченная руда может быть окомкована с получением удовлетворительных по качеству сырых окатышей. Прочность же обожженных окатышей будет недостаточной, не превысит 150 кг/окатыш, что не позволяет рекомендовать этот технологический процесс для рассмотрения.

Список литературы

1. Лыгач А.В., Лыгач В.Н. Фосфатно-сырьевая база России и ее роль в решении проблемы продуктов питания,

а, следовательно, продовольственной безопасности страны // Недропользование XXI век. 2022. № 3(95). С. 105–109.

2. Дли М.И., Пучков А.Ю., Прохимнов Н.Н., Окунев Б.В. Нечеткологическая модель многостадийной химико-энерготехнологической системы переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2023. Т. 18, № 3. С. 92–104. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-3-92-104.

3. Орехов В.А. Математическое моделирование процессов образования шлама в рудно-термических печах при переработке фосфатного рудного сырья // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 7. С. 78-86. DOI: 10.17513/snt.39698.

4. Пучков А.Ю., Прохимнов Н.Н., Рысина Е.И., Шутова Д.Ю. Нейрорегулятор комплексной технологической системы переработки рудных отходов // Прикладная информатика 2023. Т. 18, № 5. С. 91–105. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-91-105.

5. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прохимнов Н.Н., Соколов А.М. Интеллектуальная модель управления рисками нарушения характеристик электромеханических устройств в многостадийной системе переработки рудного сырья // Прикладная информатика. 2023. Т. 18, № 1. С. 22–36. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-1-22-36.

6. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прохимнов Н.Н., Шутова Д.Ю. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17, № 6. С. 102–121. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-102-121.

7. Орехов В.А., Бобков В.И., Быков А.А. Исследование особенностей высокотемпературных режимов обжига окомкованного рудного сырья, обогащенного свободным углеродом // Успехи современного естествознания. 2023. № 11. С. 174-179.

8. Бобков В.И., Никифоров В.А., Панченко С.В. Особенности гидродинамики и тепломассопереноса при активизации химико-энерготехнологических процессов восстановления в коксовой зоне рудотермической печи // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. С. 148-154. DOI: 10.17513/use.37963.

9. Бобков В.И., Орехов В.А. Особенности методики определения теплофизических свойств фосфоритового агломерата // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10-1. С. 59-63. DOI: 10.17513/snt.39346.

10. Бобков В.И., Орехов В.А. Исследование аэродинамики полифракционного слоя рудного сырья // Успехи современного естествознания. 2022. № 9. С. 67-72.

11. Орехов В.А. Цифровизированное многомасштабное моделирование тепло-технологических рудовосстановительных процессов в электротермической фосфорной печи // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 4. С. 31 – 35.

12. Vereykina E.K., Orekhov V.A. Study of Thermal Deformations in Iron ore Raw Materials at high Temperature Roasting // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2999(1). P. 020050.

13. Borisov V., Bulygina O., Vereikina E. The use of co-evolutionary algorithms for optimizing the operating regimes of the roasting conveyor machine // Journal of Applied Informatics. 2023. Vol. 18. No. 3. P. 52-60. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-3-52-60.

14. Иващук О.Д., Нестерова Е.В., Игрунова С.В., Федоров В.И., Иващук О.О., Каложная Е.В. Автоматизация оценивания эффективности усреднения товарного концентрата руды // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 10. С. 39-44. DOI: 10.17513/snt.39789.

15. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 8. С. 53-57.