УДК 669.712

В.М.СИЗЯКОВ, *д-р техн. наук, профессор, (812)328-84-65*
О.А.ДУБОВИКОВ, *канд. техн. наук, доцент, (812)328-86-60*
Н.В.НИКОЛАЕВА, *канд. техн. наук, ассистент, (812)328-86-60*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.M.SIZYAKOV, *Dr. in eng. sc., professor,(812)328-8465*
O.A.DUBOVIKOV, *PhD in eng. sc., associate professor, (812)328-86-60*
N.V.NIKOLAEVA, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812)328-86-60*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ПРИ КОНДИЦИОНИРОВАНИИ БОКСИТОВ

Исследована возможность применения сгущения и фильтрации для разделения неоднородных дисперсных систем, образующихся в процессе химического кондиционирования бокситов. Показано, что с увеличением соотношения между жидкой и твердой фазами бокситовой пульпы показатели процесса сгущения улучшаются. Аналогичное влияние оказывает повышение температуры процесса и применение флокулянта. Полученные результата сравниваются с показателями сгущения красного шлама. Для пульпы бокситового концентрата подобрана фильтровальная ткань, обеспечивающая наиболее рациональный режим фильтрации с накоплением осадка.

Ключевые слова: красный шлам, бокситовый концентрат, сгущение, скорость слива, удельная площадь сгущения, фильтрация.

STUDY OF THE SEPARATION PROCESS DISPERSED NONUNIFORM SYSTEMS FOR CONDITIONING BAUXITE

The possibility of thickening and filtration for separation of heterogeneous disperse systems formed during the chemical conditioning of bauxite was investigated. It is shown that with increasing the ratio between liquid and solid phases of bauxite pulp thickening process indicators are improving. A similar influence provides of temperature increase of the process and the use of flocculants. The obtained results are compared with the indicators of condensation of red mud. The filter cloth was chosen for slurry concentrate bauxite, which provides the most rational regime filtration with the accumulation of sediment.

Key words: red mud, bauxite concentrate, thickening, the rate of discharge, the specific area of thickening, filtration.

Известно, что для разделения неоднородных дисперсных систем (суспензий) применяют отстаивание (сгущение), фильтрование и центрифугирование. Эффективность разделения повышается использованием в сочетании с ними процессов промывки осадков и сгущенных пульп. Их закономерности определяются гидродинамикой и в большой степени зависят от конструкции аппаратов и технологических условий их эксплуатации.

При выборе оптимальной аппаратурно-технологической схемы химического кондиционирования бокситов значительную роль играет выбор способа разделения пульпы после обогатительного передела, так как качество получаемого концентрата связано с расходом щелочного раствора. Увеличение соотношения между жидкой и твердой фазами (Ж:Т) способствует повышению кремниевого модуля концентрата [3] и при соотно-

шениях Ж:Т ≥ 10 рационально применять для разделения пульп процесс отстаивания. С этой целью были выполнены исследования для определения математического описания и расшифровки экспериментальных данных по определению удельной площади сгущения различных пульп.

Первые работы по анализу процесса сгущения, в которых приводилась принципиальная возможность расчета производительности сгустителя на основании данных серии опытов по осаждению, были предприняты Ко и Клевенджером еще в 1916 г. [5]. В дальнейшем Кинч предложил более совершенный математический анализ данных, что в значительной степени дополнило выводы предыдущих авторов. Применение математических методов к сгущению дает возможность упростить экспериментальную часть работы и уточнить интерпретацию полученных результатов [5, 6].

В методике Ко и Клевенджера делается предположение, что скорость осаждения частиц есть функция только локальной концентрации. Это же принято как основное допущение и в расчетах Кинча. Выводы, полученные им в результате математической обработки, бесспорны, однако, как указывают Робертс, Телмедж и Фитч [6, 7], принятые им допущения о независимости характеристик осаждения флоккул от исходной концентрации твердого в пульпе, в которой они образуются, не всегда верны, что и доказывается экспериментальным путем. Однако ими не показано, что метод Кинча дает более удовлетворительные результаты, чем результаты, полученные по методике Ко и Клевенджера. Они делают эти выводы, опираясь на большой объем статистического материала, полученного на различных заводах, и показывают, что выбор удельной площади сгущения по методике Кинча при изменении исходных параметров пульпы, поступающей на сгущение, прекрасно совпадает с действительными производственными данными.

В настоящее время проблема математической обработки экспериментальных данных стала еще более актуальной. В работе [4] предпринимается попытка усовершенствовать метод Кинча, однако эта интерпретация метода дает худшие результаты между промышленными и расчетными данными.

Помимо теоретических исследований методики Кинча, выполнялось экспериментальное разделение бокситовых пульп при различных условиях. Для идентификации данные сравнивались с кривой сгущения красного шлама, полученного при выщелачивании боксита Тургайского месторождения в условиях, аналогичных процессу выщелачивания на Павлодарском алюминиевом заводе.

Химический состав твердой фазы пульпы, подаваемой на сгущение следующий, % (по массе): Al_2O_3 – 40,5; SiO_2 – 10,8; Fe_2O_3 – 15,0; CO_2 – 2,1; CaO – 0,73. Изучалось влияние температуры процесса и разбавления пульпы при отношении Ж:Т, равном 4:1, 6:1, 8:1 и 10:1, а также добавок синтетического флокулянта (полиакриламида – ПАА), добавляемого из расчета 100 г на 1 т твердого в пульпе. Жидкая фаза представляла щелочной раствор, содержащий 150 г·дм$^{-1}$ $Na_2O_{общ}$ и 16 г·дм$^{-1}$ $Na_2O_{уг}$.

С использованием методики Кинча [7] по экспериментальным данным были рассчитаны показатели процесса сгущения (табл.1).

Таблица 1

Технологические показатели сгущения бокситовых пульп

Условия сгущения пульпы	Ж:Т в сгущенном продукте	Скорость слива, м/ч	Удельная площадь сгущения, м^2/(т·сут)
Красный шлам			
95 °С; Ж:Т=20:1	3,60	0,310	0,614
Бокситовая пульпа			
50 °С; Ж:Т=4:1*	2,50	0,026	2,060
50 °С; Ж:Т=10:1*	2,55	0,238	0,975
50 °С; Ж:Т=10:1**	3,00	0,188	2,100
90 °С; Ж:Т=10:1*	4,50	0,280	0,660
90 °С; Ж:Т=10:1**	4,80	0,214	1,230

* с ПАА; ** без ПАА

Полученные данные показывают, что при высоком соотношении Ж:Т в пульпе скорость сгущения бокситовой пульпы сопоставима со скоростью сгущения красного шлама. Как известно, разделение пульпы

методом сгущения при малых отношениях жидкой и твердой фаз неэффективно, однако, было необходимо провести эти эксперименты для последующей математической обработки и проверки возможности отделения хотя бы части жидкой фазы сразу по ходу технологического эксперимента без дополнительного разбавления с минимальным количеством жидкости, задействованной в процессе. Влияние степени разбавления пульпы, поступающей на сгущение при температуре 50 °С, четко прослеживается на рис.1: значительно увеличивается скорость осаждения при увеличении отношения Ж:Т от 4:1 до 10:1, скорость слива при этом возрастает на порядок. Влияние температуры (рис.2) заметно сказывается на изменении удельной площади сгущения. Увеличение температуры процесса сгущения на 40 °С позволяет снизить удельную площадь сгущения на 30-40 %. Однако повышение температуры нежелательно, так как увеличиваются энергозатраты и возрастает вероятность протекания вторичных нежелательных реакций, приводящих к потерям глинозема и побочным процессам, затрудняющим дальнейшую технологическую переработку.

Как и следовало ожидать, введение синтетического флокулянта существенно увеличивает скорость сгущения, но практически не оказывает воздействия на уплотнение твердого в зоне сгущения. Так, при введении флокулянта скорость слива увеличивается при 50 и 90 °С соответственно: с 0,188 до 0,238 м/ч и с 0,214 до 0,280 м/ч. Сопоставление кривых 3 и 4 показывает, что скорость сгущения бокситовой пульпы с ПАА при 50 °С аналогична процессу при 90 °С без ПАА и близка к эталонной. Следовательно, использование флокулянта целесообразно для интенсификации сгущения бокситовых пульп.

Кривые сгущения при различной температуре продуктов обогащения обожженного боксита Среднего Тимана представлены на рис.3. Здесь так же, как и при сгущении бокситовых пульп имеет место незначительное улучшение показателей сгущения при увеличении температуры.

Наиболее широко для разделения жидкой и твердой фаз применяется фильтрование, при этом его используют не только для отделения твердой фазы от раствора в плотных пульпах, но и для осветления растворов, содержащих незначительное количество твердых частиц.

Под действием разности давлений жидкость проходит разделяющую сосуд перегородку, а твердые частицы задерживаются на ее поверхности или внутри перегородки. В первом случае на перегородке постепенно нарастает слой осадка, и процесс называется фильтрованием с образованием осадка. Во втором случае твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки, при этом в зависимости от соотношения размеров частиц и пор в одну пору может проникать одна частица, полностью ее закупоривая, или постепенно несколько частиц. Такой процесс называется фильтрованием с закупориванием пор.

Как правило, фильтрование с закупориванием пор имеет место при осветлении растворов с малым содержанием тонкодисперсных частиц твердой фазы и в начальный период фильтрования более плотных пульп.

Количественно процесс фильтрования описывают кинетическими уравнениями, связывающими скорость фильтрования с параметрами процесса и свойствами твердых частиц, жидкой фазы и фильтровальной перегородки.

Практическое использование кинетических уравнений требует определения ряда величин, называемых постоянными фильтрования, таких как удельное сопротивление осадка и фильтровальной перегородки, отношение объема осадка к объему фильтрата, начальная скорость фильтрования.

Вид расчетных формул для скорости фильтрования [1] при постоянном давлении зависит, прежде всего, от типа фильтрования, определить который можно по характеру зависимостей между переменными. Введем следующие обозначения: V – объем фильтрата, м^3; τ – продолжительность фильтрования, с; ν – скорость фильтрования, м^3/с; q – объем фильтрата, прошедшего через 1 м^2 фильтровальной перегородки, м^3/м^2; s – поверхность фильтрования, м^2; ΔP – разность давлений

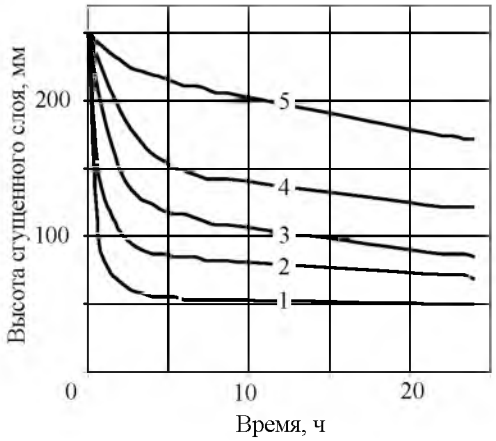


Рис.1. Влияние отношения Ж:Т пульпы процесса сгущения при 50 °С

1 – красный шлам; бокситовая пульпа при Ж:Т соответственно: 2 – 10:1; 3 – 8:1; 4 – 6:1; 5 – 4:1

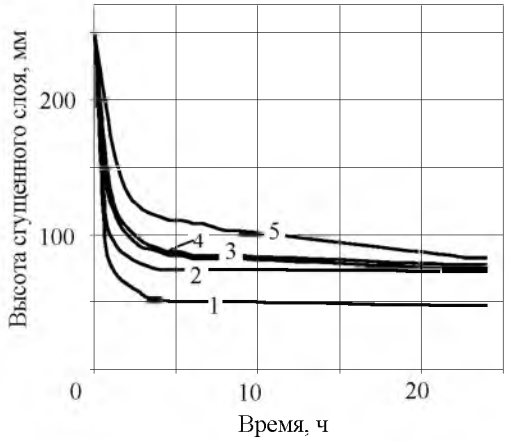


Рис.2. Влияние температуры и добавки ПАА на процесс сгущения

1 – красный шлам; бокситовая пульпа при Ж:Т=10:1 соответственно: 2 – 90 °С с ПАА; 3 – 50 °С с ПАА; 4 – 90 °С без ПАА; 5 – 50 °С без ПАА

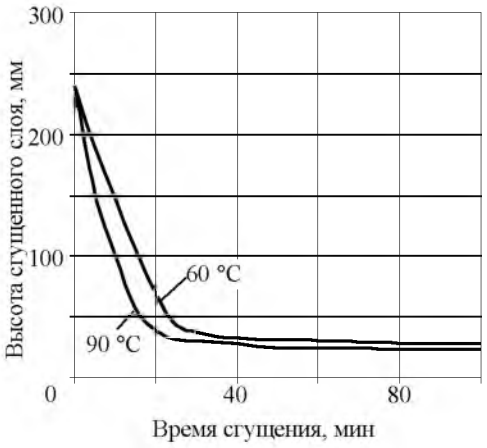


Рис.3. Влияние температуры на сгущение бокситового концентрата

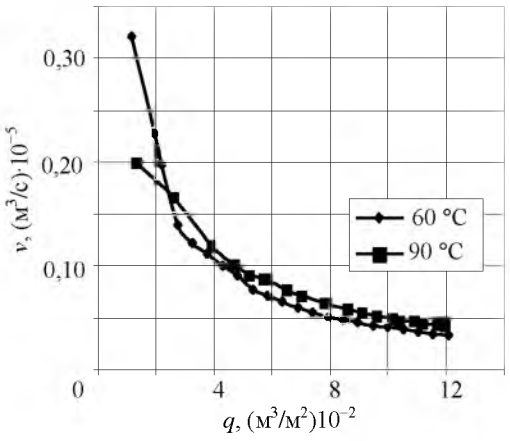


Рис.4. Результаты фильтрации в координатах $v = f(q)$ (линейная зависимость при полном закупоривании пор)

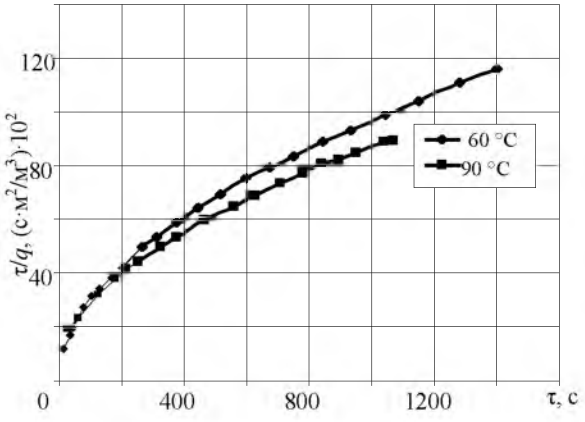


Рис.5. Результаты фильтрации в координатах $\tau/q = f(\tau)$ (линейная зависимость при постепенном закупоривании пор)

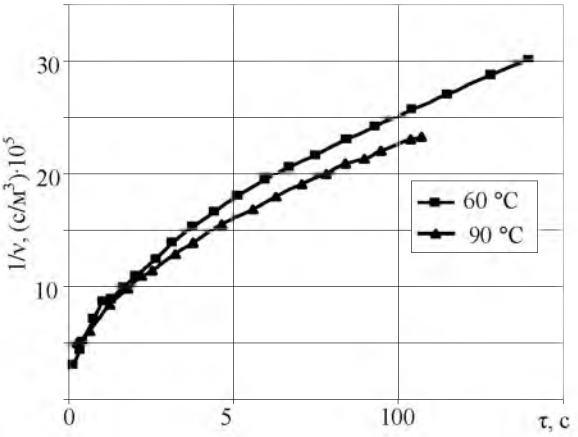


Рис.6. Результаты фильтрации в координатах $1/v = f(\tau)$ (линейная зависимость при промежуточный режиме фильтрации)

Таблица 2

Данные для определения режима процесса фильтрации и вычисления коэффициентов регрессии для режима с образованием осадка

V, м$^3\cdot10^{-5}$	τ, с	$\tau/V = 1/v$, (с/м^3)10^5	V^2, (м^3)$^2 10^{-10}$	$q = V/s$, (м^3/м^2)10^{-2}	$v = V/\tau$, (м^3/с)10^{-5}	τ/q, (с·м^2/м^3)10^2
Температура фильтрации 60 °С						
4,5	14	3,11	20,25	1,17	0,32	11,98
7,5	33	4,40	56,25	1,95	0,23	16,94
8,5	43	5,10	72,25	2,21	0,20	19,48
10,5	75	7,14	110,25	2,73	0,14	27,50
12,5	102	8,66	156,25	3,25	0,12	31,42
14,5	129	8,90	210,25	3,77	0,11	34,25
16,5	164	9,94	272,25	4,29	0,10	38,27
18,5	202	10,92	342,25	4,81	0,09	42,04
20,5	265	12,49	420,25	5,32	0,08	49,77
22,5	312	13,87	506,25	5,84	0,07	53,39
24,5	374	15,26	600,25	6,36	0,07	58,77
26,5	442	16,68	702,25	6,88	0,06	64,22
28,5	514	18,04	812,25	7,40	0,06	69,44
30,5	595	19,51	930,25	7,92	0,05	75,11
32,5	671	20,65	1056,25	8,44	0,05	79,49
34,5	748	21,68	1190,25	8,96	0,05	83,47
36,5	843	23,09	1332,25	9,48	0,04	88,92
38,5	931	24,18	1482,25	10,00	0,04	93,10
40,5	1041	25,70	1640,25	10,52	0,04	98,96
42,5	1150	27,06	1806,25	11,04	0,04	104,18
44,5	1279	28,74	1980,25	11,56	0,03	110,66
46,5	1398	30,06	2162,25	12,08	0,03	115,75
562	11325	355,18	17861,50			
Температура фильтрации 90 °С						
5	25	5,00	25,00	1,30	0,20	19,25
10	60	6,00	100,00	2,60	0,17	23,10
15	125	8,33	225,00	3,90	0,12	32,08
18	177	9,83	324,00	4,68	0,10	37,86
20	218	10,90	400,00	5,19	0,09	41,97
22	252	11,45	484,00	5,71	0,09	44,10
25	322	12,88	625,00	6,49	0,08	49,59
27	374	13,85	729,00	7,01	0,07	53,33
30	464	15,47	900,00	7,79	0,06	59,55
33	556	16,85	1089,00	8,57	0,06	64,87
35	627	17,91	1225,00	9,09	0,06	68,97
37	706	19,08	1369,00	9,61	0,05	73,46
39	780	20,00	1521,00	10,13	0,05	77,00
40	837	20,92	1600,00	10,39	0,05	80,56
42	895	21,31	1764,00	10,91	0,05	82,04
43	948	22,05	1849,00	11,17	0,05	84,88
45	1038	23,07	2025,00	11,69	0,04	88,81
46	1070	23,26	2116,00	11,95	0,04	89,55

по обе стороны фильтрующей перегородки с осадком, Па; $R_о$ – сопротивление слоя осадка, м$^{-1}$; $R_п$ – сопротивление фильтровальной перегородки, м$^{-1}$; μ – динамическая вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с; $x_о$ – отношение объемов осадка и фильтрата; h – высота слоя осадка, м; $r_о$ – удельное объемное сопротивление осадка, оказываемое потоку фильтрата равномерным слоем осадка толщиной 1 м, (м^2)$^{-1}$.

Для различных типов фильтрования линейными будут следующие функциональные зависимости:

• с полным закупориванием пор $v = f(q)$;

• с постепенным закупориванием пор $\tau / q = f(\tau)$;

• промежуточный $1/v = f(\tau)$;

• с образованием осадка $\tau/V = f(V)$.

Для определения типа и постоянных, входящих в уравнение процесса фильтрования, использовалась установка, состоящая из водообогреваемого фильтрующего узла и соединенного с ним мерного цилиндра, находящегося под заданным разряжением. В зависимости от поставленной задачи имелась возможность менять фильтровальную ткань и изменять как температуру процесса, так и разряжение. Фильтрация проводилась с использованием различной фильтровальной ткани, при температурах 60 и 90 °С и перепаде давления 500 мм р.с. ($6{,}67 \cdot 10^4$ Па). Результаты процесса фильтрации представлены в табл.2.

Из рис.4-6 видно, что при использовании в качестве фильтрующей перегородки капроновой ткани не наблюдается полного или постепенного закупоривания пор, так как линейная зависимость прослеживается в координатах для фильтрования с образованием осадка (рис.7).

Известно, что скорость фильтрования с образованием осадка определяется уравнением [7, 8]

$$\frac{dV}{sd\tau} = \frac{\Delta P}{\mu(R_о + R_п)}. \qquad (1)$$

Для случая фильтрования с образованием осадка вначале имеет место некоторое увеличение сопротивления фильтровальной

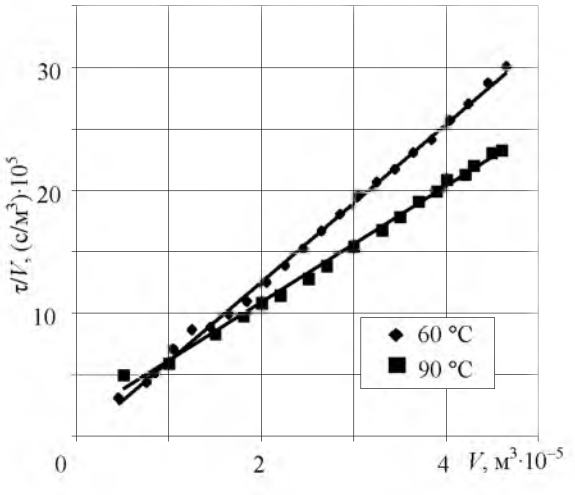


Рис.7. Результаты фильтрации в координатах $\tau/V = f(V)$ (линейная зависимость при образовании осадка)

перегородки вследствие проникновения в поры небольшого количества тонких частиц, однако далее оно остается постоянным. Сопротивление же осадка возрастает. Объем осадка на фильтре пропорционален объему фильтрата и зависит от толщины слоя осадка:

$$x_о V = hs \rightarrow h = x_о \frac{V}{s}. \qquad (2)$$

Тогда сопротивление слоя осадка

$$R_о = r_о h = r_о h_о \frac{V}{s}.$$

Уравнение (1) запишем в виде

$$\frac{dV}{sd\tau} = \frac{\Delta P}{\mu\left(r_о x_о \frac{V}{s} + R_п\right)}.$$

При фильтровании суспензий постоянного состава со стабильными свойствами при постоянном давлении на данном фильтре после интегрирования получим уравнение фильтрования

$$V^2 + 2\frac{R_п s}{r_о x_о} V = 2\frac{\Delta P s^2}{\mu r_о x_о}\tau$$

или

$$\frac{\tau}{V} = \left[\frac{\mu r_о x_о}{2\Delta P s^2}\right] V + \left[\frac{R_п \mu}{\Delta P s}\right].$$

Таблица 3

Технологические показатели процесса фильтрования бокситовых пульп

Величина	Обозначение	Единица измерения	Температура	
			60 °С	90 °С
Объем фильтрата	$V = f(\tau)$	$м^3$		
Продолжительность фильтрования	τ	с		
Поверхность фильтрования	s	$м^2$	$3{,}85 \cdot 10^{-3}$	$3{,}85 \cdot 10^{-3}$
Перепад давления по обе стороны фильтровальной перегородки с осадком	ΔP	Па	$6{,}67 \cdot 10^{4}$	$6{,}67 \cdot 10^{4}$
Динамическая вязкость жидкой фазы суспензии	μ	Па·с	$1{,}027 \cdot 10^{-3}$	$0{,}668 \cdot 10^{-3}$
Отношение объемов осадка и фильтрата	x_o	$м^3/м^3$	$9{,}626 \cdot 10^{-2}$	$9{,}206 \cdot 10^{-2}$
Сопротивление фильтровальной перегородки	$R_п$	$м^{-1}$	~ 0,0	$5{,}619 \cdot 10^{10}$
Удельное объемное сопротивление осадка	r_o	$(м^2)^{-1}$	$1{,}284 \cdot 10^{14}$	$1{,}522 \cdot 10^{14}$
Скорость фильтрации при образовании лепешки толщиной 10 мм	$dV / sd\tau$	$м^3/(м^2 \cdot с)$	$5{,}06 \cdot 10^{-5}$	$6{,}32 \cdot 10^{-5}$

На основании полученных экспериментальных данных были рассчитаны постоянные процесса фильтрования с образованием осадка (табл.3).

Анализ результатов позволил сделать следующее заключение. Повышение температуры пульпы снижает динамическую вязкость жидкой фазы, которая более интенсивно увлекает за собой тонкодисперсные частицы и на начальном этапе частично закупоривает поры фильтрующей перегородки. С другой стороны, приводит к образованию более плотного осадка и, как следствие, к небольшому возрастанию его удельного объемного сопротивления. Скорость процесса фильтрации для более нагретой пульпы при образовании осадка толщиной в 1 см увеличивается на 25 %. Это доказывает целесообразность фильтрации более горячих пульп.

Проверка в опытно-промышленном масштабе подтвердила лабораторные исследования и на ленточном фильтре ЛС-1,6-0,5/3,5: при толщине лепешки 10 мм была получена производительность 0,85 $м^3/(м^2 \cdot ч)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зеликман А.Н.* Теория гидрометаллургических процессов / А.Н.Зеликман, Г.М.Вольдман, Л.В.Беляевская. М., 1975. 504 с.

2. *Набойченко С.С.* Расчеты гидрометаллургических процессов / С.С.Набойченко, А.А.Юнь. М., 1995. 428 с.

3. *Наумчик А.Н.* Производство глинозема: Учеб. пособие / А.Н.Наумчик, О.А.Дубовиков. Л., 1987. 99 с.

4. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы / Под ред. О.С.Богданова, В.И.Ревнивцева. М., 1985. 376 с.

5. *Porter J.L.* Interpretation of settling test data for esmnbgtion of area requirements for settling and consolidation of nuds / J.L.Porter, H.F.Scandrett // Extractive Metallurgy of Aluminium. 1963. Vol.1. P.95-112.

6. *Talmage S.P.* Determining of unit area thickeners / S.P.Talmage, E.B.Fitch // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. Vol. 47. № 1. 17 p.

7. *Fitch B.* Current thecru and thiekener design. An autnoritativs eritigue of the establisned and recently pripcsed methods thiekener design // Industrial and Engineering Chemistry. 1966. Vol.58. № 10. P.18-28.

REFERENCES

1. *Zelikman A.N.*, *Voldman G.M.*, *Belyaev L.V* The theory of hydrometallurgical processes. Moscow, 1975. 504 p.

2. *Naboychenko S.S.*, *Yun A.A.* Calculations of hydrometallurgical processes. Moscow. 1995. 428 p.

3. *Naumchik A.N.*, *Dubovik O.A.* Production of alumina: Textbook. Leningrad, 1987. 99 p.

4. Handbook of ore enrichment. Special and support processes / The editorship O.S.Bogdanov, V.I.Revnivtseva. Moscow, 1985. 376 p.

5. *Porter J.L.* Interpretation of settling test data for esmnbgtion of area requirements for settling and consolidation of nuds / J.L.Porter, H.F.Scandrett // Extractive Metallurgy of Aluminium. 1963. Vol.1. P. 95-112.

6. *Talmage S.P.* Determining of unit area thickeners / S.P.Talmage, E.B.Fitch // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. Vol.47. N 1. 17 p.

7. *Fitch B.* Current thecru and thiekener design. An autnoritativs eritigue of the establisned and recently pripcsed methods thiekener design // Industrial and Engineering Chemistry. 1966. Vol. 58. N 10. P. 18-28.