

## РАЗРАБОТКА ФЛОТОАППАРАТА С ВЫСОКОНАПОРНЫМ РОТАЦИОННЫМ ПУЛЬСАЦИОННЫМ АЭРАТОРОМ

© 2017 г. А.А. Жарменов, С.Т. Хайруллина, Ф.А. Бердикулова, Н.Б. Абдиманатов, А.А. Сарсенбай

Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан  
(НЦ КПМС РК), г. Алматы

*Статья поступила в редакцию 05.05.16 г., доработана 01.08.16 г., подписана в печать 18.08.16 г.*

Изготовлен укрупненный вариант флотоаппарата с высоконапорным ротационным пульсационным аэратором (ВРПА). Проведены исследования и испытания на труднообогащаемой тонковкрапленной золотосодержащей пробе руды одного из месторождений Казахстана. Эксперимент и практика флотации с разработанным авторами ВРПА показали, что колебания давления, которые создаются аэратором, обеспечивают эффективность функционального использования двух периодов: (1) растворение дополнительного количества газов в высоконапорном периоде сжатия, что обеспечивает процесс аэрации необходимым количеством растворенных газов; (2) псевдокавитационное выделение газов в периоде разрежения среды, чем и обеспечивается аэрация с выделением газов из водной фазы непосредственно на гидрофобных минеральных микрочастицах, т.е. селективная флотация микродисперсий. Полученные результаты показали, что при флотации руды на флотоаппарате с ВРПА получен весьма существенный положительный эффект не только по извлечению металлов, но и по качеству получаемых концентратов.

**Ключевые слова:** пульсационный флотоаппарат, колебания, аэратор, высоконапорное сжатие, псевдокавитация, вещественный состав, показатели испытаний.

**Жарменов А.А.** – докт. техн. наук, акад. НАН РК, ген. директор НЦ КПМС РК (050036, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Жандосова, 67). E-mail: cmrp@mail.ru.

**Хайруллина С.Т.** – ст. науч. сотрудник НЦ КПМС РК. E-mail: himflot@mail.ru.

**Бердикулова Ф.А.** – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник НЦ КПМС РК. E-mail: Pheruza\_b@mail.ru.

**Абдиманатов Н.Б.** – вед. инженер НЦ КПМС РК. E-mail: himflot@mail.ru.

**Сарсенбай А.А.** – вед. инженер НЦ КПМС РК. E-mail: himflot@mail.ru.

**Для цитирования:** Жарменов А.А., Хайруллина С.Т., Бердикулова Ф.А., Абдиманатов Н.Б., Сарсенбай А.А. Разработка флотоаппарата с высоконапорным ротационным пульсационным аэратором // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 2. С. 13–20. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-13-20.

*Zharmenov A.A., Khairullina S.T., Berdikulova F.A., Abdimanapov N.B., Sarsenbai A.A.*

### Development of flotation unit with high-pressure rotational pulsation aerator

An enlarged version of the flotation unit equipped with a high-pressure rotational pulsation aerator (HPRPA) was manufactured. Studies and tests were carried out using a refractory fine-grained gold-containing ore sample from one of Kazakhstan deposits. The experiment and practice of flotation using the HPRPA developed by the authors demonstrated that pressure fluctuations created by the aerator ensured the efficiency of the functional use of two periods: (1) dissolution of additional gases in the high-pressure compression period, which provides the aeration process with the necessary amount of dissolved gases; (2) pseudo-cavitational emission of gases in the medium rarefaction period, which ensures aeration with gas emission from the aqueous phase directly on hydrophobic mineral microparticles, i.e. selective flotation of microdispersions. The obtained results showed that ore flotation in the flotation unit equipped with the HPRPA lead to a very significant positive effect not only with regard to the extraction of metals, but also to the quality of obtained concentrates.

**Keywords:** pulsed flotation unit, fluctuations, aerator, high-pressure compression, pseudo-cavitation, material composition, test indices.

**Zharmenov A.A.** – Dr. Sci. (Eng.), Acad. NAS RK, Director-general of National Center on Complex Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan (NC CPMRM RK) (050036, Kazakhstan, Almaty, Zhandosov str., 67). E-mail: cmrp@mail.ru.

**Khairullina S.T.** – Senior researcher of NC CPMRM RK. E-mail: himflot@mail.ru.

**Berdikulova F.A.** – Cand. Sci. (Eng.), Leading researcher of NC CPMRM RK. E-mail: Pheruza\_b@mail.ru.

**Abdimanapov N.B.** – Senior engineer of NC CPMRM RK. E-mail: himflot@mail.ru.

**Sarsenbai A.A.** – Senior engineer of NC CPMRM RK. E-mail: himflot@mail.ru.

**Citation:** Zharmenov A.A., Khairullina S.T., Berdikulova F.A., Abdimanapov N.B., Sarsenbai A.A. Razrabotka flotoapparata s vysokonapornym rotatsionnym pul'satsionnym aeratorom. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 2. P. 13–20. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-13-20.

## Введение

При флотации тонковкрапленных руд, требующих тонкого измельчения, большая часть минеральных частиц имеет размеры не более 10 мкм, которые не поддаются селективному разделению современными технологиями. По мере уменьшения крупности минеральных частиц их поведение в гидродинамических потоках меняется: при флотации они теряют массу и наступает граничный предел, ниже которого движущаяся микрочастица не может накопить кинетическую энергию для преодоления водно-структурного энергетического барьера при встрече с пузырьками.

В середине XIX в. рядом исследователей рассматривались вопросы флотации тонких частиц [1–10] и было установлено, что наиболее эффективным является метод аэрации газами, выделяющимся из водной фазы флотосистем. Однако ни в теории, ни в практике значимых успехов в этой области не было достигнуто по следующим причинам:

— во-первых, в то время объективно не было накоплено достаточно знаний о структурах воды, которые, как теперь стало известно, играют огромную роль в формировании межфазных ассоциатов (в том числе при выделении газов на минеральных поверхностях):

— во-вторых, не был решен вопрос об увеличении количества растворимых в водной фазе газов до уровня, обеспечивающего протекание флото-процессов.

В течение последующего времени делались многочисленные попытки создать аппарат, эффективно работающий по предложенному В.И. Классеном принципу. Были испытаны вакуумный и эжекторный варианты, которые практического применения до сих пор не нашли по той фундаментальной причине, что в воде не растворяются газы в количестве, необходимом и достаточном для флотации всех гидрофобных частиц, присутствующих в пульпе. В водной фазе систем в «нормальных» термодинамических условиях растворяется около 25 мг/л газов, чего заведомо мало для флотации всех извлекаемых гидрофобных частиц.

Позже были изучены два принципиально важных направления совершенствования флотационных аппаратов:

— создание аппаратов большой единичной производительности для импеллерных флотомашин [11–14];

— повышение удельной производительности за счет увеличения скорости и эффективности флотационных процессов для пневматических аппаратов, т.е. создание аппаратов интенсивной флотации [11, 12]. В последних процесс флотации осуществляется последовательно в 2 этапа: первоначально минеральные частицы закрепляются на пузырьках воздуха в реакторе, а затем минерализованные пузырьки отделяются от пульпы в сепараторе.

К аппаратам интенсивной флотации относятся флотационные машины следующих марок: «Jameson Cell» (Australia) [15], «Centriflot» (Australia) [19], «Pneumatic Cell» (USA) [20], «Contact Cell» (Sweden) [21], которые используются во многих странах мира — США, Германии, Австралии, Чили, Швеции, Южной Африке и др.

В НИТУ «МИСиС» разработана многозонная флотационная машина (МФМ) [16–18], которая отличается от аналогов количеством пространственно выделенных зон и способами их соединения, что позволяет повысить селективность разделения за счет регулировки гидродинамического режима процесса флотации. Повышение селективности разделения тонкодисперсных частиц в МФМ за счет гидродинамических эффектов при оптимальных реагентных режимах позволяет снизить потери ценных компонентов с тонкими классами слабоконтрастных руд.

В лаборатории обогащения природного и техногенного минерального сырья НЦ КПМС РК разработан эффективный, простой и технологичный способ и создан аппарат для селективной флотации микродисперсных частиц с использованием поля упругих колебаний для повышения количества растворяемых газов, участвующих в процессах, в первом высоконапорном периоде и их псевдокавитационного выделения на гидрофобных микро- и наночастицах во втором периоде каждого колебательного цикла.

Цель настоящей работы заключалась в изучении технологических особенностей опытного образца флотоаппарата с высокочастотным ротационным пульсирующим аэратором (ВРПА) для обогащения тонковкрапленных золотосодержащих руд. Принципиальным отличием его работы является аэрация в поле упругих колебаний звукового и ультразвукового диапазонов частот. Воплощенный в аппарате процесс представляет собой совокупность ряда элементарных физико-химических процессов и их стадий, осуществляемых

в ритме колебаний пульпы, задаваемых ВРПА. Флотация в аппарате с ВРПА позволит существенно улучшить селекцию частиц крупностью от 44 до 10 мкм.

## Методика исследований и полученные результаты

Четыре навески пробы руды массой по 1 кг поочередно измельчались в шаровой мельнице МШР-12 до получения 100 % класса  $-0,044$  мм и загружались в экспериментальную флотомашину с высоконапорным ротационным пульсационным аэратором. После подачи реагентов и установки оптимальной частоты пульсаций ВРПА осуществлялась флотация. Полученные в ходе нее продукты анализировались на содержание золота.

Опытный образец флотоаппарата с ВРПА в стендовом варианте представляет собой группу из двух полых коаксиально расположенных цилиндров со стержнями, разделенными параллельными им щелями. Частота колебаний, возбуждаемых ВРПА в зоне пульсаций при вращении ротора, определяется количеством стержней или щелей в роторе и скоростью его вращения. Число стержней и щелей в статоре и роторе может быть одинаковым, и тогда по периферии статора образуется постоянное пульсационное поле, или различным, и тогда образующееся пульсационное поле будет бегущим относительно статора. При вращении ротора его стержни перекрывают, а затем открывают щели статора.

Смесь пульпы и воздуха, выбрасываемая из щелей ротора с большой центробежной и окружной скоростью, ударяется о грани стержней статора. В щелях статора и при набегании на переднюю грань стержня поток остается ламинарным. По мере приближения к грани стержня статора вырывающиеся из щелей ротора потоки затухают. В этот момент пульпа испытывает наибольшее давление, величина которого зависит от скорости набегания и плотности пульпы. В высоконапорной зоне благодаря повышенному давлению создаются благоприятные условия для растворения газов.

При проведении исследований было установлено, что в колебательном поле акустического диапазона частот ограничение, связанное с определенной растворимостью газов воздуха в воде, не действует и выделение газов идет до тех пор, пока не отфлотируются все находящиеся в пульпе гидрофобные частицы. С учетом этого был разработан эффектив-

ный акустический способ флотационного обогащения весьма тонковкрапленных руд.

Механизм флотации, заложенный в работу ВРПА, аналогичен ультразвуковому механизму псевдокавитационной флотации, по которому акустические воздействия, создаваемые ультразвуковым генератором, сопровождаются чередованием резкого роста и столь же резкого понижения давления в среде [10]. Однако ВРПА существенно технологичнее с позиции практической реализации флотации микро- и наночастиц с выделением газов из водной фазы систем, так как она протекает в гидродинамическом аппарате и не нуждается в генераторе частот. С развитием акустической техники это преимущество может быть потеряно.

Авторами [22–24] изучались способы аэрации с выделением газов из водной фазы путем понижения давления и с использованием акустической кавитации, в результате чего было обнаружено неизвестное ранее явление «неиссякаемости» газов в пульсационных полях. При рассмотрении дегазирующего действия акустических колебаний следует выделить 3 физических аспекта.

Первый — качественный, заключающийся в том, что при наложении акустических колебаний на водную систему, содержащую растворенные газы, под действием системно изменяющегося давления происходят попеременное кавитационное растворение газов (в фазе высокого давления) и их выделение (при низком давлении).

Второй — при наличии в водной системе гидрофобных макро- и микроповерхностей образующиеся на них в фазе выделения газов кавитационные полости полностью не захлопываются (псевдокавитация), а растут, как газовые пузырьки, до некоторого резонансного размера, соответствующего частоте колебаний и другим физико-химическим параметрам.

Третий, и главный, выявленный нами аспект заключается в том, что в отсутствие пульсационных колебаний из водной системы можно выделить не более 25 мг газов из 1 л воды (общепринятое и общепризнанное физическое ограничение растворимости газов воздуха в воде), в то время как при наложении на водно-дисперсную систему пульсационных колебаний газовые пузырьки псевдокавитационно выделяются на гидрофобных поверхностях в количествах, кратно превышающих указанное выше ограничение в 25 мг/л воды, до тех пор, пока пузырьками не покроются все гидрофобные поверхности и частицы.

На изготовленном флотационном аппарате с высоконапорным ротационным пульсационным аэратором были проведены укрупненные испытания. Они осуществлялись на труднообогатимой тонковкрапленной золотосодержащей пробе руды одного из месторождений Казахстана. По вещественному составу она представляет собой сульфидный Au-содержащий тип руды черносланцевых толщ. Основной промышленно ценный минерал — золото, содержание которого составляет 6,93 г/т.

Концентраторами тонкодисперсного золота являются пирит, арсенопирит и углеродсодержащее вещество. Состав породообразующих минералов (в порядке убывания) следующий: кварц, мусковит, доломит, ангидрит, углеродистое вещество.

Результаты рационального анализа золота в пробе руды представлены в табл.1.

Перед началом испытаний на пробе руды в изготовленном высоконапорном ротационном пульсационном флотоаппарате было проанализировано количественное соотношение выделяемого из водного раствора и подаваемого в процесс диспергируемого воздуха. Частота пульсаций регулировалась ультразвуковым аппаратом. Для удобства проведения экспериментов предварительно был выполнен расчет частоты пульсаций ( $F$ , кГц):

$$F = \frac{Vn}{60} k,$$

где  $n$  — число зубцов на роторе;  $v$  — скорость его вращения, об/мин;  $k = 1,83$  — отношение диаметров шкивов двигателя (235 мм) и ротора (128) мм.

Полученные данные представлены в табл. 2.

Количество воздуха, выделяющегося из раствора, определялось с помощью измерительного цилиндра. Он предварительно заполняется водой, закрывается пробкой, переворачивается отверстием вниз и опускается в камеру, затем пробка открывается, и в него из пульпы начинают поступать всплывающие пузырьки, вытесняющие жидкость. При измерении отмечается длительность заполнения воздухом, затем рассчитывается его количество с учетом объема камеры. Полученные результаты представлены на рис. 1.

Подаваемый воздух замерялся реометром, имеющим готовую шкалу, по которой находилось количество литров газа, протекающего за 1 с при данном показании прибора. Объем выделяемого из раствора воздуха определялся как разница между объемами воздуха в камере и подаваемого извне.

Таблица 1  
Результаты рационального анализа золота в пробе руды

Формы нахождения золота	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
Свободное золото и открытые сростки	1,66	23,98
Покрытое кислото-растворимыми пленками и содержащееся в карбонатах	0,17	2,45
Связанное с сульфидами	1,34	19,39
Тонковкрапленное в кварце	3,76	54,18
<b>Всего</b>	<b>6,93</b>	<b>100,0</b>

Таблица 2  
Результаты расчета частоты пульсаций

$v$ , об/мин	$F$ , кГц
600	1,098
700	1,281
800	1,464
900	1,647
1000	1,830
1100	2,013
1200	2,196
1300	2,379
1400	2,562
1500	2,745
1600	2,928
1700	3,111
1800	3,294
1900	3,477
2000	3,660
2100	3,843
2200	4,026
2300	4,209
2400	4,392
2500	4,575

Анализ полученных результатов замеров показал, что наибольшее выделение воздуха из водного раствора наблюдалось при частоте 3,333 кГц ( $v = 2000$  об/мин) —  $61,5 \text{ дм}^3/\text{с}$ , но при этом происходили выбросы пульпы из камеры.

Для определения оптимальной частоты пульсаций проведены флотационные опыты при различ-

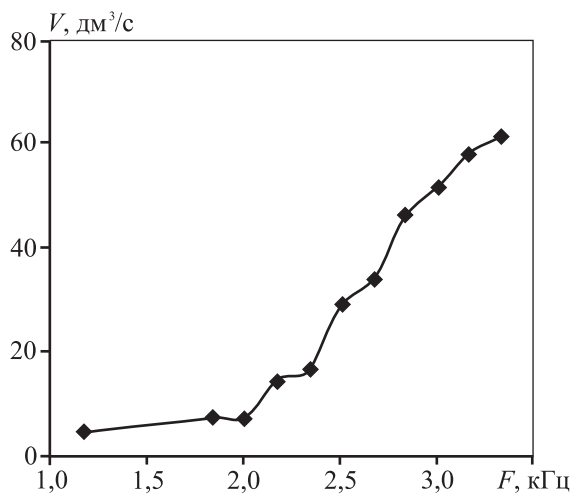


Рис. 1. Зависимость объема воздуха, выделяемого из водного раствора от частоты пульсаций

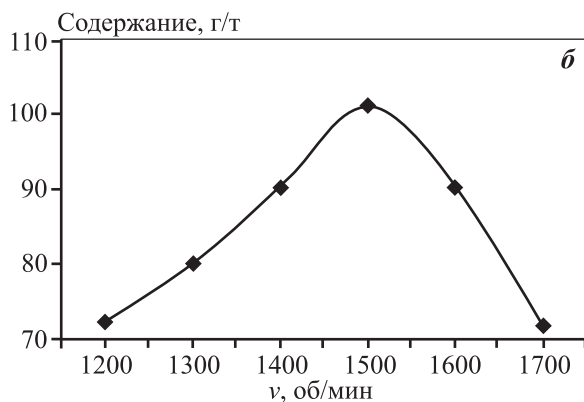
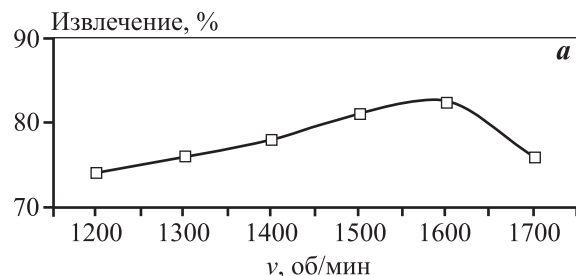


Рис. 2. Влияние скорости ВРПА на степень извлечения золота (а) и качество концентратов (б)

ных скоростях пульсационного аэратора. Результаты представлены на рис. 2, из которых видно, что максимальное извлечение золота (82,4 %) получено при  $v = 1600$  об/мин ( $F = 2,666$  кГц). Самое высокое содержание золота в Au-содержащем концентрате 101 г/т руды получено при скорости ВРПА  $v = 1500$  об/мин.

При частотах пульсаций 2,500 и 2,666 кГц количество воздуха, выделяемого из раствора, составило 29,1 и 33,9 дм<sup>3</sup>/с соответственно, что при

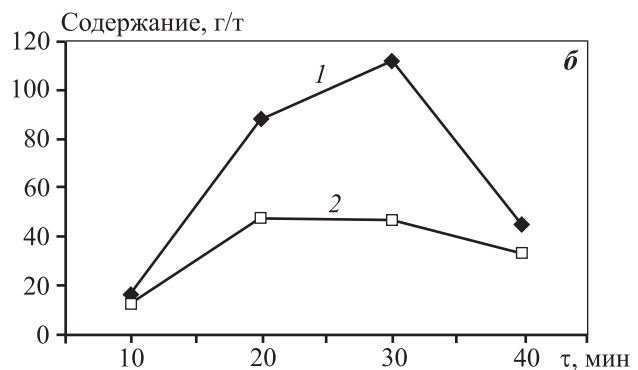
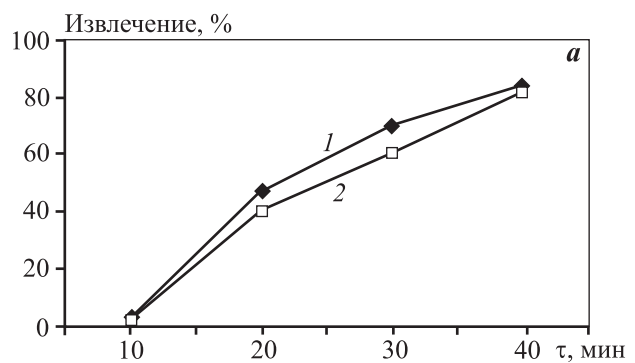


Рис. 3. Кинетические характеристики флотации золотосодержащих минералов на флотоаппарате с ВРПА (1) и стандартной флотомашине (2)

данных параметрах является наиболее высокими показателями обогащения.

Также были проведены сравнительные исследования флотации Au-содержащих минералов с использованием ВРПА и традиционного аэратора, которые показали (рис. 3), что при глубоком измельчении на флотоаппарате с ВРПА извлечение золота на всем протяжении процесса было выше, чем на стандартном флотоаппарате (84 % против 81,5 %). Кинетическая характеристика указанного процесса также показывает, что за счет высокоселективной флотации тонких минералов крупностью  $-0,044$  мм концентрат получен более высокого качества: на рис. 3 четко видно, что при аппарате с ВРПА пик содержания золота в концентрате достигает 112 г/т руды, а на стандартном — 48,1 г/т руды.

На изготовленном укрупненном 2-камерном флотоаппарате периодического действия с объемом камер 12 л проведены испытания при выбранной частоте пульсаций 2,666 кГц, расходе воздуха 42,6 дм<sup>3</sup>/с. Руда измельчалась до 98–100 % класса  $-0,044$  мм. Флотация проводилась по реагентному режиму, отработанному на идентичном стандартном оборудовании (60А-Фл,  $V = 12$  л):

Таблица 3

**Результаты сравнительных испытаний на стандартной флотационной машине и опытном аппарате с ВРПА**

Показатель	Стандартная флотомашинa	Флотоаппарат с ВРПА
Содержание золота в руде, г/т	7,0	6,95
Содержание золота в концентрате, г/т	43,5	77,88
Извлечение золота в концентраты, %	81,5	84,0

— при флотации углистого вещества расход вспенивателя МИБК составил 200 г/т руды;

— при флотации золотосодержащих минералов расход ксантогената был 300 г/т руды, а вспенивателя МИБК — 250 г/т руды.

В табл. 3 представлены результаты многодневных сравнительных испытаний на стандартной флотомашине и флотоаппарате с ВРПА (по 5 смен на каждом из них). Видно, что при флотации с использованием ВРПА показатели выше: содержание золота в концентрате возросло в 1,8 раза, а извлечение повысилось на 2,5 %.

## Заключение

Таким образом, эксперимент и практика флотации с разработанным высоконапорным ротационным пульсационным аэратором (ВРПА) показали, что колебания давления, которые создаются аэратором, обеспечивают эффективность функционального использования двух периодов:

— растворение дополнительного количества газов в высоконапорном периоде сжатия, что обеспечивает процесс аэрации необходимым количеством растворенных газов;

— псевдокавитационное выделение газов в периоде разрежения среды, чем и обуславливается аэрация с выделением газов из водной фазы непосредственно на гидрофобных минеральных микрочастицах, т.е. селективная флотация микродисперсий.

При этом ВРПА обеспечил весьма существенный положительный эффект при флотации микродисперсных минералов не только по извлечению металлов, но и по качеству получаемых концентратов.

## Литература

1. *Абишев Д.Н., Еремин Ю.П.* Обогащение тонковкрапленных руд — приоритетное направление горно-металлургического комплекса // Промышленность Казахстана. 2000. No. 2. С. 96—102.
2. *Класен В.И.* Теория «селективной активации» флотуруемых минералов воздухом, выделяющемся из раствора // Цвет. металлы. 1946. No. 5. С. 31—36.
3. *Класен В.И.* Активация флотуруемых минералов воздухом, выделяющимся из растворов // ДАН СССР. 1948. Т. 59. No. 5. С. 929—932.
4. *Класен В.И.* Научные основы некоторых новых путей повышения эффективности обогащения мелких и тонких фракций руд и углей: Доклад на юбилейной сессии ученого совета в связи с XX-летием Института горного дела АН СССР. М., 1958. С. 24—28.
5. *Эйгелес М.А.* Влияние размеров частиц на их активирование и пассивирование // ДАН СССР. 1947. Т. 57. No. 9. С. 919—922.
6. *Класен В.И., Недоговоров Д.И., Дебердеев И.Х.* Шламы во флотационном процессе. М.: Недра, 1969.
7. *Глембоцкий А.В.* Флотация ультратонких частиц // Цвет. металлы. 1978. No.7. С.112-114.
8. *Бочаров В.А., Вигдергауз В.Е.* Флотация сульфидных тонкодисперсных минеральных систем // Цвет. металлы. 1997. No. 3. С. 8—11.
9. *Класен В.И.* Основные пути повышения флотационного извлечения из руд тонкодисперсных ценных минералов // Сб. докл. Науч.-техн. совещ. по проблеме «Комплексное использование месторождений полезных ископаемых». М.: АН СССР, 1970. С. 9—10.
10. *Зубрилов С.П.* Ультразвуковая обработка воды и водных систем. Новосибирск: Изд-во «Транспорт», 1973. С. 34—37.
11. *Абрамов А.А.* Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. М.: МГТУ, 2004. Т. 1.
12. *Dunn M.* Commissioning of the supercells TM world's largest flotation machines // «PROCEMIN 2010» (Gecamin Ltd, Santiago, Chile, 2010). CD-ROM.
13. *Лавриненко А.А.* Современные флотационные машины для минерального сырья // Горн. техника. 2008. С. 186—195.
14. *Harder J.* Trend in the flotation of metal ores // AT Aufbereitungs technik 2008. No. 5. P. 4—10.
15. *Jameson G.J.* New directions in flotation machine design // Miner. Eng. 2010. Vol. 23. P. 835—841.

16. *Самыгин В.Д., Панин В.Д., Филиппов Л.О., Стенин Н.Ю.* Разработка флотомашин типа «реактор-сепаратор» конструкции МИСиС // *Металлург.* 2010. No. 6. С. 69—72.
17. *Самыгин В.Д.* Пневматическая флотационная машина: Пат. 2393023 (РФ). 2009.
18. *Filippov L.O., Samygin V.D., Severov V.V., Matinin A.S., Filippova I.V.* The effect of the ultrasonic treatment of the air-pulp flow upon the flotation // *XXVI Int. Miner. Process. Congr. «IMPC 2012»* (New Delhi, India, 24—28 Sept., 2012). P. 1433—1442.
19. *Brake I.R., Graham I.N., Drummond R.B.* Centriflot pilot scale trial at Gooneylla coal preparation plant / *Davies J.J. (ed) // 6-th Australian Coal Preparation Conf.* 1993. P. 364—400.
20. *Bahr A.* Application and sizing of a new pneumatic flotation cell // *15-th Int. Miner. Process. Congr. (Cannes, France, 1985)*. P. 314—326.
21. *Amelunxen R.L.* The contact cell: A future generation of flotation machines // *Eng. Mining J.* 1993. Vol. 194(4). P. 36—39.
22. *Абишев Ж.Н., Бекенова Г.К., Денисова Н.В., Еремин Ю.П., Жарменов А.А., Ультаракова Д.Д., Хайруллина С.Т., Чакиртова Н.Н.* Комплексная переработка минерального сырья Казахстана. Состояние, проблемы, решения. Алматы: НЦ КПМС РК, 2008. Т. 2.
23. *Абишев Д.Н., Айсаутов М.А., Денисова Н.В., Еремин Ю.П., Жарменов А.А., Ультаракова Д.Д., Хайруллина С.Т.* Комплексная переработка минерального сырья Казахстана (состояние, проблемы, решения). Астана: Фолиант, 2003. Т. 2.
24. *Еремин Ю.П., Загайнов В.Г., Ультаракова Д.Д., Хайруллина С.Т., Денисова Н.В., Бекенова Г.К., Левин В.Л.* Псевдокавитационный принцип работы высоконапорного ротационного пульсирующего аэратора (ВРПА) и анализ полученных продуктов при флотации мородисперсий // *Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева.* 2007. No. 4. С. 154—157.
3. *Klassen V.I.* Aktivatsiya flotiruemykh mineralov vozdukhom, vydelyayushchimsya iz rastvorov [Activation floatable minerals by air, separated from the solution]. *DAN SSSR.* 1948. Vol.59. No. 5. P. 929—932.
4. *Klassen V.I.* Nauchnye osnovy nekotorykh novykh putei povysheniya effektivnosti obogashcheniya melkikh i tonkikh fraktsii rud i uglei. In: *Sbornik dokladov na yubileinoi sessii uchenogo soveta v svyazi s XX-letiem Instituta gornogo dela AN SSSR* [Scientific bases of some new ways of increase of efficiency of enrichment of fine and light fractions of ores and coals. In: *Reports at an anniversary session of an academic council in connection with the XX anniversary of Institute of Mining of Academy of Sciences of the USSR*]. Moscow, 1958. P. 24—28.
5. *Eigeles M.A.* Vlyanye razmerov chastits na ih aktivirovaniye i passivirovaniye [Effect of particle size on their activation and passivation]. *DAN SSSR.* 1947. Vol. 57. No. 9. P. 919—922.
6. *Klassen V.I., Nedogovorov D.I., Deberdeev I.Kh.* Shlamy vo flotatsionnom protsesse [Sludge in the flotation process]. Moscow: Nedra, 1969.
7. *Glembotskii A.V.* Flotatsiya ul'tratonkikh chastits [Flotation ultralight particles]. *Tsvet. metally.* 1978. No. 7. P. 112—114.
8. *Bocharov V.A., Vigdergauz V.E.* Flotatsiya sul'fidnykh tonkodispersnykh mineral'nykh sistem [Flotation fine sulphide mineral systems]. *Tsvet. metally.* 1997. No. 3. P. 8—11.
9. *Klassen V.I.* Osnovnye puti povysheniya flotatsionnogo izvlecheniya iz rud tonkodispersnykh tsennykh mineralov. In: *Sbornik dokladov Nauchno-tekhnicheskogo soveshchaniya po probleme «Kompleksnoe ispol'zovanie mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh»* [The main ways of increasing the extraction of ore flotation of fine precious minerals. In: *Reports of the scientific and technical meeting on «Complex use of mineral deposits»*]. Moscow: AN SSSR, 1970. P. 9—10.
10. *Zubrilov S.P.* Ul'trazvukovaya obrabotka vody i vodnykh sistem [Ultrasonic processing of water and water systems]. Novosibirsk: Izdatel'stvo «Transport», 1973. P. 34—37.
11. *Abramov A.A.* Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh [Processing, enriching and complex use of solid minerals]. Moscow: MGTU, 2004. Vol. 1.
12. *Dunn M.* Commissioning of the supercells TM world's largest flotation machines. «PROCEMIN 2010» (Gecamin Ltd, Santiago, Chile, 2010). CD-ROM.
13. *Lavrinenko A.A.* Sovremennye flotatsionnye mashiny dlya mineral'nogo syr'ya. [Modern flotation machines for minerals]. *Gornaya tekhnika.* 2008. P. 186—195.

## References

1. *Abishev D.N., Yeregin Yu.P.* Obogashchenie tonkovkraplenykh rud — prioritetnoye napravlenie gorno-metallurgicheskogo kompleksa [Enrichment of finely disseminated ores — a priority of mining and metallurgical complex]. *Promyshlennost' Kazakhstana.* 2000. No. 2. P. 96—102.
2. *Klassen V.I.* Teoriya «selektivnoi aktivatsii» flotiruemykh mineralov vozdukhom, vydelyayushchimsya iz rastvora [The theory of «selective activation» floatable minerals by air, separated from the solution]. *Tsvet. metally.* 1946. No. 5. P. 31—36.

14. *Harder J.* Trend in the flotation of metal ores. *AT Aufbereitungstechnik*. 2008. No. 5. P. 4—10.
15. *Jameson G.J.* New directions in flotation machine design. *Miner. Eng.* 2010. Vol. 23. P. 835—841.
16. *Samygyn V.D., Panin V.D., Filippov L.O., Stenin N.Yu.* Razrabotka flotomashiny tipa «reaktor-separator» konstrukt-sii MISiS [Development of flotation machine type «reactor-separator» design MISA]. *Metallurg.* 2010. No. 6. P. 69—72.
17. *Samygin V.D.* Pnevmaticheskaya flotatsionnaya mashina [The pneumatic flotation machine]: Pat. 2393023 (RF). 2009
18. *Filippov L.O., Samyguin V.D., Severov V.V., Matinin A.S., Filippova I.V.* The effect of the ultrasonic treatment of the air-pulp flow upon the flotation. In: *Mater. of XXVI Int. Miner. Proc. Congr. «IMPC 2012»* (New Delhi, India, 24—28 Sept., 2012). P. 1433—1442.
19. *Brake I.R., Graham I.N., Drummond R.B.* Centriflot pilot scale trial at Gooneylla coal preparation plant. *Davies J.J.* (ed). In: *Mater. of 6-th Australian Coal Preparation Conf.* 1993. P. 364—400.
20. *Bahr A.* Application and sizing of a new pneumatic flotation cell. In: *Mater. of 15-th Int. Miner. Proceeding Congr.* (Cannes, France, 1985). P. 314—326.
21. *Amelunxen R.L.* The contact cell: A future generation of flotation machines. *Eng. Mining J.* 1993. Vol. 194(4). P. 36—39.
22. *Abishev Zh.N., Bekenova G.K., Denisova N.V., Yeregin Yu.P., Zharmenov A.A., Ultarakova D.D., Hayrullina S.T., Chakirtova N.N.* Kompleksnaya pererabotka mineral'nogo syr'ya Kazakhstana — Sostoyanie, problemy, resheniya [Complex processing of mineral raw materials in Kazakhstan — State, problems, solutions]. Almaty: NC KPMC RK, 2008. Vol. 2.
23. *Abishev Zh.N., Aisautov M.A., Denisova N.V., Yeregin Yu.P., Zharmenov A.A., Ultarakova D.D., Hayrullina S.T.* Kompleksnaya pererabotka mineral'nogo syr'ya Kazakhstana (sostoyanie, problemy, resheniya) [Complex processing of mineral raw materials in Kazakhstan (State, problems, solutions)]. Astana: Foliant, 2003. Vol. 2.
24. *Yeregin Yu.P., Zagaynov V.G., Ultarakova D.D., Hayrullina S.T., Denisova N.V., Bekenova G.K., Levin V.L.* Psevdokavitatsionnyi printsip raboty vysokonapornogo rotatsionnogo pul'siruyushchego aeratora (VRPA) i analiz poluchennykh produktov pri flotatsii mirodispersii [Pseudo cavitation principle of the high-pressure pulsating rotary aerator (HPPRA) and analysis of the products obtained in the flotation microdispersions]. *Vestnik KazNTU.* 2007. No. 4. P. 154—157.