ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(12-1):258-269
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.765 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_258

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ НА ОСНОВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ ПУЛЬПЫ ПРУЖИННЫМИ ДИСПЕРГАТОРАМИ ВОЗДУХА

Ю.П. Морозов[1], И.В. Упорова[1], Р.С. Мамонов[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: uporova2013@mail.ru

Аннотация: Одной из основных задач в области флотационного обогащения полезных ископаемых является совершенствование технологий переработки сырья с целью повышения извлечения ценных компонентов. Одним из перспективных направлений совершенствования технологий является применение дополнительной аэрации пульпы мелкодисперсными пузырьками воздуха. При дополнительном насыщении пульпы мелкодисперсными пузырьками воздуха повышается вероятность встречи с ними минеральных частиц, закрепления флотируемых частиц на пузырьках и образования более прочных флотокомплексов. Наличие мелкодисперсных пузырьков воздуха во флотационной пульпе способствует реализации коалесцентного механизма соединения мелких нагруженных пузырьков с крупными транспортными пузырьками воздуха. С целью насыщения пульпы мелкодисперсными пузырьками воздуха рассмотрены различные методы аэрации пульпы: механическое диспергирование воздуха, диспергирование пропусканием воздуха через пористые перегородки, выделение газов из растворов при перепадах давления, получение пузырьков электролизных газов. На основе достоинств и недостатков рассмотренных методов дополнительной аэрации пульпы в работе приняты к исследованию и испытаны диспергаторы воздуха, выполненные из пористого фторопласта и вспененного полипропилена и пружинные диспергаторы воздуха. При аэрировании жидкой фазы пружинными диспергаторами наблюдается более высокая диспергация воздуха мелкодисперсными пузырьками. Промышленными испытаниями при использовании дополнительной аэрации пульпы мелкодисперсными пузырьками воздуха пружинными диспергаторами установлена возможность повышения извлечения меди в медный концентрат в диапазоне от 0,21 до 1,3%. В целом, применение пружинных диспергаторов воздуха в качестве дополнительной аэрации флотационной пульпы рекомендуется к использованию.

Ключевые слова: флотация, флотомашина, пульпа, аэрация, диспергация воздуха, мелкодисперсные пузырьки воздуха, крупность пузырьков воздуха, коалесцентный механизм, диспергатор воздуха.

Для цитирования: *Морозов Ю. П., Упорова И. В., Мамонов Р. С.* Совершенствование процесса флотации на основе дополнительной аэрации пульпы пружинными диспергаторами воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 258–269. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_258.

Improvement of flotation efficiency on the basis of additional pulp aeration by spring-type diffusors

Yu.P. Morozov[1], I.V. Uporova[1], R.S. Mamonov[1]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: uporova2013@mail.ru

© Ю.П. Морозов, И.В. Упорова, Р.С. Мамонов. 2024.

Abstract: Currently, one of the main tasks in the field of flotation enrichment of minerals is to improve the technology of raw material processing in order to increase the extraction of valuable components. One of the promising directions of technology improvement is the use of additional aeration of pulp with fine air bubbles. At additional saturation of pulp with fine air bubbles the probability of meeting of mineral particles with air bubbles, fixation of particles of flotation particles on bubbles and formation of more durable flotation complexes increases. The presence of fine air bubbles in the flotation slurry contributes to the realization of coalescent mechanism of connection of small loaded bubbles with large transport air bubbles. In order to saturate the pulp with finely dispersed air, various methods of pulp aeration have been considered: mechanical dispersion of air, dispersion by passing air through porous partitions, separation of gases from solutions at pressure drops, obtaining bubbles of electrolytic gases. On the basis of advantages and disadvantages of the considered methods of additional aeration of pulp, air dispersersers made of porous fluoroplastic and foamed polypropylene and spring air dispersers are accepted for research and tested. When the liquid phase is aerated with spring dispersants, higher dispersion of air by fine bubbles is observed. Industrial tests when using additional aeration of pulp with fine air bubbles by spring dispersants established the possibility of increasing copper recovery in copper concentrate in the range from 0.21 to 1.3%. In general, the use of spring air dispersants as additional aeration of flotation slurry is recommended for use.

Key words: flotation, flotation machine, slurry, aeration, air dispersion, fine air bubbles, air bubble coarseness, coalescent mechanism, dispersant air.

For citation: Morozov Yu. P., Uporova I. V., Mamonov R. S. Improvement of flotation efficiency on the basis of additional pulp aeration by spring-type diffusors. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12-1):258-269. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_258.

Введение

В процессе флотации основную роль играет аэрация пульпы, заключающаяся в насыщении ее пузырьками воздуха [1, 2]. Степень аэрации пульпы — один из главных параметров работы флотомашины [3, 4]. Насыщение пульпы пузырьками воздуха осуществляется дроблением потока воздуха на пузырьки различного размера [5, 6].

Крупность пузырьков воздуха в камерах флотомашин колеблется в широких пределах — от долей миллиметра до десятков миллиметров. Результаты флотации зависят не только от размера частиц, но и от гранулометрического состава пузырьков воздуха в пульпе [3, 7].

В пульпе должны присутствовать крупные транспортные пузырьки, образующие флотокомплексы, плотность которых меньше плотности среды, в которой они всплывают. Наряду с крупными пузырьками мелкие пузырьки в большом количестве обеспечивают высокую вероятность встречи флотируемых частиц с пузырьками и закрепление флотируемых частиц на мелких пузырьках, обусловленное большей кривизной поверхности мелких пузырьков и большим парциальным давлением воздуха в них, высокую скорость образования установившегося трехфазного периметра смачивания и прочность его закрепления [7, 8]. Высокая вероятность встречи крупных пузырьков с мелкими способствует коалесцентному механизму формирования высплывающих флотокомплексов [9, 10].

Во флотационных машинах механического и пневмомеханического типов

аэрация пульпы осуществляется диспергированием струй воздуха импеллером [11, 12]. Особенностью диспергирования воздуха импеллером является высокая турбулентность потоков, приводящая к разрыву струй воздуха, образованию турбулентных импульсов при разрыве жидкой фазы [13, 14].

При диспергировании воздуха механическим воздействием импеллеров образуются пузырьки воздуха крупностью от 1 до 10 мм [15, 16].

Насыщение пульпы в механических и пневмомеханических флотомашинах мелкодисперсными пузырьками является целесообразным, так как дает возможность:

- подвергать флотационному обогащению тонковкрапленные и легкошламующиеся руды;
- значительно повысить селективность и скорость флотации многих полезных ископаемых.

Для образования мелкодисперсных пузырьков могут использоваться методы: выделение газов из раствора; электролиз жидкой фазы; диспергирование воздуха при прохождении через пористые перегородки.

Образование мелких пузырьков воздуха при выделении газов из раствора находит применение в вакуумных и компрессионых флотомашинах [17, 18]. Пузырьки, выделяющиеся из раствора, имеют мелкие размеры и не могут поднять минеральные частицы в пену. Флотация частиц происходит по коалесцентному механизму закрепления на крупных транспортных пузырьках [9, 19].

При электролизе жидкой фазы в электрофлотационных машинах выделяются пузырьки электролизных газов крупностью 8—20 мкм [20, 21]. Метод может быть использован в процессах электрофлотации тонкодисперсных шламов либо, по аналогии с [10, 22], в процессах дополнительной аэрации пульпы мелкодисперсными пузырьками в механических и пневмомеханических флотомашинах.

Диспергирование пузырьков при продавливании воздуха через пористые перегородки находит применение в пневматических флотационных машинах. В качестве перегородок используются перфорированная резина, ткани, пористая керамика и другие пористые материалы [11, 23].

Использование вышеназванных перегородок отличается низкой эксплуатационной надежностью, обусловленной малым сроком службы из-за порывов, заиливания пор твердой фазой пульпы и зарастанием пор карбонатами в известковой среде [23].

Из известных методов диспергирования воздуха для дополнительной аэрации пульпы в механических и пневмомеханических флотомашинах более экономичным и эксплуатационно надежным является метод диспергации воздуха пружинными диспергаторами [23].

При диспергировании воздуха пружинными диспергаторами за счет колебательных движений витков рабочей пружины образуются мелкодисперсные пузырьки воздуха, обусловленные «срезающим эффектом» при отрыве пузырьков на выходе из щелей между витками рабочей пружины [23].

В настоящей работе поставлена задача определения эффективности использования пружинной диспергации воздуха для дополнительной аэрации пульпы мелкодисперсными пузырьками в механических и пневмомеханических флотомашинах.

Методика проведения исследований

Исследования пружинных диспергаторов воздуха выполнены на специальном стенде, состоящем из бака с прозрачными стенками, системы подачи сжа-

того воздуха и пружинного диспергатора.

Визуальная оценка работы пружинного диспергатора осуществлялась по результатам видеосъемки аэрированной жидкой фазы.

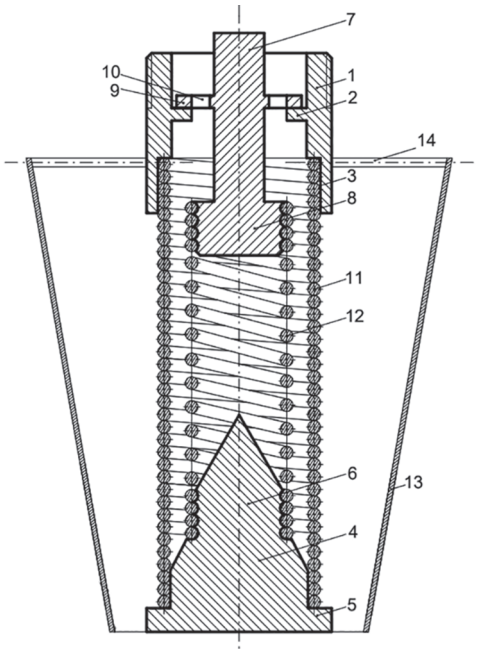
Исследования выполнены на пружинных диспергаторах, защищенных патентом РФ № 2823706.

Устройство пружинного диспергатора приведено на рис. 1.

Пружинный диспергатор флотационной машины состоит из расположенного в верхней части патрубка *1* с внутренним кольцеобразным выступом *2* и внутренней проточкой *3* в нижней части патрубка *1*, расположенной в нижней части диспергатора пробки *4* с кольцеобразным выступом *5* и резьбовым наконечником *6*. Между патрубком *1* и пробкой *4* расположен соосно патрубку *1* стержень *7* с резьбовым наконечником *8* в нижней части и фланцем *9* с отверстиями *10*, причем фланец *10* упирается сверху в выступ *2* патрубка *1*. Между патрубком *1* и пробкой *4* установлена диспергирующая пружина *11*, верхний конец которой расположен в проточке *3* патрубка *1*, а нижний конец которой упирается в выступ *5* пробки *4*. Внутри пространства диспергирующей пружины *11* установлена сжимающая пружина *12* большей жесткости, навернутая верхним концом на резьбовой наконечник *8* стержня *7*, а нижним концом навернутая на резьбовой наконечник *6* патрубка *4*. Снаружи диспергирующей пружины *11* установлен расширяющийся вверх усеченный пустотелый конус *13* с углом конусности в пределах от 15 до 20°, прикрепленный сверху стержнями *14* к патрубку *1*.

Пружинный диспергатор воздуха работает следующим образом.

Сжатый воздух подается в диспергатор через патрубок *1*, проходит через отверстия *10* во фланце *9* стержня *7* и создает давление во внутренней полости



1 – патрубок
2 – кольцеобразный выступ
3 – проточка
4 – пробка
5 – кольцеобразный выступ
6 – резьбовой наконечник
7 – стержень
8 – резьбовой наконечник
9 – фланец
10 – отверстия
11 – диспергирующая пружина
12 – сжимающая пружина
13 – пустотелый конус
14 – крепление стержня

Рис. 1. Устройство пружинного диспергатора воздуха
Fig. 1. Device of spring air disperser

диспергирующей пружины *11*. При превышении давления воздуха в полости пружины *11* силы упругости пружины *12* последняя начинает растягиваться на величину, уравновешивающую давление воздуха. При растяжении пружины *12* диспергирующая пружина *11* разжимается, и воздух через зазоры между ее витками в виде пузырьков поступает в пульпу флотационной машины. Количество и размер пузырьков регулируется путем подбора жесткости пружины *12*, изменением степени растяжения пружины *12* путем навинчивания пружины *12* на резьбовой наконечник *8* стержня *7* и изменением давления сжатого воздуха, подаваемого через патрубок *1*.

При выходе сжатого воздуха из пружинного диспергатора происходит сброс давления на пробку *4*, сжимающая пружина *12* сжимает рабочую пружину *11*. Захлопывание щелей между витками рабочей пружины *11* приводит за счет «срезающего эффекта» к выделению мелкодисперсных пузырьков.

Выходящие из зазоров между витками диспергирующей пружины *11* мелкодисперсные пузырьки воздуха попадают в пространство между диспергирующей пружиной *11* и усеченным пустотелым конусом *13*, всплывают в этом пространстве и выходят в пульпу в верхней части пружинного диспергатора, подхватываются потоками пульпы и распространяются в объеме камеры флотомашины.

При прекращении подачи сжатого воздуха в диспергатор пружина *12* сжимается и за счет передвижения вверх пробки *4* сжимает пружину *11*, устраняя зазоры между ее витками. Сжатие пружины *11* устраняет попадание частиц твердой фазы во внутреннее пространство диспергирующей пружины *11* и заиливание этого пространства.

Установленный расширяющийся вверх усеченный конус *13* снаружи диспергирующей пружины *11* гасит давление потоков пульпы на диспергирующую пружину *11*, исключает ее изгиб и образование щелей большой площади между витками. Тем самым исключается выделение крупных пузырьков воздуха через щели диспергатора и обеспечивается эффективное насыщение пульпы мелкодисперсными пузырьками за счет исключения образования щелей при изгибе диспергирующей пружины *11*.

Разработаны различные типоразмеры пружинных диспергаторов воздуха, технические характеристики которых приведены в табл. 1.

В процессе испытаний каждый диспергатор воздуха помещали в прозрачной емкости с миллиметровым маркером. К пружинным диспергаторам подведен сжатый воздух от компрессора с манометром. Емкость заполняли раствором

Таблица 1

Типоразмеры разработанных пружинных диспергаторов воздуха № 1–5
Dimensions of developed spring air dispersants No. 1—5

№ диспергатора	Диаметр пружины, $d_{пруж}$, мм	Диаметр проволоки, $d_{провол}$, мм	Длина диспергатора, l, мм
1	19	3	90
2	30	3	85
3	30	4	70
4	54	5	80
5	45	5	200

Таблица 2

Результаты замеров расхода воздуха в зависимости от давления воздуха на входе в пружинные диспергаторы № 1–5

Result of air flow rate measurements from air pressure at the inlet of spring dispersants No. 1–5

Давление, *P*, МПа	Расход воздуха в диспергаторах, $Q_в$, м³/ч				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
0,010	0,05	0,19	0,61	2,57	8,57
0,033	0,06	0,30	1,00	3,60	9,36
0,066	0,07	0,49	1,15	4,15	12,74
0,10	0,08	0,65	1,69	4,9	15,23
0,20	0,24	1,37	3,60	7,7	21,17

вспенивателя Т-92 концентрацией 100 г/м³, воздуховод подключали к диспергатору воздуха и осуществляли диспергирование воздуха при давлении от 0,01 до 0,2 МПа. Для каждого диспергатора выполнен замер расхода воздуха при разных значениях давления. Результаты замеров расхода воздуха от давления воздуха на входе в пружинные диспергаторы приведены в табл. 2.

Фотографии диспергаторов воздуха и аэрированной ими жидкой фазы при давлении воздуха 0,2 МПа приведены на рис. 2.

Анализ фотографий на рис. 2 показал, что пружинные диспергаторы воз-

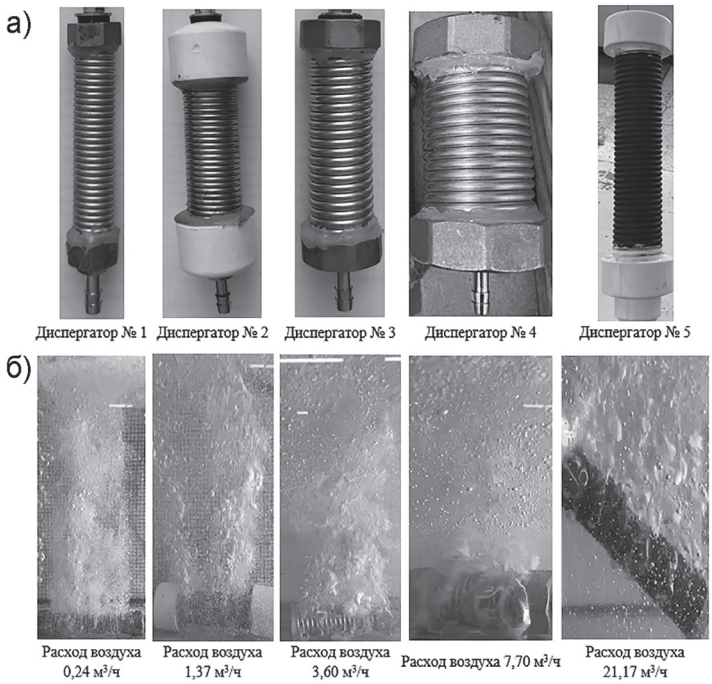


Рис. 2. Фотографии пружинных диспергаторов (а) и аэрированной жидкой фазы (б) при давлении воздуха на входе в пружинный диспергатор 0,2 МПа

Fig. 2. Photographs of spring dispersants (a) and aerated liquid phase (b) at air pressure at the inlet to the spring dispersant of 0.2 MPa

Таблица 3

Результаты математического и экспериментального моделирования оптимальных параметров работы промышленного пружинного диспергатора воздуха
Results of mathematical and experimental modeling of optimal parameters of industrial spring air disperser operation

№ режима	Расход воздуха, м³/ч	Крупность пузырьков, мм
1	0,30	0,1 – 1,5
2	1,40	0,15 – 2,5
3	3,80	0,2 – 4,0
4	7,80	0,5 – 5,0
5	12,00	0,8 – 6,0

духа позволяют получать мелкодисперсные пузырьки воздуха при достаточно больших значениях расхода воздуха через диспергатор.

Для определения оптимального расхода воздуха в промышленный диспергатор выполнено математическое и экспериментальное моделирование процесса диспергации воздуха в пружинных диспергаторах, определены оптимальные настройки диспергаторов и требуемые расходы воздуха для получения пузырьков заданного размера. Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Рис. 3. Фотография расположения пружинного диспергатора в камере флотомашины
Fig. 3. Photograph of the spring disperser arrangement in the flotation machine chamber

Из таблиц следует, что чем больше расход воздуха, тем более крупные пузырьки воздуха выходят из пружинного диспергатора.

Полученные результаты испытаний пружинных диспергаторов использованы при разработке и изготовлении промышленных образцов пружинных диспергаторов воздуха.

Известно, что распределение воздуха в камерах флотомашин между блоком импеллера и пенным слоем весьма неравномерное, с преимущественной концентрацией воздуха вдоль воздушного патрубка, и недостаточной аэрированностью пульпы в периферийной зоне объема камеры. С точки зрения распределения потоков воздуха, а также монтажа и эксплуатации, пружинные диспергаторы рационально установить ниже середины пространства между блоком импеллера и пенным слоем, на некотором расстоянии от стенок флотационной камеры.

Промышленные образцы пружинных диспергаторов установлены в камерах флотомашин основной и контрольной операций флотации на глубину 2/3 высоты камеры флотомашины.

Расположение пружинного диспергатора в камерах флотомашины показано на рис. 3.

К каждому диспергатору выполнен подвод воздуха от магистрали.

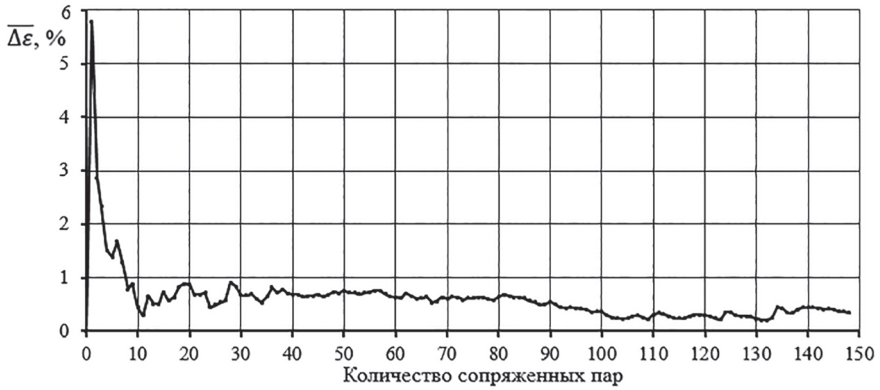


Рис. 4. График адаптационной системы средневзвешенного различия извлечения меди в концентрат
Fig. 4. Adaptation system plot of weighted average difference of copper recovery to concentrate

Промышленные испытания дополнительной аэрации пульпы выполнены по методике проведения промышленных испытаний, основанной на использовании мероприятий по снижению влияния возмущающих воздействий и переходных процессов на результаты промышленного активного эксперимента.

Промышленные испытания пружинных диспергаторов воздуха осуществляли в течение трех месяцев, с суточным чередованием работы флотационного отделения фабрики с дополнительной и без дополнительной аэрации пульпы.

В процессе испытаний осуществлялись контроль режимов работы фабрики и накопление данных по массовой доле меди в продуктах обогащения, по производительности, плотности и щелочности пульпы Полученные результаты по массовой доле и извлечению меди в концентрат подвергнуты математической обработке с определением различия извлечения меди в концентрат в сравниваемых режимах.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты по массовой доле и извлечению меди в концентрат подвергнуты математической обработке с определением различия извлечения меди в концентрат в сравниваемых режимах. Математическая обработка результатов промышленных испытаний показала возможность получения прироста извлечения меди в медный концентрат от 0,21 до 1,3%, в зависимости от перерабатываемого сырья.

Выполнены расчеты сходимости адаптационной системы промышленных испытаний. Результаты расчета сходимости адаптационной системы приведены на графике адаптационной системы на рис. 4.

Установлено, что абсолютная ошибка различия извлечения в сравниваемых режимах составила 0,017%.

В процессе промышленных испытаний разработанные пружинные диспергаторы воздуха показали высокую эксплуатационную надежность и износостойкость.

Заключение

На основе обзора технической и патентной литературы, экспериментальных исследований аэрированности пульпы и дисперсного состава пузырьков в пульпе камер флотомашин сделан вывод о целесообразности использования дополнительной аэрации пульпы в камерах флотомашин мелкодисперсными пузырьками.

Экспериментальными исследованиями и промышленными испытаниями по-

казано, что технологически и экономически наиболее эффективно осуществлять дополнительную аэрацию пульпы мелкодисперсными пузырьками воздуха с помощью пружинных диспергаторов воздуха в режиме вынужденных колебаний рабочей пружины.

С целью оптимизации гранулометрического состава пузырьков в пульпе флотокамер за счет дополнительной подачи мелкодисперсных пузырьков разработаны и испытаны пружинные диспергаторы различных типоразмеров.

При испытании пружинных диспергаторов выполнены: видеосъемка аэрированной ими жидкой фазы; замер расхода воздуха диспергаторами при разном давлении воздуха на входе в диспергаторы; оценка дисперсного состава образующихся пузырьков воздуха при разном давлении на входе в диспергаторы. Установлено, что пружинные диспергаторы обеспечивают получение мелкодисперсных пузырьков воздуха диаметром от 0,09.

Промышленные испытания диспергаторов воздуха осуществляли в течение трех месяцев при переработке разного медьсодержащего сырья.

Промышленными испытаниями установлено, что дополнительная аэрация пульпы пружинными диспергаторами обеспечивает прирост извлечения меди в концентрат не менее 0,21%.

Таким образом, применение пружинных диспергаторов воздуха рекомендуется к использованию на флотационных обогатительных фабриках для оптимизации гранулометрического состава пузырьков в пульпе флотокамер при дополнительной аэрации пульпы пружинными диспергаторами воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рожнов В. Е.* Исследование процесса диспергирования в механических флотационных машинах // Известия вузов. Горный журнал. — 1969. — № 3. — С. 30—34.

2. *Oleksik K., Saramak D., MŁynarczykowska A.* Evaluation of flotation process course on the example of sulphide ores // E3S Web of Conferences. 2017, vol. 18, article 01006. DOI: 10.1051/e3sconf/20171801006.

3. *Schubert H., Bischofberger J.* On the optimization of hydrodynamics in flotation processes / Proceedings of the 13th International Mineral Processing Congress. Warszawa, 1979, no. 2, pp. 1261—1287.

4. *Бедрань Н. Г., Нестер А. Ф.* Исследование влияния размеров воздушных пузырьков на эффективность флотации угольных частиц различной крупности // Обогащение полезных ископаемых. — 1970. — № 6. — С. 51—56.

5. *Орлов С. Л., Балакин М. Г., Власов И. А.* Разработка технологии использования микропузырьков для доизвлечения меди, цинка и золота из отвальных хвостов флотации руды Узельгинского месторождения / Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXVIII Международной научно-технической конференции. — Екатеринбург: ООО «Типография ФортДиалог», 2023. — С. 417—419.

6. *Wenyun H., Honglu Y., Wenchao H., Bin Z., Xujian L.* On the influences of air bubbles on water flow in a two-dimensional channel // Mathematical Problems in Engineering. 2021, vol. 1, pp. 1—15. DOI: 10.1155/2021/6818673.

7. *Самыгин В. Д.* Кинетика минерализации пузырьков воздуха с учетом отрыва частиц и времени всплывания агрегатов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. — 2016. — № 3. — С. 4—11.

8. *Boncescu C., Robescu L. D.* Study of air bubble dynamics in an air column using CFD // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 85, article 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20198502010.

9. *Tsave P. K., Kostoglou M., Karapantsios T. D., Lazaridis N. K.* A hybrid device for enhancing flotation of fine particles by combining micro-bubbles with conventional bubbles // Minerals. 2021, vol. 11, no. 6, article 561. DOI: 10.3390/min11060561.

10. *Орлов С. Л.*, *Балакин М. Г.*, *Власов И. А.* Влияние микропузырьков на процесс флотационного обогащения // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXVIII Международной научно-технической конференции. — Екатеринбург: ООО «Типография Форт Диалог», 2023. — С. 256—258.

11. *Wang J., Wang L., Cheng H., Runge K.* A comprehensive review on aeration methods used in flotation machines: Classification, mechanisms and technical perspectives // Journal of Cleaner Production. 2024, vol. 435, article 140335. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140335.

12. *Alfarraj B. A., Alkhedhair A. M., Al-Harbi A. A., Nowak W., Alfaleh S. A.* Measurement of the air bubble size and velocity from micro air bubble generation (MBG) in diesel using optical methods // Energy Transitions. 2020, vol. 4, pp. 155—162. DOI: 10.1007/s41825-020-00030-1.

13. *Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J.* Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation // Minerals Engineering. 2017, vol. 112, pp. 19—26. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.020.

14. *Абрамов А. А.* Теоретические основы создания инновационных технологий флотации. Ч 1. Теоретические основы современной флотации // Цветные металлы. — 2013. — № 2(842). — С. 41—45.

15. *Кузнецов А. Н.* Основные виды приборов для измерения расхода жидкости и газа / Современное конкурентное развитие экономики и общества: Материалы III международной научно-практической конференции. — Саратов, 2017. — С. 109—111.

16. *Вилкова Н. Г.*, *Мишина С. И.*, *Киреева Ю. О.* Капиллярное давление в пенах, стабилизированных твердыми частицами / Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства: Сборник докладов VI Национальной научно-практической конференции. — Пенза: ПГУАС, 2023. — С. 4—8.

17. *Moraru E., Dontu O., Baran N., Petre A., Moga I. C.* Experimental researches on the depollution of wastewater by forced oxygenation and ozonation // Revista de Chimie. 2020, vol. 71, no. 9, pp. 202—209. DOI: 10.37358/rc.20.9.8330.

18. *Упорова И. В.*, *Пеньков П. М.*, *Мамонов Р. С.* Оценка аэрированности пульпы во флотационных машинах / Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXIX Международной научно-технической конференции. — Екатеринбург: ООО «Типография Форт Диалог», 2024. — С. 211—214.

19. *Варюхина И. М.*, *Макарова К. Ю.* Флотационный метод обогащения апатит-нефелиновых руд с применением паровоздушной смеси / Лига молодых ученых. Сборник статей Международной научно-практической конференции. — Пенза: Наука и Просвещение, 2023. — С. 69—72.

20. *Пронин И. Ю.*, *Абдуллин Т. И.* Электрические методы очистки сточных вод электрофлотация / Современные технологии в нефтегазовом деле — 2024. Сборник трудов международной научно-технической конференции. — Уфа: УГНТУ, 2024. — С. 724—727.

21. *Nazari S., Hassanzadeh A., Khoshdast H., He Y.* Recent developments in generation, detection and application of nanobubbles in flotation // Minerals. 2022, vol. 12, no. 4, article 462. DOI: 10.3390/min12040462.

22. *Чантурия В. А.*, *Видгергауз В. Е.* Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. — М.: Руда и металлы, 2008. — 272 с.

23. *Морозов Ю. П.*, *Упорова И. В.*, *Колтунов А. В.* Оптимизация гранулометрического состава пузырьков воздуха в пульпе с пружинными диспергаторами воздуха / Научные основы и практика переработки руд и техноген-ного сырья. Материалы XXVIII Международной научно-технической конференции. — Екатеринбург: ООО «Типография Форт Диалог», 2023. — С. 148—153. ГИАБ

REFERENCES

1. Rozhnov V. E. Research of the dispersing process in mechanical flotation machines. *Minerals and Mining Engineering*. 1969, no. 3, pp. 30—34. [In Russ].

2. Oleksik K., Saramak D., MŁynarczykowska A. Evaluation of flotation process course on the example of sulphide ores. *E3S Web of Conferences*. 2017, vol. 18, article 01006. DOI: 10.1051/e3sconf/20171801006.

3. Schubert H., Bischofberger J. On the optimization of hydrodynamics in flotation processes. *Proceedings of the 13th International Mineral Processing Congress*. Warszawa, 1979, no. 2, pp. 1261—1287.

4. Bedran N. G., Nester A. F. Study of the influence of the size of air bubbles on the efficiency of flotation of coal particles of different size. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh*. 1970, no. 6, pp. 51—56. [In Russ].

5. Orlov S. L., Balakin M. G., Vlasov I. A. Development of microbubble technology for extraction of copper, zinc and gold from flotation tailings of the Uzelginskoye ore deposit. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials: Materials of the XXVIII International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, 2023, pp. 417—419. [In Russ].

6. Wenyun H., Honglu Y., Wenchao H., Bin Z., Xujian L. On the influences of air bubbles on water flow in a two-dimensional channel. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, vol. 1, pp. 1—15. DOI: 10.1155/2021/6818673.

7. Samygin V. D. Mineralization kinetics of air bubbles taking into account particle detachment and floating time of aggregates. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 3, pp. 4—11. [In Russ].

8. Boncescu C., Robescu L. D. Study of air bubble dynamics in an air column using CFD. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 85, article 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20198502010.

9. Tsave P. K., Kostoglou M., Karapantsios T. D., Lazaridis N. K. A hybrid device for enhancing flotation of fine particles by combining micro-bubbles with conventional bubbles. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 6, article 561. DOI: 10.3390/min11060561.

10. Orlov S. L., Balakin M. G., Vlasov I. Effect of microbubbles on flotation beneficiation process. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials: Materials of the XXVIII International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, 2023, pp. 256—258. [In Russ].

11. Wang J., Wang L., Cheng H., Runge K. A comprehensive review on aeration methods used in flotation machines: Classification, mechanisms and technical perspectives. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 435, article 140335. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140335.

12. Alfarraj B. A., Alkhedhair A. M., Al-Harbi A. A., Nowak W., Alfaleh S. A. Measurement of the air bubble size and velocity from micro air bubble generation (MBG) in diesel using optical methods. *Energy Transitions*. 2020, vol. 4, pp. 155—162. DOI: 10.1007/s41825-020-00030-1.

13. Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J. Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 112, pp. 19—26. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.020.

14. Abramov, A. A. Theoretical bases for creation of innovative flotation technologies. Part 1. Theoretical foundations of modern flotation. *Tsvetnye Metally*. 2013, no. 2(842), pp. 41—45. [In Russ].

15. Kuznecov A. N. Main types of liquid and gas flow measurement instruments. *Sovremennoe konkurentnoe razvitie ekonomiki i obshchestva: Materialy III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern competitive development of economy and society: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference], Saratov, 2017, pp. 109—111. [In Russ].

16. Vilkova N. G., Mishina S. I., Kireeva Yu. I., Kireeva Y. O. Capillary pressure in foams stabilized by solid particles. *Aktual'nye problemy nauki i praktiki v razlichnykh otraslyakh narodnogo khozyaystva: Sbornik dokladov VI Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of science and practice in various branches of national economy: Collection of reports of the VI National Scientific and Practical Conference], Penza, 2023, pp. 4—8. [In Russ].

17. Moraru E., Dontu O., Baran N., Petre A., Moga I. C. Experimental researches on the depollution of wastewater by forced oxygenation and ozonation. *Revista de Chimie*. 2020, vol. 71, no. 9, pp. 202—209. DOI: 10.37358/rc.20.9.8330.

18. Uporova I. V., Penkov P. M., Mamonov R. S. Assessment of pulp aeration in flotation machines. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials: materials of the XXIX International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, 2024, pp. 211—214. [In Russ].

19. Varyuhina I. M. Flotation method of enrichment of apatite-nepheline ores using steam-air mixing. *Liga molodykh uchenykh. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [League of Young Scientists. Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference], Penza, Nauka i Prosveshchenie, 2023, pp. 69—72. [In Russ].

20. Pronin I. Yu., Abdullin T. I. Electrical methods of wastewater treatment electroflotation. *Sovremennye tekhnologii v neftegazovom dele — 2024. Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern technologies in oil and gas business — 2024. Proceedings of the international scientific and technical conference], Ufa, 2024, pp. 724—727. [In Russ].

21. Nazari S., Hassanzadeh A., Khoshdast H., He Y. Recent developments in generation, detection and application of nanobubbles in flotation. *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 4, article 462. DOI: 10.3390/min12040462.

22. Chanturiya V. A., Vidgergauz V. E. *Elektrokhimiya sul'fidov. Teoriya i praktika flotatsii* [Electrochemistry of sulfides. Theory and practice of flotation], Moscow, Ruda i metally, 2008, 272 p.

23. Morozov Yu. P., Uporova I. V., Koltunov A. V. Optimization of the particle size distribution of air bubbles in slurry with spring air dispersants. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogen-nogo syr'ya. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials: materials of the XXVIII International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, 2023, pp. 148—153. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Морозов Юрий Петрович[1] — д-р техн. наук,
профессор, профессор,
e-mail: tails2002@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0554-5176,
Упорова Ирина Валерьевна[1] — инженер,
e-mail: uporova2013@mail.ru,
Мамонов Роман Сергеевич[1] — инженер,
e-mail: Mamonoff_npa@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9371-1762,
[1] Уральский государственный горный университет.
Для контактов: Упорова И.В., e-mail: uporova2013@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.P. Morozov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: tails2002@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0554-5176,
I.V. Uporova[1], Engineer-Researcher,
e-mail: uporova2013@mail.ru,
R.S. Mamonov[1], Engineer-Researcher,
e-mail: Mamonoff_npa@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9371-1762,
[1] Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: I.V. Uporova, e-mail: e-mail: uporova2013@mail.ru.

Получена редакцией 16.07.2024; получена после рецензии 05.11.2024; принята к печати 10.11.2024.
Received by the editors 16.07.2024; received after the review 05.11.2024; accepted for printing 10.11.2024.