

УДК 669.712

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУСТАДИЙНОГО СПОСОБА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗАПАДНО-АФРИКАНСКИХ БОКСИТОВ¹

©2023 г. Б.Г. Балмаев, А.С. Тужилин, Т.Н. Ветчинкина

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва

E-mail: bb-blm@yandex.ru

Поступила в редакцию 24 ноября 2022 г.

После доработки 1 декабря 2022 г. принята к публикации 12 декабря 2022 г.

Рассмотрен двустадийный способ выщелачивания западно-африканских бокситов. Определены оптимальные условия выщелачивания бокситов при атмосферных и автоклавных режимах. Построены зависимости осаждения бокситовой пульпы от времени при добавлении разных доз флокулянта.

Ключевые слова: выщелачивание; боксит; глинозем; флокулянт; красный шлам.

В настоящее время для получения глинозема на большинстве европейских заводов используются западно-африканские бокситы [1—7], вещественный состав которых в зависимости от бокситовых месторождений неоднородный. В образцах бокситов (табл. 1), отобранных в ходе отработки карьера, увеличивается доля моногидратов алюминия (бёмит и диаспор), плохо разлагающихся щелочными растворами при низких температурах.

Железо в бокситах содержится в пяти минералах (гётит FeOОН, гематит Fe₂O₃, марганцевый сидерит (Fe, Mn)CO₃, псевдорутит Fe₂O₃·3TiO₂, ильменит FeTiO₃), основное его количество связано гётитом (11,7%) и гематитом (1,4%). Титан присутствует в псевдорутиле (2,0%) и ильмените (1,1%). Кремний связан в наибольшем количестве с кварцем (1%) и каолинитом (2%).

Изменение вещественного состава бокситов в ходе отработки месторождений требует совершенствования технологии их переработки. Основной показатель качества процесса выщелачивания — степень извлечения глинозема из боксита в щелочной раствор ($\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}$).

Теоретическая степень извлечения Al₂O₃ (выход глинозема) определяется отношением количества извлеченного оксида алюми-

ния к общему его содержанию в боксите (при условии, что практически весь кремнезем, присутствующий в боксите, взаимодействует со щелочным раствором и образует с Al₂O₃ нерастворимый гидроалюмосиликат натрия (ГАСН: Na₂O·Al₂O₃·1,7SiO₂·2H₂O), а остальная, несвязанная в ГАСН, часть оксида алюминия полностью извлекается из боксита).

Таким образом, величина теоретической степени извлечения глинозема ($\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{\text{теор}}$) является расчетной, строго определяется содержаниями глинозема (Al₂O₃, %) и кремнезема (SiO₂, %) в боксите и химическим составом образующегося ГАСН:

$$\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{\text{теор}} = (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3. \quad (1)$$

Боксит, у которого степень извлечения Al₂O₃ в раствор $\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ близка к теоретической или равна ей, считается легкооскрываемым.

Условия выщелачивания бокситов находятся в прямой связи с их минеральным составом. Выщелачивание бокситов, в составе которых преобладает гиббситовый гидроксид алюминия, проводят при относительно низких концентрационных и температурных условиях по сравнению с диаспор-бёмитовыми бокситами [8—10]. Легкооскрываемые чисто гиббситовые бокситы можно выщелачивать при атмосферном давлении и темпе-

¹Работа выполнена по государственному заданию 075-00715-22-00.

Химико-минералогический состав бокситов в ходе отработки карьера

Образец	Содержание, %					Распределение Al_2O_3 по минеральным фазам, %				μ_{Si}	$\varepsilon_{Al_2O_3}^{теор}$, %
	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3		п.п.п.	гиббсит	бёмит*	диаспор**		
				общее	моногидраты						
1	0,98	3,78	14,80	53,44	3,45	26,08	49,99	2,52	0,92	54,53	98
2	2,66	2,10	22,80	47,00	11,27	24,62	35,73	9,25	2,02	17,67	94
3	2,00	3,30	23,90	47,07	5,48	23,05	41,59	4,42	1,06	23,54	96
4	2,05	3,78	10,00	55,28	7,69	28,08	47,59	5,72	1,97	26,97	96
5	1,80	2,00	32,00	40,09	4,21	23,38	35,88	2,56	1,65	22,27	96
6	1,38	2,60	23,38	46,42	4,38	25,47	42,04	2,92	1,46	19,14	97
7	2,32	2,90	15,10	53,02	7,85	26,06	45,17	5,16	2,69	22,85	96

Примечание. μ_{Si} — кремниевый модуль; $\varepsilon_{Al_2O_3}^{теор}$ — теоретическая степень извлечения оксида алюминия.

*Среднетемпературный.

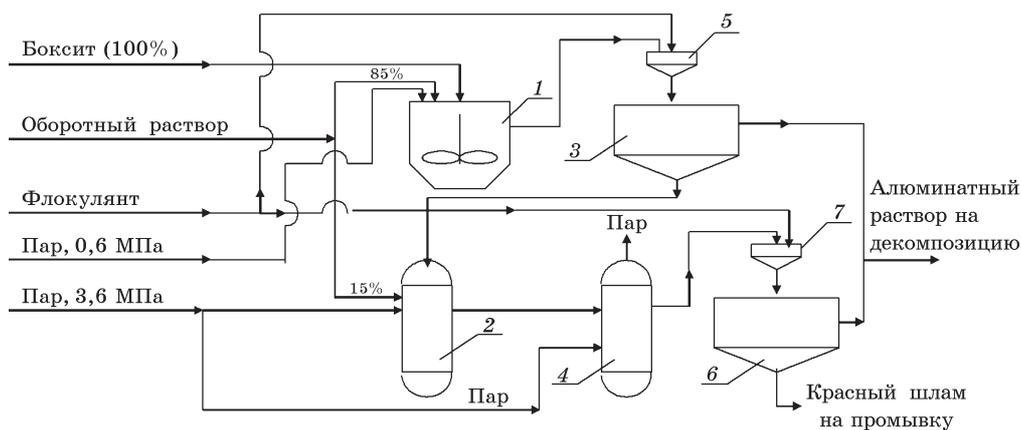
**Высокотемпературный.

ратуре ниже точки кипения раствора в обычных чанах с воздушным или механическим перемешиванием пульпы. Оптимальная температура зависит от многих факторов, в числе которых степень откристилизованности гиббсита и кремнийсодержащих минералов, наличие примесей, а также физические свойства боксита, красного шлама и др. Сам гиббсит достаточно быстро может растворяться уже при температуре выше 50 °С, однако выщелачивать гиббситовый боксит при температуре ниже 70—80 °С нецелесообразно из-за повышенной вязкости растворов при таких температурах и плохого сгущения красного шлама. Для большей эффективности отделения и промывки красного шлама в системе сгустителей гиббситовые бокситы выщелачивают обычно при 95—105 °С, т.е. при температуре, близкой к точке кипения раствора [11—15]. Проведение выщелачивания при низких концентрациях и температурах гиббситовых бокситов особенно эффективно, когда часть кремнезема в них представлена кварцем. В этом случае используются и высокая растворимость гиббсита, и относительная инертность кварца к алюминатно-щелочным растворам [16, 17]. На ряде глиноземных заводов чисто гиббситовые бокситы выщелачивают в автоклавных условиях около 145 °С.

Несмотря на то, что аппаратное оформление процесса выщелачивания усложняется, автоклавное выщелачивание гиббситовых

бокситов имеет и ряд существенных преимуществ: концентрация Na_2O_k в оборотном алюминатном растворе может быть существенно снижена от 180—220 г/л для температуры выщелачивания около 100 °С до 150—170 г/л при 145 °С; длительность выщелачивания сокращена от 60—120 до 20—40 мин, а каустический модуль конечного алюминатного раствора снижен с 1,5—1,7 до 1,31—1,35. Указанные преимущества положительно отражаются не только на процессе выщелачивания бокситов, но и далее при декомпозиции и выпарке алюминатных растворов, что может повысить технико-экономические показатели всего способа Байера при переработке гиббситовых бокситов [8]. Таким образом, выбор оптимальных условий выщелачивания бокситов должен основываться в каждом конкретном случае на минералогических особенностях самого боксита и технико-экономических расчетах способа Байера в целом.

Одним из путей повышения эффективности извлечения оксида алюминия из боксита может стать двустадийное выщелачивание, особенно когда бокситы помимо легковскрываемого гиббсита содержат более трудновскрываемые формы — гиббсит с высокой степенью откристилизованности, бёмит, диаспор, алюмогётит. На первой (низкотемпературной) стадии при атмосферном давлении можно практически полностью разложить гиббсит, а на второй (при более вы-



Фиг. 1. Принципиальная технологическая схема двухстадийного выщелачивания: 1 — мешалка; 2 — реактор (подогреватель); 3, 6 — сгустители; 4 — автоклав (вторая стадия); 5, 7 — смесители

соких температурах) осуществить в автоклавах довыщелачивание боксита, снизить каустический модуль, разложить трудновскрываемые минералы.

При выборе направления исследований рассмотрена возможность использования двухстадийного способа выщелачивания применительно к западно-африканским бокситам, при котором дорогостоящий и энергозатратный передел, каким является автоклавное выщелачивание, может быть частично заменен выщелачиванием при атмосферных условиях (фиг. 1). Двухстадийный процесс выщелачивания может быть организован в двух вариантах. По первому варианту выщелачивание проводят при атмосферных условиях и температуре 100—110 °С, а затем пульпу после подогрева в контактных подогревателях направляют на автоклавное выщелачивание при температуре 220—230 °С. Во втором варианте в отличие от первого предусмотрены отделение от алюминатного раствора шлама первой стадии и выщелачивание последнего свежим обратным раствором в автоклавах. Далее объединенные алюминатные растворы поступают на декомпозицию. В первом варианте сокращается время автоклавной обработки, во втором — материальный поток на автоклавную стадию. За основу в исследовании принят второй вариант, так как он позволяет после разделения жидкой и твердой фаз направлять основное количество алюминатного раствора на процесс декомпозиции и тем самым уменьшать материальные потоки, поступающие на вторую автоклавную стадию выщелачивания (количество шлама после первой стадии сокращается на 40—60%), и, следовательно, со-

кращать необходимое число автоклавов, что значительно уменьшит капитальные затраты на вторую стадию выщелачивания.

Материалы и методы исследований.

Характеристика исследованного образца западно-африканских бокситов приведена в табл. 1, состав 6. Методика проведения исследований выщелачивания бокситов сводилась к следующему. Первую стадию выщелачивания проводили при атмосферном давлении на лабораторной установке в стеклянной колбе объемом 500 мл с колбонагревателем для поддержания температуры и перемешивающим устройством с регулируемым числом оборотов. Масштабирование лабораторных исследований выполнено на укрупненной лабораторной установке в полипропиленовом стакане объемом 2000 мл с погружным термостатом и перемешивающим устройством.

В реактор лабораторной установки заливали обратный раствор, затем засыпали пробу измельченного боксита, включали мешалку и нагрев пульпы. Поддерживали температуру в пульпе 100—110 °С, длительность выщелачивания боксита варьировали в пределах 90—180 мин. Пробы пульпы отбирали на анализ каждые 15—30 мин. Алюминатный раствор и красный шлам анализировали на содержание основных компонентов (Al_2O_3 , Na_2O , SiO_2 , Fe_2O_3). По результатам анализа рассчитывали каустическое отношение (α_k) и степень извлечения Al_2O_3 из боксита в алюминатный раствор ($\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}$).

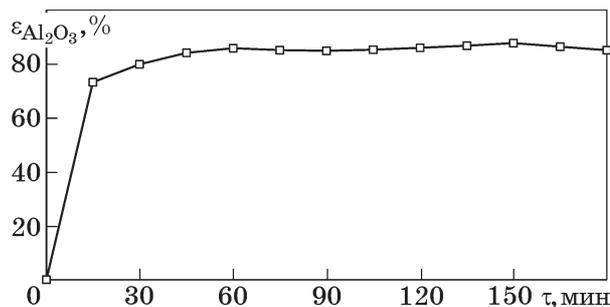
В пульпу после выщелачивания боксита обратным раствором при атмосферных условиях на укрупненной установке вводили флокулянт. Исследования по отстаиванию

красного шлама с использованием флокулянтов проводили в цилиндрах объемом 1000 мл, установленных в термостат. По достижении заданной температуры (90 и 100 °С) в цилиндр с пульпой вводили дозу флокулянта, пульпу перемешивали и измеряли высоту h осветленного слоя после отстаивания пульпы в течение 1—1,5 ч. Осветленную часть пульпы декантировали, сгущенную часть пульпы и оборотный раствор загружали в реакционную зону автоклавной установки.

Вторую стадию выщелачивания осуществляли в автоклаве объемом 1 л из жаропрочной нержавеющей стали с переменной измеряемой скоростью вращения мешалки — шестилопастной турбины открытого типа. В блоке управления терморегулятора автоклава задавали: необходимое время разогрева — 1,5 ч, температуру проведения опыта — 220 °С, длительность выдержки температуры проведения опыта — 1 ч. Затем нагреватель автоклава отключали и охлаждали его холодной водой. Пульпу переливали в цилиндр, помещенный в кипящую воду, и добавляли флокулянт. Шлам быстро осаждался, отделялся от алюминатного раствора; шлам промывали горячим раствором 5%-ной NaOH и кипящей водой до отмывки NaOH по индикатору. Пульпу фильтровали на фильтре под вакуумом.

Полученные растворы после выщелачивания анализировали на содержание Al_2O_3 , Na_2O_k , $Na_2O_{карб}$, SiO_2 , а отмывые шламы — на Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 , SiO_2 , CaO , TiO_2 , MgO химическим и рентгенофазовым методами.

Результаты исследований и их обсуждение. Отобранная проба боксита для проведения данного исследования имела следующий химический состав, %: Al_2O_3 46,42; Fe_2O_3 23,38; SiO_2 1,38; TiO_2 2,60; CaO 0,02; п.п.п. 25,47; Cr 0,20; Mg 0,14; V 0,05. Фазовый ее состав %: гиббсит $\gamma-Al(OH)_3$ 42,04;



Фиг. 2. Изменение степени извлечения Al_2O_3 в алюминатный раствор в ходе выщелачивания при температуре 105 °С в оборотном растворе (см. табл. 2)

бёмит $\gamma-Al(OH)_3$ 2,92; диаспор $\alpha-Al(OH)_3$ 1,46; кремниевый модуль 19,14; железо присутствует в виде гётита $FeO(OH)$, гематита $\alpha-Fe_2O_3$ и алюмогётита $(Fe_{1-x}Al_x)O(OH)$; кремний находится в виде кварца SiO_2 и каолинита $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$; титан — в виде рутила и анатаза TiO_2 .

Выщелачивание на первой стадии при атмосферном давлении проводили на укрупненной установке оборотным раствором с глиноземного завода с концентрацией оксидов, г/л: Na_2O 245; Na_2O_k 212, и Al_2O_3 124. Каустический модуль раствора $\alpha_k = 2,85$. Результаты выщелачивания на первой стадии в оборотном растворе представлены на фиг. 2 и в табл. 2.

Степень извлечения Al_2O_3 из боксита оборотным раствором в течение первых 15—20 мин достигла 73—75%, далее рост степени извлечения Al_2O_3 замедлился: в интервалах отбора проб 60—90 мин степень извлечения Al_2O_3 в раствор составила 84—85%, а в интервалах 120—180 мин — 86—87%.

Красный шлак, полученный при выщелачивании боксита в атмосферных условиях, для пробы после 150 мин выщелачивания имел следующий химический состав, %: Al_2O_3 15,8; Fe_2O_3 65,14; SiO_2 4,10; TiO_2 2,20; Na_2O 4,50;

Таблица 2

Основные показатели выщелачивания бокситов оборотными алюминатными растворами при атмосферных условиях

Показатель	Интервал отбора проб, мин							
	15	30	45	60	90	120	150	180
Степень извлечения Al_2O_3 $\epsilon_{Al_2O_3}$, %	73,1	79,8	84,1	85,8	84,7	85,9	87,7	85,0
Кремниевый модуль μ_{Si}	—	153,3	145,7	114,4	125,2	125,7	142,6	146,3
Каустический модуль α_k	—	1,384	1,845	1,534	1,61	1,54	1,45	1,45
Концентрация Al_2O_3 в растворе, г/л	190,05	207,4	218,58	223,04	220,2	223,3	228,1	220,9

Cr₂O₃ 0,28; п.п.п 10,0. Его фазовый состав представлен минералами: гематит Fe₂O₃, гётит (FeOOH), ГАСН (Na₂Al₃Si₅O₁₀·6H₂O), гидрогранат (3CaO·Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O).

Степень извлечения из бокситов Al₂O₃ в раствор рассчитывалась по жидкой и твердой фазам для составления соответствующего баланса. По жидкой фазе определяли содержание Al₂O₃ в растворах (фильтрате, промывочных водах), которые сравнивали с теоретическим количеством.

Степень извлечения Al₂O₃ по шламу $\varepsilon_{Al_2O_3}^{факт}$, %, рассчитывалась на основании химических анализов красного шлама и боксита:

$$\varepsilon_{Al_2O_3}^{факт} = 100 - \frac{Al_2O_{3шл}Fe_2O_{3б}}{Al_2O_{3б}Fe_2O_{3шл}} =$$

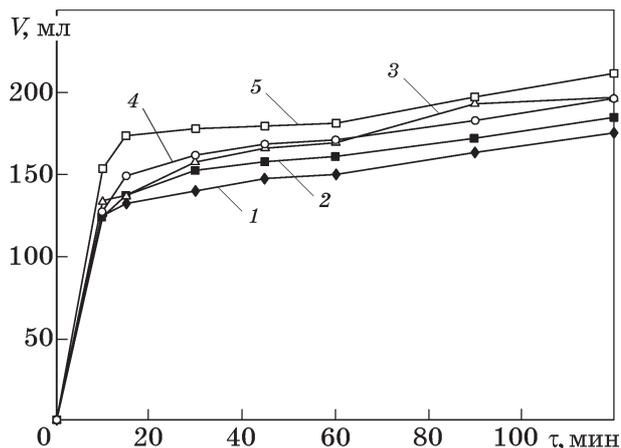
$$= 100 - \frac{15,8 \cdot 23,38}{46,2 \cdot 65,14} = 87,7, \quad (2)$$

где Al₂O_{3шл}, Fe₂O_{3шл} — содержание Al₂O₃ и Fe₂O₃ в шламе, %; Al₂O_{3б}, Fe₂O_{3б} — то же, в боксите, %.

Значения степени извлечения Al₂O₃ из боксита по раствору и красному шламу оказались достаточно близки между собой и составили в среднем 87%.

Разделение твердой и жидкой фаз после первой стадии выщелачивания. При отстаивании красного шлама, полученного после выщелачивания бокситов при атмосферном давлении, оседание частиц было очень медленным: в течение 5 ч произошло осветление лишь на 0,3 см. Для ускорения скорости осадения частиц выбран флокулянт AL P 99 VHM с максимальной степенью гидролиза и плотностью заряда (около 100%) и максимально высокой молекулярной массой² (17—20 МДа). Результаты исследования представлены на фиг. 3.

Испытаны разные концентрации *C* рабочего раствора и дозировки: при *C* = 0,1% дозировка 10 и 20 мл (см. фиг. 3 кр. 1 и 2 соответственно); при *C* = 0,04% дозировка 50 мл (кр. 3); при *C* = 0,01% дозировка 30 и 70 мл (кр. 4 и 5 соответственно). Из приведенных графиков скорости осадения и объема осветленного слоя следует, что чем больше разбавление, тем выше скорость



Фиг. 3. Зависимость объема осветленного слоя *V* бокситовой пульпы от времени τ , концентрации *C* и дозировки флокулянта AL P 99 VHM (кривые 1—5 — см. в тексте). Начальный объем $V_0 = 270—280$ мл

осаждения, что напрямую связано с изменением вязкости раствора. Тем не менее наиболее четкая граница раздела фаз и более чистый верхний слой наблюдались при концентрации флокулянта *C* = 0,04% и дозировке 50 мл (кр. 3). Данные значения концентрации и дозировки обеспечивают максимальную скорость за первые 5—20 мин, что является определяющим для процесса отстаивания. Таким образом, оптимальными являются следующие значения: концентрация вводимого флокулянта *C* = 0,04% (0,4 г/л) и дозировка в соотношении 5:1 объемов пульпы и раствора флокулянта. С введением флокулянта AL P 99 VHM скорость отстаивания красного шлама возросла почти в 50 раз по сравнению с отстаиванием без флокулянта.

Вторую стадию выщелачивания сгущенной пульпы красного шлама, полученного после выщелачивания боксита в атмосферных условиях, проводили в автоклавах при температуре 220 °С в течение 60 мин при давлении 1,4 МПа. Сгущенную часть пульпы первой стадии выщелачивания заливали в стакан, который помещали в реакционную зону автоклавной установки. Длительность нагрева до заданной температуры достигала 90—100 мин.

Исследованы пульпы с разным соотношением количеств оборотного раствора и сгущенного красного шлама после атмосферного выщелачивания. При выщелачивании оборотным раствором с концентрацией составляющих, г/л: Na₂O 245; Na₂O_к 212 и Al₂O₃ 124 каустический модуль раствора $\alpha_k = 2,88$,

²В скобках приведена молекулярная масса 17—20 млн. а.е.м. в синонимичной записи для макромолекул, в которой допускается использование дольных и кратных единиц (в нашем случае — мегадальтон). По данным на 2018 г. 1 а.е.м. (Да) = 1,66·10⁻²⁷ кг.

плотность раствора $\rho = 1,35 \text{ г/см}^3$. Для этих условий общая степень извлечения Al_2O_3 в раствор по результатам анализа красного шлама при атмосферном давлении и автоклавном выщелачивании боксита достигала 92,7%.

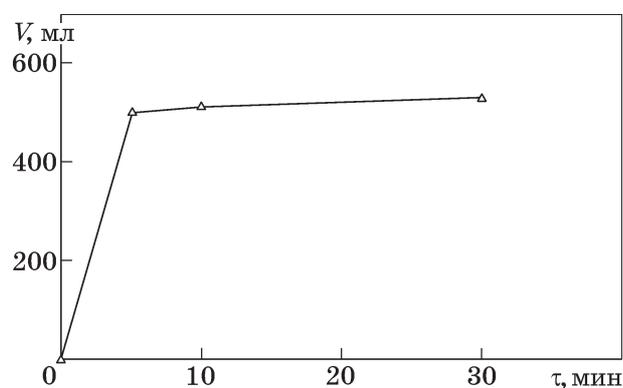
После выщелачивания боксита по двустадийному способу красный шлам имел следующий химический состав, %: Al_2O_3 5,8; Fe_2O_3 49,5; Na_2O 8,4; SiO_2 5,2; п.п.п. 26,8.

По сравнению с одностадийным атмосферным выщелачиванием после двустадийного выщелачивания бокситов в шламе происходит перераспределение оксидов и гидроксидов железа в сторону увеличения содержания гётита. Состав алюмосиликатной части шлама становится более сложным и кроме ГАСН включает заметное количество конкренита, содалита и гидрограната.

Разделение твердой и жидкой фазы после второй стадии выщелачивания. После автоклавного выщелачивания скорость отстаивания красного шлама с введением флокулянта AL P 99 VHM концентрацией $C = 0,04\%$ в количестве 50 мл протекает достаточно быстро, как это видно из данных представленных на фиг. 4.

Скорость осаждения в первые 5 мин составляет 1,9 м/ч, процесс осаждения протекает в течение первых 5—30 мин. Шлам после осаждения и отделения от алюминатного раствора, промывался горячим раствором 5%-ного NaOH , а затем кипящей водой до отмывки NaOH по индикатору.

Пульпу фильтровали на вакуум-фильтре в течение >5 ч. Исследованы условия фильтрации пульпы, так как при низкой ско-



Фиг. 4. Зависимость объема осветленного слоя V бокситовой пульпы от времени после автоклавного выщелачивания с использованием флокулянта. Начальный объем пульпы $V_0 = 790$ мл

рости фильтрования температура пульпы в течение 1 ч снижается от 100 до 20 °С, осадок превращается в гель и фильтрование практически прекращается. Исследованные варианты разбавления пульпы не дали положительных результатов без поддержания достаточно высокой и постоянной температуры пульпы на воронке. Лучшие результаты по фильтрованию получены при разбавлении пульпы щелочным раствором, содержащим Na_2O 50—70 г/л, и поддержании температуры пульпы при фильтровании под вакуумом в интервале 90—100 °С. Длительность фильтрования сократилось до 2,5—3,5 ч.

При промывке осадка красного шлама из-за снижения температуры и большого разбавления алюминатного раствора происходит уменьшение его стойкости. Для предотвращения гидролиза растворов (и соответственно потерь Al_2O_3) на каждой стадии промывки красного шлама рекомендуется контролировать и поддерживать температуру на уровне не менее 95—100 °С.

Выводы. 1. Исходный фазовый состав пробы боксита показал присутствие моногидратов алюминия, плохо разлагающихся щелочными растворами при низких температурах. Это предопределило выбор двустадийного способа выщелачивания.

2. В предложенном двустадийном способе выщелачивания западно-африканских бокситов обеспечивается увеличение эффективности извлечения оксида алюминия из боксита. На первой (низкотемпературной) стадии при атмосферном давлении можно практически полностью разложить гиббсит, а на второй (при более высоких температурах в автоклавах) осуществить довыщелачивание боксита и разложить трудновскрываемые минералы.

3. Определены оптимальные условия выщелачивания бокситов. На первой стадии выщелачивания обратными растворами состава, г/л: Na_2O 245; Na_2O_k 212; Al_2O_3 124 при температуре 105 °С и длительности процесса 150 мин достигнута степень извлечения Al_2O_3 из боксита 87%. После атмосферного и последующего автоклавного выщелачивания при 220 °С в течение 60 мин общее извлечение Al_2O_3 составило 92,7%.

4. В случае разделения жидкой и твердой фаз после атмосферного выщелачивания количество шлама, поступающего на автоклавное выщелачивание, снизилось на 40—

50%, алюминатный раствор отправлен на декомпозицию, тем самым достигнуты сокращение материальных потоков, уменьшение числа необходимых автоклавов, т.е. значительно снижены капитальные затраты на вторую стадию выщелачивания.

5. Процесс отстаивания красного шлама интенсифицирован при введении флокулянта AL P 99 VHM, при концентрации которого 0,04% и дозировании в соотношении 5:1 от объемов пульпы и раствора флокулянта скорость отстаивания красного шлама выросла почти в 50 раз по сравнению с отстаиванием без флокулянта.

6. Для предотвращения гидролиза растворов на стадии промывки красного шлама рекомендуется контролировать и поддерживать температуру на уровне не ниже 95—100 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Traoré, D.L.* Bauxite industry in Guinea and value opportunities of the resulting red mud as residue for chemical and civil engineering purposes / D.L. Traoré, S. Traoré, S. Diakité // *J. Civil Eng. Res.* 2014. V.4. №1. P.14—24.
2. *Mamedov, V.* Principal conditions and geochemical trends in formation of high-grade bauxite deposits, Republic of Guinea / V. Mamedov, A. Chausov, M. Makarova // 16th Intern. Symp. Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th Intern. Symp. Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC Intern. Conf.). 2019. V.98. P.5. DOI : <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199801035>.
3. *Sehnke, E.D.* Russian bauxite resources : current assessment / E.D. Sehnke, A.R. Bond // *Intern. Geology Rev.* 1993. V.35. P.1052—1061.
4. *Meyer, F.M.* Availability of bauxite reserves / F.M. Meyer // *Natural Resources Research.* 2004. V.13. P.161—172.
5. *Beavogui, M.C.* Bauxite enrichment process (Bayer process) : Bauxite cases from Sangaredi (Guinea) and Sierra Leone / M.C. Beavogui, B.G. Balmaev, O.B. Kaba, A.A. Konaté, I.V. Loginova // *AIP Conf. Proc.* 2022. V.2456. Art.020003 P.1—9. <https://doi.org/10.1063/5.0074812>.
6. *Kuznetsov, S.I.* Physical chemistry of the Bayer alumina production process / S.I. Kuznetsov, V.A. Derevyankin. — М. : State scientific and technical publ. house of literature on ferrous and non-ferrous metallurgy. 1964. 223 p.
7. *Федяев, А.Н.* Интенсификация процессов переработки гвинейских бокситов на глинозем по способу Байера: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Федяев Александр Николаевич. СПб. 2011. 19 с.
8. *Лайнер, А.И.* Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер, Н.З. Певзнер. — М. : Metallurgia, 1978. 344 с.
9. *Еремин, Н.И.* Интенсификация процесса автоклавного выщелачивания в производстве глинозема / Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер / В кн. : Гидрометаллургия. Автоклавное выщелачивание. Сорбция. Экстракция. — М. : Наука, 1976. С.30—37.
10. *Иванов, А.И.* Технология производства глинозема / А.И. Иванов, Ю.П. Насекан, Л.П. Иванова. — Запорожье : Кн. изд-во, 2005. 261 с.
11. *Тужилин, А.С.* Повышение технологической ценности гвинейских бокситов для процесса Байера / А.С. Тужилин, Б.Г. Балмаев, Т.Н. Ветчинкина, Ю.В. Заблочкая // «Наука в XXI в. : инновационный потенциал развития» : сб. науч. статей по материалам VII Междунар. науч.-практ. конф. — Уфа : НИЦ Вестник науки, 2021. С.80—83.
12. *Лайнер, Ю.А.* Отчет по теме : «Исследование и технические предложения по применимости технологии М2М в сочетании с интенсифицированным «подслащением» на НГЗ, этапы 1,2. — М. : ИМЕТ РАН, 2006. 102 с.
13. *Зубцова, Е.А.* Исследование влияния минерального состава гвинейского боксита на основные технологические показатели процесса выщелачивания / Е.А. Зубцова, С.С. Киров, И.Б. Воробьев // *Цв. металлы.* 2006. №1. С.45—51.
14. *Зубцова, Е.А.* Исследование технологических свойств гвинейских бокситов / Е.А. Зубцова, И.Б. Воробьев, С.С. Киров, Н.В. Николаев, М.В. Середкин // *Изв. вузов. Цв. металлургия.* 2006. №1. С.12—18.
15. *Лайнер, Ю.А.* Производство глинозема / Ю.А. Лайнер // *Итоги науки и техники. Металлургия цветных и редких металлов.* — М. : ВИНТИ АН СССР, 1979. Т.12. 80 с.
16. *Чернацкая, Л.И.* О скорости растворения кварца в растворах едкого натра / Л.И. Чернацкая, Ю.А. Зайцев // *Науч. тр. ЛГИ.* 1975. Вып.7.
17. *Сугияма, Н.* Изучение выщелачивания кварца из боксита / Н. Сугияма // *Light Metals,* 1960. V.10. №3.