

# Эффективная технология пневматической флотации. Возможности технической модернизации флотационного процесса для горнохимического сырья

allmineral



**А. И. Калугин,**  
канд. техн. наук, зам. главного инженера – главный обогатитель, Кировский филиал АО «Апатит»<sup>1</sup>, г. Кировск Мурманской обл., Россия



**А. В. Лебедок,**  
генеральный директор, ООО «Хацемаг Аллминерал»<sup>2</sup>, Москва, Россия.  
E-mail: lebedok@allmineral.com

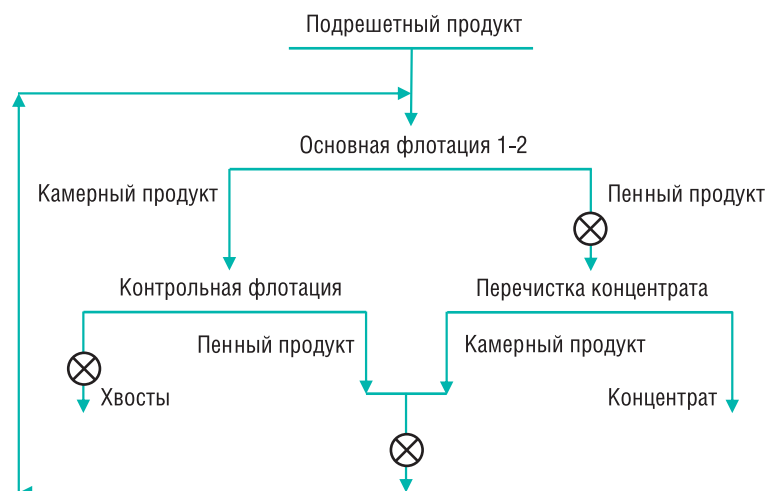


**Л. Маркворт,**  
директор по продажам оборудования в РФ и странах СНГ, allmineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG<sup>3</sup>, Дюссельдорф, Германия

<sup>1</sup>www.phosagro.ru. E-mail: info@apatit.com; apatit@phosagro.ru.

<sup>2,3</sup>www.hazemag.com/ru, www.allmineral.ru

Неуклонное снижение содержания апатита в добываемых апатитовых рудах требует соответственного увеличения объема переработки руды для производства 1 т концентрата [1, с. 57–58]. С целью сокращения потерь полезного компонента – пентоксида фосфора ( $P_2O_5$ ) – с технологическими хвостами флотационного обогащения возникает необходимость рассмотрения возможных вариантов внедрения эффективных технологий на перспективу.



Проведена оценка применения пневматических флотационных машин allflot для обогащения апатитсодержащих руд. В рамках научно-исследовательских работ Кировского филиала АО «Апатит» в условиях реального производства АНОФ-3 на непрерывных технологических потоках были проведены опытно-промышленные испытания пневматической (эжекторной) флотационной машины allflot®. В ходе испытаний определены качественно-количественные и водно-шламовые показатели процесса флотации, обеспечивающие возможность модернизации аппаратного оформления производства.

**Ключевые слова:** пневматическая флотация, флотационная машина allflot®, апатитсодержащие руды.

В рамках научно-исследовательских работ Кировского филиала АО «Апатит» в условиях реального производства АНОФ-3 на непрерывных технологических потоках были проведены опытно-промышленные испытания пневматической (эжекторной) флотационной машины allflot®. Некоторые точки испытываемых переделов показаны на рис 1.

Данный тип флотокамер был разработан и впервые применен при обогащении медных руд более 30 лет назад [2, с. 80–81]. Впоследствии это флотационное оборудование стало использоваться для флотации угля,

**Рис. 1.** Принципиальная технологическая схема опытно-промышленных испытаний апатитовой флотации на машине allflot®

**Figure 1.** Flowsheet of pilot tests of apatite flotation on the allflot®.

калийных солей и другого минерального сырья.

Флотомашина в современном исполнении оснащена аэратором-гибридом адаптивной конструкции, позволяющей интенсивно растворять в пульпе окружающий воздух при отклонениях потока на аэратор  $\pm 20\%$  без изменения параметров и эффективности процесса флотации.

Подготовленная пульпа, смешанная с собирательной смесью, подается по пульпопроводу из агитационной емкости посредством шламового насоса (скорость движение пульпы на аэратор-гибрид составляет 9,4 м/с) [3, с. 194]. Под действием наклонных поперечных сил, создаваемых энергией струй пульпы, происходит захват окружающего воздуха, который, проходя через сопло, интенсивно растворяется в пульпе. Насыщенная пульпа движется по внутренней трубе вертикально вниз и выходит через планетарный распределитель вверх. Пузырьки воздуха, обладающие широким спектром размеров, в том числе сверхмелкие пузырьки [4], покрытые гидрофобными частицами, поднимаются вверх и образуют на поверхности высокоминерализованный пенный слой, который отводится в пенный карман, огибающий флотационную камеру по окружности. Гидрофильные частицы разгружаются в нижней части флотационной камеры.

Процесс флотации осуществлялся в одну стадию обогащения (в открытом потоке). Для каждого продукта обогащения проводилась серия тестов (всего 72 теста) при различных режимах без подачи и с подачей реагента, а также при разных вариантах подбора оптимальных параметров работы флотомашины. По заготовленной матрице производился отбор проб, которые подвергались сушке (разделке) и направлялись на химический анализ. Использовалась система капиллярной промывки пенного продукта [5]. Фиксировались все параметры работы флотомашины **allflot®**: содержание твердого в продуктах обогащения, температура среды, pH среды, производительность по исходному питанию, глубина пенного слоя, количество воздуха, поступающего на аэратор самовсасывающего типа, расход реагентов.

Полученные результаты подтвердили возможность получения кондиционного флотационного апатитового концентрата ( $\geq 39\%$   $P_2O_5$ ) на машине **allflot®** в одну стадию без добавления реагента и с использованием эффективного аэратора самовсасывающего типа [6, с. 69]. Подтверждена высокая селекция круп-

Таблица 1. Гранулометрические характеристики продуктов обогащения на машине **allflot®**

Table 1. Granulometric characteristics of the enrichment products on the **allflot®** machine.

Отбор	Наименование продукта	Доля фракции $+0,16$ мм, %	Доля классов, %					
			$>0,32$ мм	$>0,20$ мм	$>0,16$ мм	$>0,071$ мм	$>0,04$ мм	$<0,04$ мм
0804	Питание флотации	47,8	12,5	23,2	12,1	26,9	8,4	16,9
	Пенный продукт	57,2	19,4	26,9	10,9	22,3	7,5	13,0
	Промпродукт	36,5	9,3	17,1	10,1	26,4	23,8	13,3
1004	Питание флотации	37,6	7,5	21,4	8,7	31,7	13,3	17,4
	Пенный продукт	41,9	8,9	24,4	8,6	30,2	14,0	13,9
	Промпродукт	38,6	8,8	21,6	8,2	30,1	11,4	19,9

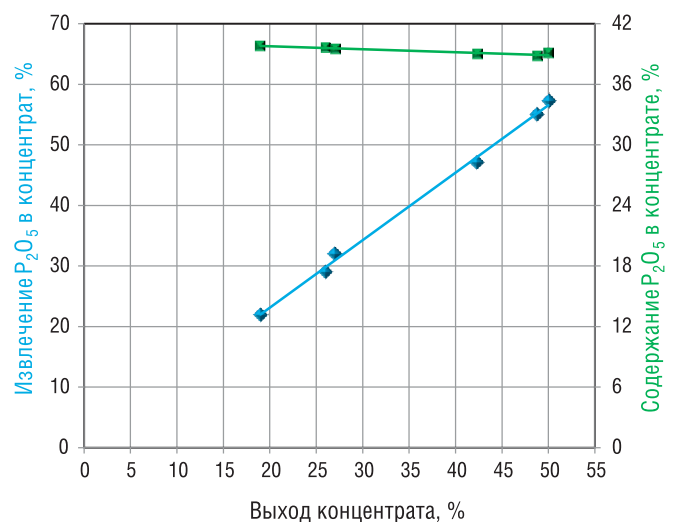


Рис 2. Зависимость извлечения и содержания  $P_2O_5$  от выхода концентрата на пенном продукте основной флотации в машине **allflot®** за одну стадию

Figure 2. The dependence of the recovery and content of phosphorus pentoxide ( $P_2O_5$ ) from concentrate yield to the foam product when main flotation in the **allflot®** machine in one stage.

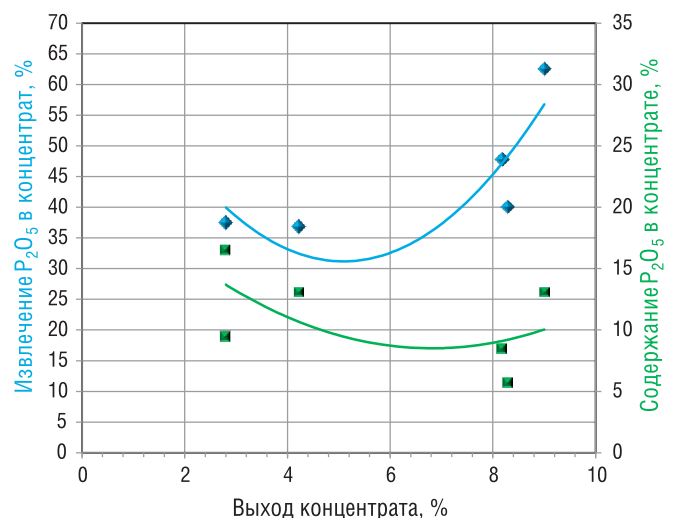


Рис 3. Зависимость извлечения и содержания  $P_2O_5$  от выхода концентрата на камерном продукте контрольной флотации в машине **allflot®** за одну стадию

Figure 3. The dependence of the recovery and content of phosphorus pentoxide ( $P_2O_5$ ) from concentrate yield to the flotation tail when flotation in the **allflot®** machine in one stage.

Таблица 2. Средние показатели обогащения пенного продукта основной флотации (6 тестов) в машине allflot® за одну стадию

Table 2. Average indicators of the foam product enrichment when main flotation in the allflot® machine in one stage.

Питание	Содержание $P_2O_5$ , %		Выход концентрата, %	Извлечение, %
	Концентрат	Промпродукт		
34,84	39,08	32,22	38,19	42,84

Таблица 3. Средние показатели обогатимости камерного продукта контрольной апатитовой флотации (6 тестов) в машине allflot® за одну стадию

Table 3. Average concentrability indicators of the flotation tail on testing apatite (6 tests) when flotation in the allflot® machine in one stage.

Питание	Содержание $P_2O_5$		Выход концентрата, %	Извлечение, %
	Концентрат	Хвосты		
1,32	10,79	0,79	5,30	43,32

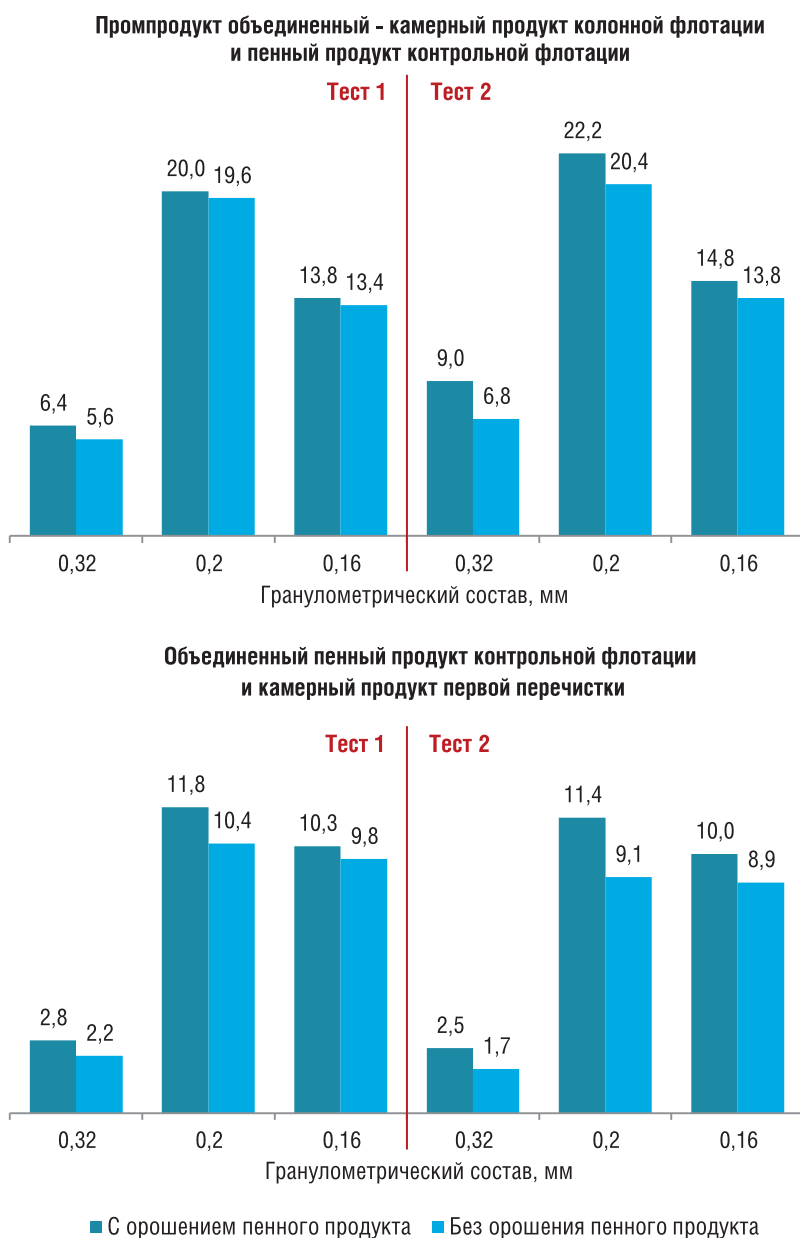


Рис 4. Распределение содержания классов  $P_2O_5$  (в процентах) в концентрате allflot® по классу +0,16 мм

Figure 4. Yield of  $P_2O_5$  grain size classes (in percent) in allflot® concentrate by class +0.16 mm.

ных частиц апатита (табл. 1). Впервые на флотомаши-не allflot® была опробована капельная система промывки пенного продукта.

Средние показатели обогащения пенного про-дукта основной флотации приведены в табл. 2, ви-зуализация взаимозависимости извлечения и содер-жания  $P_2O_5$  показана на рис. 2.

Согласно программе испытаний проверялась также возможность применения allflot® для флота-ции камерного продукта контрольной апатитовой флотации. Сводные показатели обогатимости ка-мерного продукта контрольной апатитовой флота-ции и их графические зависимости представлены в табл. 3 и на рис. 3. Дофлотация камерного продук-та контрольной операции с помощью флотомашины allflot® требует дополнительного изучения. Пен-ный продукт флотомашины почти соот-ветствует содержанию  $P_2O_5$  в исходном продукте, поступающем на обогащение.

Можно отметить, что теоретически дан-ная дополнительная операция потенци-ально позволяет снизить потери  $P_2O_5$  за счет возврата пенного продукта на до-обогащение.

Необходимо отметить целесообразность применения системы капиллярно-го промыва пенного продукта. Ситовые характеристики с распределением клас-сов апатита с орошением и без орошения пенного продукта приведены на рис. 4. Совокупность данных параметров по-зволяет провести анализ, рассчитать ба-ланс и производные показатели работы allflot®, которые используются при вы-боре флотомашины бóльших типоразме-ров (при масштабировании) для разных операций технологической схемы с пре-доставлением гарантий на технологию от производителя allmineral. При мас-штабировании исключается использова-ние каких-либо коэффициентов, так как струи потока пульпы идентичны для всех типоразмеров allflot® за счет обработ-ки пульпы и растворения в ней воздуха, происходящих с одинаковой интен-сивностью. На основе результатов опытно-промышленных исследований был рас-считан баланс апатитового цикла с при-менением allflot®.

#### Результаты ОПИ пневматической (эжек-торной) флотационной машины allflot®

Из апатитовой руды с массовой до-лей  $P_2O_5$  около 12 % с применением тех-нологии allflot® получен кондиционный

флотационный апатитовый концентрат при технологическом извлечении не менее 95 %. Флотомашинa allflot® продемонстрировала возможность флотации крупного по гранулометрическому составу материала за счет капиллярной отмывки пенного продукта.

Подтверждена возможность технической модернизации флотационного процесса за счет применения со-

временной и эффективной технологии пневматической флотации allflot® фосфатных руд – важнейшего вида горнохимического сырья. Установлена возможность увеличения пропускной способности флотационной секции при повышении частного извлечения в операции и сокращения циркуляционных потоков в технологической схеме флотационного обогащения. **РОН**

Поступила в редакцию 20.02.2021



**Список использованных источников**

1. Калугин А. И., Иванычев С. В., Левин Б. В. Современное состояние и новые тенденции переработки апатит-нефелиновых руд и производства высококачественной продукции в АО «Апатит» // Горный журнал. 2019. № 9. С. 57–62.
2. Fuerstenau M.C., Jameson G.J., Yoon R.-H. (Editors) Froth flotation: A century of innovation. Colorado, USA, SME Publ., 2007, 891 p. [Electronic edition published 2009]. (на англ.)
3. Лавриненко А. А. Современные флотационные машины для минерального сырья // Горная техника: каталог-справочник. – СПб. : ИД «Славутич», 2008. – С. 186–195.
4. Лебедок А. В. Использование технологии Pneufлот® для флотации тонкого золота и шламов борогипса // Обогащение руд. 2018. № 4. С. 17–19.
5. Полупромьшленные испытания флотомашины Jameson Cell на золотоизвлекательной фабрике ОАО «Ресурсы Албазино» / А. А. Чистяков, В. Н. Ковалев, А. Ю. Галютин [и др.] // Обогащение руд. 2014. № 4. С. 23–26.
6. Лебедок А.В., Маркворт Л. Переработка минерального сырья техногенных месторождений с применением высокоэффективных технологий // Рациональное освоение недр. 2020. № 1. С. 69–71. DOI: 10.26121/RON.2020.56.66.008.

UDC identifier 622.364.1:622.765.431.2

DOI:

**Efficient pneumatic flotation method. Possibilities of the technical improvement of flotation process for mining and chemical raw materials**

**Aleksandr I. Kalugin**, PhD (in Eng.), Deputy Chief Engineer – Chief Engineer of ore dressing, Kirov Branch of Apatit JSC<sup>1</sup>

**Artem V. Lebedok**, General Director, Hazemag allmineral LLC<sup>2</sup>

**Lutz Markworth**, Director of equipment sales in Russia and CIS countries, allmineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Leningradskaya Street, Kirovsk, Murmansk Region, 184250, Russia. www.phosagro.ru. E-mail: info@apatit.com; apatit@phosagro.ru.

<sup>2</sup> Fabrichnaya, 1, bld. 1, office 327, 141108 Shchelkovo, Moscow region, Russia.

<sup>3</sup> Willstätterstraße 15, 40549 Düsseldorf, Germany.

<sup>2,3</sup> www.hazemag.com/ru, www.allmineral.com, www.allmineral.ru.

**Abstract:** The article evaluates the use of allflot® pneumatic flotation machines for the enrichment of apatite-containing ores. The results of experimental and industrial tests of the pneumatic (ejector) flotation machine allflot® which were carried out as part of research work in the Kirov branch of Apatit in the conditions of real production at one of the processing plants are presented. The qualitative-quantitative and water-sludge indicators of the flotation process that provide the possibility of upgrading the apparatus re-equipment of production are determined.

**Key words:** Pneumatic Flotation; allflot® Flotation Machine; Apatite-containing Ores; Apatit JSC.

**Received** 20 February 2021

**References**

1. Kalugin A.I., Ivanychev S.V., Levin B.V. *Sovremennoe sostoyanie i novye tendentsii pererabotki apatit-nefelinovykh rud i proizvodstva vysokokachestvennoi produktsii v AO "Apatit"* [Current state and new trends in processing of apatite-nepheline ores and production of high-quality products in JSC "Apatit"], *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 2019, no. 9, pp. 57–62. (in Russ.)
2. Fuerstenau M.C., Jameson G.J., and Yoon R.-H. (Editors). *Froth Flotation: A Century of Innovation*. Colorado, USA, SME Publ., 2007, 891 p. [Electronic edition published 2009]. (in Eng.)
3. Lavrinenko A.A. *Sovremennye flotatsionnye mashiny dlya mineral'nogo syr'ya* [Modern flotation machines for mineral raw materials\*]. In: *Gornaya tekhnika: katalog-spravochnik* [Mining equipment: directory-reference.]. St. Petersburg, Slavutich Publishing House, 2008, pp. 186–195. (in Russ.)
4. Lebedok A.V. *Ispol'zovanie tekhnologii Pneufлот® dlya flotatsii tonkogo zolota i shlamov borogipsa* [Pneufлот® technology application for fine gold and borogypsum slime flotation], *Obogashchenie rud* [Mineral Processing], 2018, no. 4, pp. 17–19. (in Russ.)
5. Chistyakov A.A., Kovalev V.N., Galyutin A.Yu., Golikov V.V., Aksenov B.V., Rakhbani R. *Polupromyshlennyye ispytaniya flotomashiny Jameson Cell na zolotoizvlekatel'noi fabrike OAO "Resursy Albazino"* [Semi-industrial tests of the Jameson Cell flotation machine at the Albazino Resources Gold Recovery Plant\*], *Obogashchenie rud* [Mineral Processing], 2014, no. 4, pp. 23–26. (in Russ.)
6. Lebedok A., Markworth L. *Pererabotka mineral'nogo syr'ya tekhnogennykh mestorozhdenii s primeneniem vysokoeffektivnykh tekhnologii* [Processing of man-made mineral raw using high-efficiency technologies], *Ratsional'noye osvoyeniye neдр* [Mineral Mining & Conservation (MMC)], 2020, no. 1, pp. 69–71. DOI: 10.26121/RON.2020.56.66.008.

\*Translated by Authors of this article.

**Ссылка для цитирования в русскоязычных изданиях:**

Калугин А. И., Лебедок А. В., Маркворт Л. Эффективная технология пневматической флотации. Возможности технической модернизации флотационного процесса для горнохимического сырья // Рациональное освоение недр. 2021. № 1. С. ...–... DOI: ....

**To cite this article in English:**

Kalugin A.I., Lebedok A.V., Markworth L. Efficient pneumatic flotation method. Possibilities of the technical improvement of flotation process for mining and chemical raw materials, *Ratsional'noye osvoyeniye neдр* [Mineral Mining & Conservation (MMC)], 2021, no. 1, pp. ...–... DOI: ....