

УДК 622.764.7

DOI 10.17513/use.38158

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ КРУТОНАКЛОННОГО КОНЦЕНТРАТОРА

Матвеев А.И., Еремеева Н.Г., Нечаев П.Б.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук», Институт горного дела Севера
имени Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук,
Якутск, e-mail: danng1@mail.ru*

Данная работа проводится в лаборатории обогащения полезных ископаемых Института горного дела Севера и является продолжением исследований, проводимых на крутонаклонном концентрате, защищенном патентом РФ. Ранее на основе проведенных экспериментальных работ на крутонаклонном концентрате были выявлены неудовлетворительное извлечение полезного компонента, засоренность концентрата в накопительных камерах, неравномерность динамических процессов по всей площади рабочей поверхности концентрата. В целях дальнейшего усовершенствования концентрата был установлен клапан-отсекатель у патрубка для подачи воды по всему объему концентрата. Проведены экспериментальные исследования по повышению эффективности разделения минералов, где особое внимание уделено стабильности протекающих динамических процессов по всей рабочей камере концентрата, исключению образования застойных зон за счет управления потоками и повышению качества концентрата в целом. Благодаря регулировке режимов работы концентрата клапаном-отсекателем, в целом удается избавиться от этих негативных явлений и существенно увеличить площадь эффективной рабочей зоны. Определены наиболее рациональные результаты при наклоне деки концентрата 70°, где извлечение тяжелой фракции (магнетита) достигает 91,16% при скорости 0,35 л/с. Использование клапана-отсекателя дает возможность регулирования потока воды внутри концентрата, при котором найдены условия эффективного разделения минеральных частиц.

Ключевые слова: крутонаклонный концентрат, минеральная смесь, обогащение, извлечение, концентрат, хвосты, разделение

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

EXPERIMENTAL WORK TO DETERMINE THE PARAMETERS OF A LABORATORY MODEL OF A STEEPLY INCLINED CONCENTRATOR

Matveev A.I., Eremeeva N.G., Nechaev P.B.

*Federal Research Center “Yakut Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences”, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: danng1@mail.ru*

This work is carried out in the laboratory of the Laboratory of mineral processing Institute of Mining of the North and is a continuation of research conducted on a steep-slope concentrator protected by a patent of the Russian Federation. Earlier, on the basis of experimental work carried out on a steeply inclined concentrator, unsatisfactory extraction of the useful component, clogging of the concentrate in the storage chambers, uneven dynamic processes over the entire area of the working surface of the concentrator were revealed. In order to further improve the concentrator, a shut-off valve was installed at the nozzle for water supply throughout the entire volume of the concentrator. Experimental studies have been carried out to improve the efficiency of mineral separation, where special attention is paid to the stability of the dynamic processes occurring throughout the working chamber of the concentrator, the exclusion of the formation of stagnant zones due to flow control and improving the quality of the concentrate as a whole. Thanks to the adjustment of the operating modes of the concentrator by the shut-off valve, it is generally possible to get rid of these negative phenomena and significantly increase the area of the effective working area. The most rational results are determined when the deck of the concentrator 70° is tilted, where the extraction of heavy fraction (magnetite) reaches 91.16% at a speed of 0.35 l/s. The use of a shut-off valve makes it possible to regulate the flow of water inside the concentrator, at which conditions for effective separation of mineral particles are found.

Keywords: steeply inclined concentrator, mineral mixture, mineral processing, extraction, concentrate, tailings, separation

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 0297-2021-0022 of the unified state information system for recording research, development and technological work for civil purposes No. 122011800089-2) using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal research center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», grant No. 13. Center for collective use 21.0016.

В современных условиях в связи с истощением запасов россыпного месторождения, накоплением техногенных отвалов золото-содержащих руд все большую актуальность приобретает разработка новых эффективных технологий извлечения мелкого и тонкого золота. Гравитационные методы обогащения достаточно широко применяются при переработке полезных ископаемых. Преимущества этих методов – экономичность, отсутствие вреда для окружающей среды и высокая производительность [1, 2].

Необходимость повышения извлечения мелкого и тонкого золота ставит задачу совершенствования известных и разработку новых высокоэффективных, экологически безопасных обогатительных процессов и аппаратов [3–5].

Данная работа проводится в лаборатории ОПИ Института горного дела Севера и является продолжением исследований, проводимых на крутонаклонном концентраторе, защищенном патентом РФ [6]. Идея создания нового концентратора основана на ранее выявленных особенностях поведения минеральных частиц с различной плотностью и формой, увлекаемых восходящим потоком воды по наклонной поверхности.

На начальном этапе исследований были определены базовые конструктивные параметры концентратора. На основе проведенных экспериментальных работ на крутонаклонном концентраторе были выявлены следующие недостатки: неудовлетворительное извлечение полезного компонента, потери полезного компонента из-за высокого потока воды, неселективное заполнение камер для сбора концентрата. В связи с этим возникла необходимость продолжения исследовательских работ. В поисках устранения выявленных недостатков были внесены изменения в конструкцию донной части концентратора (добавление перечистных пластин с дополнительной системой подачи разжижающей воды). В статье приводятся результаты поисковых работ на последнем этапе опытно-конструкторских и экспериментальных исследований, предусматривающих корректировку конструкции и режимных параметров работы лабораторной модели крутонаклонного концентратора.

Постановка задачи

Крутонаклонный концентратор состоит из корпуса со вставленными пластинами, которые оснащены специальным рифлением. Концентратор имеет бункер для подачи материала, патрубков для подачи транс-

портной воды, патрубков для подачи воды по всему объему концентратора, накопители концентрата с системой разрыхления концентрата, разгрузочное устройство для удаления хвостов.

Концентратор работает следующим образом. Материал в виде гидросмеси (пульпы) поступает через питающую трубку в рабочую зону концентратора, под действием восходящего потока, подаваемого через патрубок, веерообразно перемещается по рифлям осадительной пластины, где происходит разделение частиц по крупности и плотности. В нижней части концентратора расположены камеры для сбора и концентрирования тяжелой фракции. Восходящий поток обеспечивает вынос частиц легкой фракции из разделяемого материала через сливной патрубок концентратора в хвосты.

Гравитационное разделение минеральной смеси в концентраторе в создаваемом потоке гидросмеси основано на двух механизмах: гидроклассификации твердых частиц по крупности и плотности в объеме потока пульпы и разделению минералов в тонком слое воды на поверхности нарифленной наклонной плоскости.

На раннем этапе исследований были определены базовые параметры концентратора: угол наклона хвостовой части не должен быть меньше 45° , наклон рифлей осадительной пластины концентратора – 60° , наклон самого корпуса концентратора – 70° относительно горизонтали [7].

На основе проведенных экспериментальных работ на крутонаклонном концентраторе были выявлены следующие недостатки:

- неудовлетворительное извлечение полезного компонента на примере разделения искусственной смеси, состоящей из речного песка и магнетита, до 50 %;
- высокая засоренность тяжелой фракции (концентрата) в накопительных камерах;
- неравномерность динамических процессов по всей площади рабочей поверхности концентратора.

Проведенные изменения в конструкции донной части концентратора (добавление перечистных пластин с системой подачи разрыхляющей воды) позволили частично сократить объем накапливаемой тяжелой фракции за счет перечистки материала на поверхности осадительных пластин под воздействием дополнительного разрыхляющего потока воды. Но при этом использование дополнительной перечистки в донной части концентратора увеличивает расход воды и усложняет конструкцию.

В целях дальнейшего усовершенствования концентратора продолжены экспериментальные исследования по повышению эффективности разделения минералов, где особое внимание уделено стабильности протекающих динамических процессов по всей рабочей камере концентратора, исключению образования застойных зон за счет управления потоками и повышению качества концентрата в целом.

Материалы и методы исследования

Для экспериментальных исследований в качестве испытуемого материала использовалась смесь речного песка ($\rho \sim 2,5 \text{ г/см}^3$) с магнетитом ($\rho \sim 5,2 \text{ г/см}^3$) крупностью 1,0 мм. Магнетит был выбран в качестве индикатора тяжелой фракции. Такой материал легко выделяется из продуктов обогащения с помощью магнитной сепарации, потому он играет и роль индикатора. Эксперименты проводились на лабораторной модели концентратора, представленной на рис. 1, а, состоящей из корпуса (1), бункера для подачи материала (2), патрубка для подачи транспортной воды (3), патрубка для подачи воды по всему объему концентратора (4), рифлей (5), накопителей концентрата (6), разгрузочного

устройства для удаления хвостов (7) и клапана-отсекателя (8).

В ходе экспериментальных исследований были испытаны варианты установки с регулирующим клапаном-отсекателем (8) для подачи основного потока воды под разными углами концентратора или регулировки вектора направления потока (рис. 1, в, г). При изменении положения клапана-отсекателя (рис. 1, б) появляется возможность управлять веерным (регулируемым) потоком по высоте и менять вектор его направления для того, чтобы установить рациональные скорости потоков по всей поверхности рабочей полости концентратора в зависимости от вещественного состава разделяемой минеральной смеси.

С помощью клапана-отсекателя регулируются потоки гидросмеси, по рабочей поверхности концентратора устанавливается более равномерная подача в надрифленное пространство рабочей полости и тем самым управляется скорость перемещения потока по высоте.

Клапан-отсекатель имеет три условных положения – верхнее, среднее и нижнее. На рисунке 1 представлены наблюдаемые линии потока в зависимости от устанавливаемого положения клапана-отсекателя.

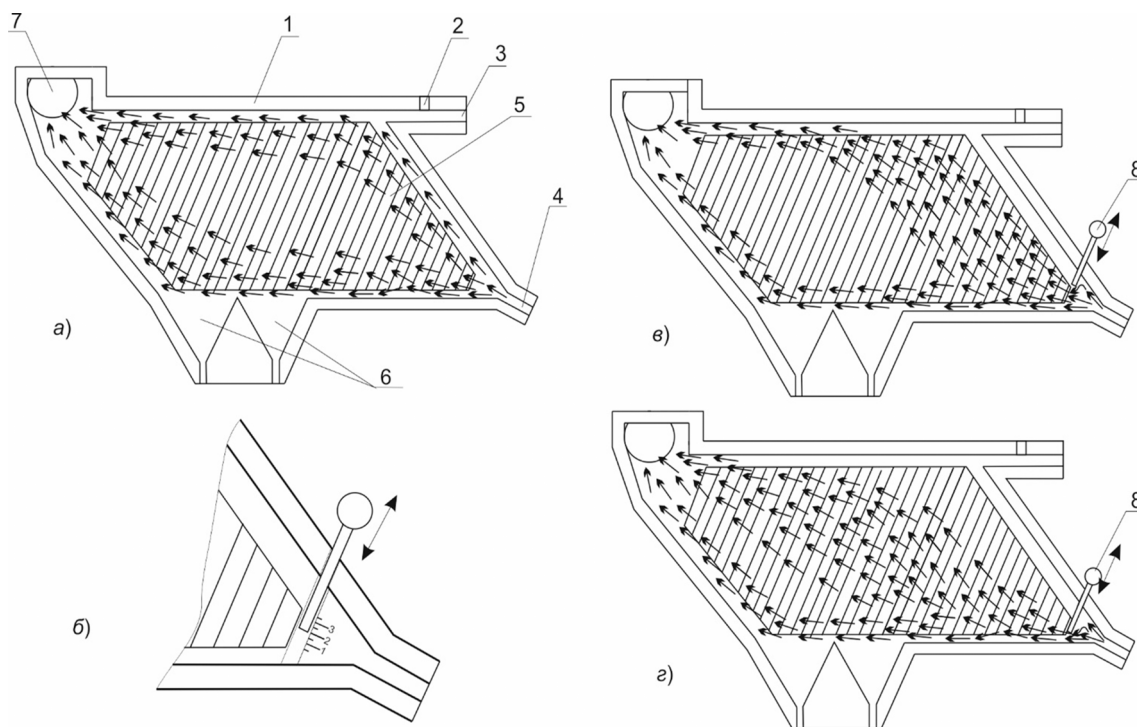


Рис. 1. Линии потоков воды в рабочей зоне крутонаклонного концентратора с клапаном-отсекателем: а) без клапана-отсекателя, б) клапан-отсекатель, в) верхнее положение клапана-отсекателя, г) среднее положение клапана-отсекателя

При свободном доступе потока в рабочую зону концентратора без клапана-отсекателя, поток воды формируется преимущественно в верхней и нижней части концентратора, образуя в центре деки концентратора застойные зоны.

В верхнем положении клапана-отсекателя (полуоткрытый вариант подачи воды) достигается равномерное распределение потока по площади надрифельного пространства, исключая движение гидросмеси по периферии рифлей, в особенности в верхней его части. В нижнем положении клапана наблюдается движение пульпы в нижней трети рифлей, что не обеспечивает использование всей площади для разделения минеральных смесей. А увеличение потока в нижней части увеличивает неселективный вынос тяжелой фракции. При учете всех принятых условий и конструктивных особенностей концентратора, в среднем положении клапана-отсекателя происходит более равномерное распределение потока гидросмеси и по большей площади надрифельного пространства, что не могло не повлиять на результаты по извлечению и выходу имитатора.

При проведении испытаний визуально определялось положение клапана-отсекателя, при котором достигается наиболее устойчивое положение потоков гидросмеси по всей высоте и площади рабочей зоны концентратора. Положение клапана-отсекателя на данном этапе подбирается опытным путем.

В каждом случае необходимы действия с клапаном-отсекателем для управления потоками, т.е. условиями разделения минералов.

Главным условием рациональности формирующихся потоков подаваемой воды и гидросмеси в рабочей зоне концентратора является необходимость исключения застойных зон на рабочей поверхности и зон «пробоя», по которым образуются потоки повышенной скорости.

Благодаря регулировке режимов работы концентратора клапаном-отсекателем, в целом удается избавиться от этих негативных явлений и существенно увеличить площадь эффективной рабочей зоны.

Эксперименты проводились с изменением скорости подачи воды от 0,26 до 0,42 л/с, определяемой расходомером в точке подачи исходной воды в патрубок ввода в концентратор и при углах наклона установки концентратора (деки) 60°, 70°, 80°.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что при малых скоростях подачи воды со скоростью 0,26 и 0,31 л/с при всех углах наклона концентратора, основной материал выпадает в зону накопления тяжелых фракций и происходит неселективное забивание камер, т.е. процесс разделения минералов не происходит. Также за пределы скорости подачи воды свыше 0,5 л/с в концентратор процесс разделения также расстраивается из-за высокой скорости потока.

Проведены серии экспериментов в пределах подаваемого объема потока воды и дебита подачи исходной минеральной смеси, состоящей из 200 г песка и 10 г магнетита, по которым установлены определенные закономерности разделения тяжелых минералов и выделены наиболее характерные точки по параметрам выхода продуктов разделения и извлечения тяжелой фракции (имитатора). При этом основным показателем работы является возможность сокращения материала и уровень потерь с хвостами индикаторов тяжелой фракции.

В табл. 1–3 приведены наиболее характерные (усредненные) результаты экспериментов показателей выхода песка и извлечение индикатора при подаче потока воды со скоростью 0,42 и 0,35 л/с при разных углах наклона концентратора (деки).

Из данных, приведенных в таблицах, следует, что при наклоне концентратора 60° основная масса материала выпадает в нижние накопительные камеры и процесса разделения не происходит. При наклоне концентратора 70° легкая фракция (песок) выделяется в хвостовой патрубок, но при увеличении скорости потока до 0,42 л/с происходит вынос и магнитных индикаторов (тяжелой фракции). Уровень потерь индикаторов 21,75%.

Графическое представление результатов на рис. 2 показывает, что использование клапана-отсекателя существенно влияет на показатели разделения: увеличивается извлечение практически при одинаковом выходе концентрата при скорости подаваемого потока воды 0,35 л/с начиная с угла наклона 70°. При увеличении скорости потока 0,42 л/с (рис. 3) четко вырисовывается условие рациональности разделения, достигающееся при угле наклона концентратора (деки) 70°, при котором сохраняется достаточно высокий уровень извлечения при минимальном значении выхода концентрата.

Таблица 1

Наиболее характерные (усредненные) показатели выхода песка
и извлечение индикатора при наклоне концентратора 60°

№	Продукт	Общий вес, г	Песок, г	Выход песка γ , %	Магнетит, г	Извлечение индикатора ϵ , %
Скорость потока воды 0,42 л/с						
1	Камера 1	14,76	9,23	4,97	5,54	56,16
2	Камера 2	76,86	73,08	39,37	3,78	38,36
3	Хвосты	103,85	103,31	55,66	0,54	5,48
	Всего	195,47	185,61	100,00	9,86	100,00
Скорость потока воды 0,35 л/с						
1	Камера 1	31,10	24,59	12,64	6,51	66,87
2	Камера 2	120,19	117,16	60,25	3,03	31,07
3	Хвосты	52,90	52,70	27,10	0,20	2,05
	Всего	204,18	194,45	100,00	9,74	100,00

Таблица 2

Наиболее характерные (усредненные) показатели выхода песка
и извлечение индикатора при наклоне концентратора 70°

№	Продукт	Общий вес, г	Песок, г	Выход песка γ , %	Магнетит, г	Извлечение индикатора ϵ , %
Скорость потока воды 0,42 л/с						
1	Камера 1	5,28	2,47	1,25	2,81	28,38
2	Камера 2	33,07	28,14	14,23	4,93	49,87
3	Хвосты	169,23	167,08	84,52	2,15	21,75
	Всего	207,57	197,68	100,00	9,89	100,00
Скорость потока воды 0,35 л/с						
1	Камера 1	18,43	12,48	6,41	5,95	60,78
2	Камера 2	51,54	48,57	24,95	2,98	30,39
3	Хвосты	134,46	133,60	68,64	0,87	8,84
	Всего	204,43	194,64	100,00	9,79	100,00

Таблица 3

Наиболее характерные (усредненные) показатели выхода песка
и извлечение индикатора при наклоне концентратора 80°

№	Продукт	Общий вес, г	Песок, г	Выход песка γ , %	Магнетит, г	Извлечение индикатора ϵ , %
Скорость потока воды 0,42 л/с						
1	Камера 1	2,55	1,01	0,53	1,54	15,66
2	Камера 2	15,43	11,43	6,05	4,00	40,66
3	Хвосты	180,81	176,52	93,42	4,30	43,68
	Всего	198,79	188,95	100,00	9,84	100,00
Скорость потока воды 0,35 л/с						
1	Камера 1	5,98	3,21	1,61	2,77	27,39
2	Камера 2	41,07	35,42	17,77	5,66	55,93
3	Хвосты	162,33	160,65	80,62	1,69	16,68
	Всего	209,39	199,27	100,00	10,11	100,00

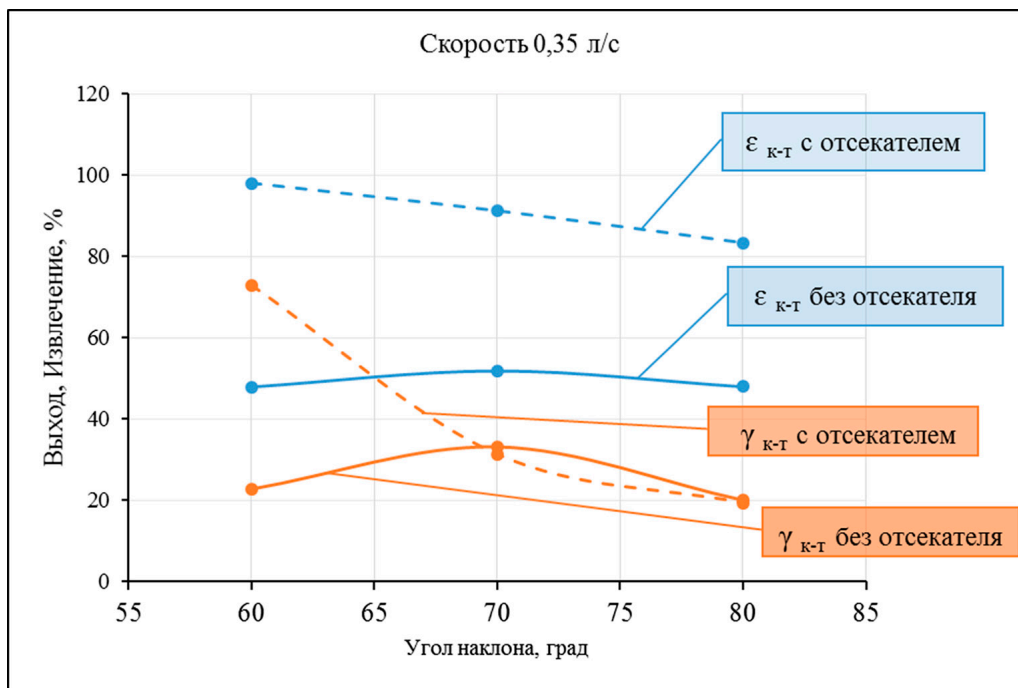


Рис. 2. Сравнительный график извлечения и выхода имитатора концентрата с использованием клапана-отсекателя и без него при скорости потока воды 0,35 л/с

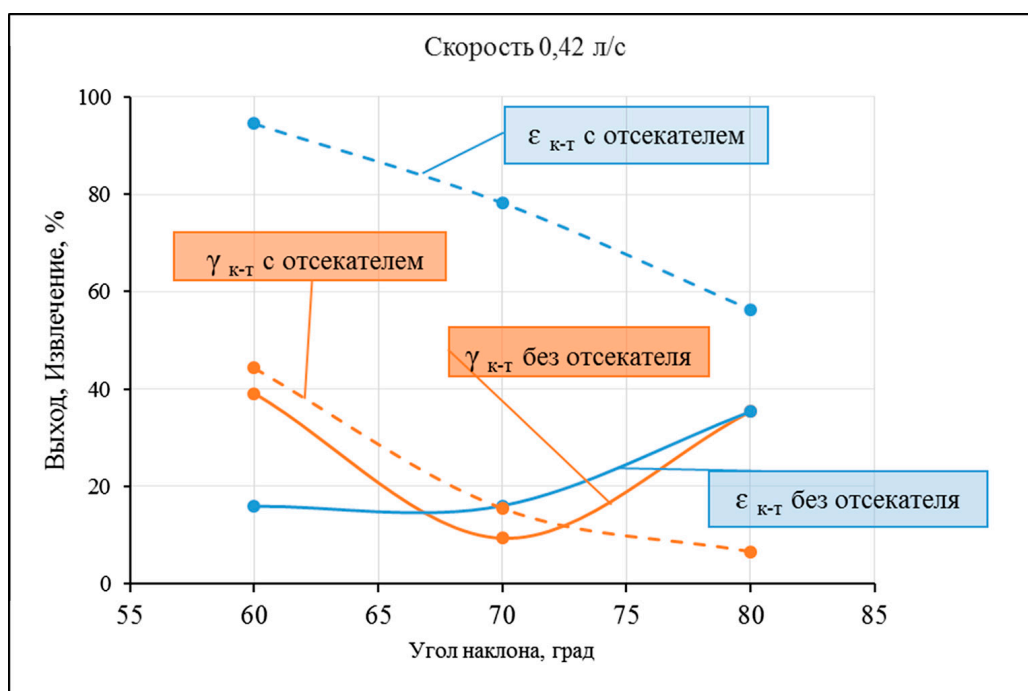


Рис. 3. Сравнительный график извлечения и выхода концентрата с использованием клапана-отсекателя и без него при скорости потока воды 0,42 л/с

При этом увеличение скорости подачи воды не всегда приносит положительный эффект. На рис. 4 даны сравнительные кривые выхода хвостов и связанные с ним по-

тери тяжелой фракции. Выявлена пропорциональная зависимость выхода и потери имитатора в зависимости от угла наклона и скорости потока.

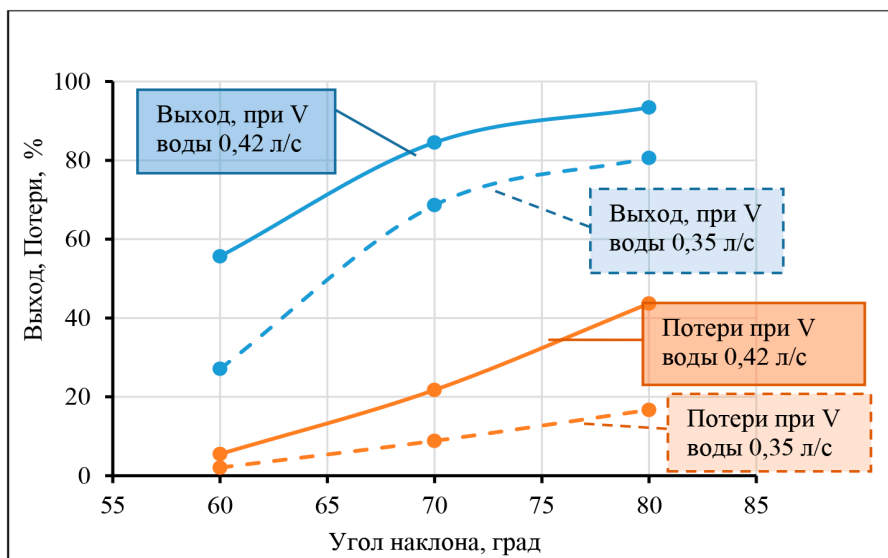


Рис. 4. Зависимость выхода в хвосты песка и потери индикатора

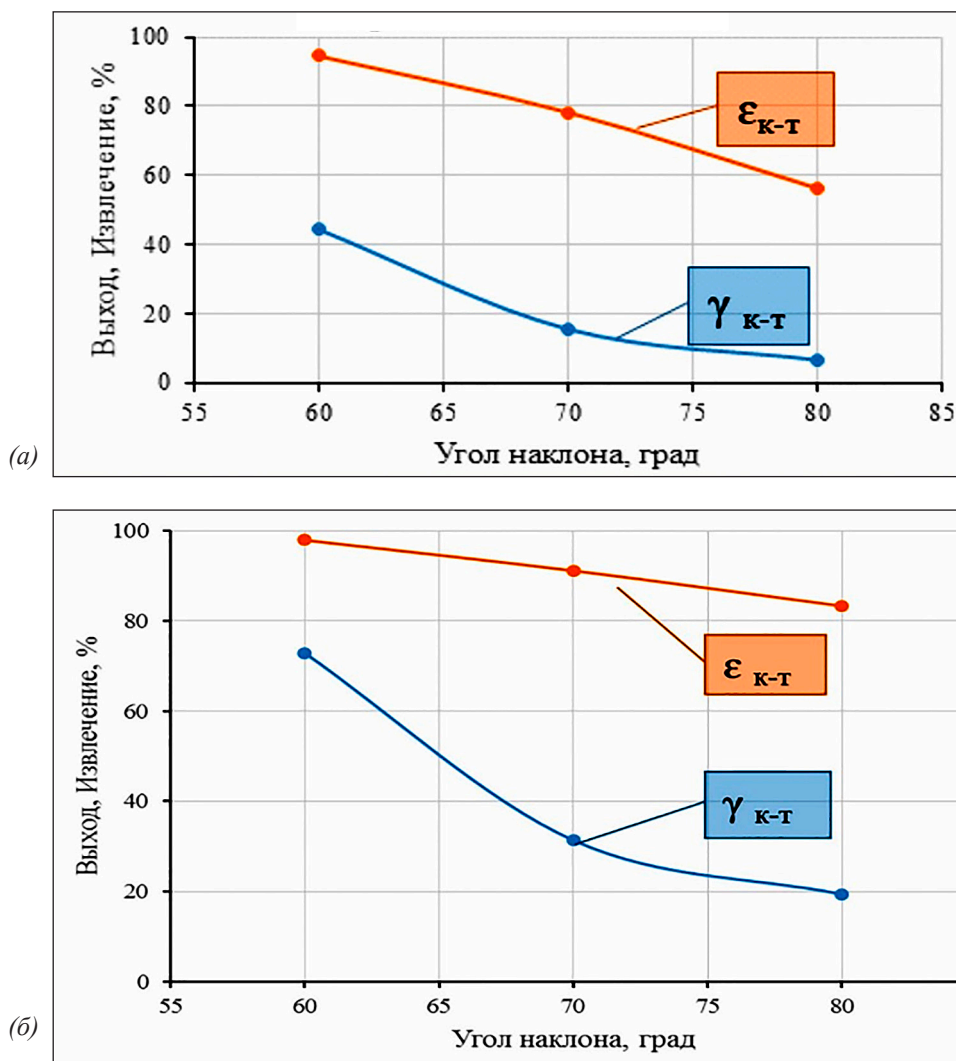


Рис. 5. Зависимости выхода концентрата и извлечения тяжелой фракции при различных углах концентрата и подачи потока воды со скоростью 0,42 (а) и 0,35 л/с (б)

В целом при рациональном положении клапана-отсекателя получены зависимости извлечения от 49 до 90,8% и выхода концентрата от 26 до 40% от наклона концентратора при скорости подачи воды 0,35 л/с (рис. 5, а). Аналогичные зависимости получены при подаче потока воды 0,42 л/с (рис. 5, б), где диапазон устойчивого выделения тяжелой фракции от 76 до 90,1% достигается при выходе концентрата в пределах от 22 до 40%.

Таким образом, при использовании клапана-отсекателя наиболее технологичные показатели достигаются при наклоне концентратора 70°, где извлечение тяжелой фракции (магнетита) достигает 91,16% при скорости 0,35 л/с.

Заключение

Использование клапана-отсекателя дает возможность регулирования потока воды внутри концентратора для улучшения извлечения тяжелой фракции. Найдены условия эффективного разделения минеральных частиц, наиболее рациональные результаты получены при наклоне концентратора 70°, где извлечение тяжелой фрак-

ции (магнетита) достигает 91,16% при скорости 0,35 л/с.

Список литературы

1. Кармазин В.В., Измалков В.А., Раджабов М.М. Анализ мирового опыта и исследования НТЦ МГГУ по извлечению мелкого тонкого золота при отработке россыпных и прибрежных районов золотосодержащих месторождений, включая техногенные // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 7. С. 73–78.
2. Раджабов М.М., Чапанов И.А., Местоева Х.Х., Шадыева Э.Б. Повышение извлечения мелкого и тонкого золота на основе применения вибрационно-гравитационного концентратора // Золото и технологии. 2020. № 2. С. 84–88.
3. Александрова Т.Н., Кусков В.Б. Разработка методов повышения эффективности гравитационного извлечения мелкого и тонкого золота из россыпей различного генезиса // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 69–77.
4. Oparin V.N., Smolyanitsky B.N., Sekisov A.G., Trubachev A.I., Salikhov V.S., Zikov N.V. Promising mining technologies for gold placers in Transbaikalia // Journal of Mining Science. 2017. Т. 53. № 3. P. 489–496.
5. Kökkilç O., Langlois R., Kristian E. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator // Minerals Engineering. 2015. Vol. 72. P. 73–86.
6. Филиппов В.Е., Еремеева Н.Г., Слепцова Е.С., Саломатова С.И. Крутонаклонный концентратор. Пат. РФ № 2001101048/03, Патентообладатель ИГДС СО РАН. 2003. Бюл. № 1.
7. Матвеев И.А., Еремеева Н.Г., Матвеев А.И., Монастырев А.М. Концентратор для обогащения мелкого золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 61–68.