УДК 536.3; 536.4; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2022-4.08
https://orcid.org/0000-0002-9516-5400
https://orcid.org/0000-0001-8498-7049
https://orcid.org/0000-0002-8259-3908

ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

К.Ш. ЧОКИН[1],
доктор физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник,
k.chokin@satbayev.university

Н.К. НАДИРОВ,
академик НАН и НИА РК,
Лауреат государственной премии,
Заслуженный деятель науки
КазССР, Почетный нефтяник
СССР, Изобретатель СССР

А.И. ЕДИЛЬБАЕВ[2],
доктор технических наук,
инженер-обогатитель,
генеральный директор
ТОО «Горное бюро»,
info@gornoeburo.kz

А.Д. МЕДВЕДЕВ[1],
лаборант,
a.medvedev@satbayev.university

[1]ТОО «ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ», НАО «КАЗНИТУ ИМ. К.И. САТПАЕВА»
Республика Казахстан, 050032, г. Алматы, ул. Ибрагимова, 11

[2]ТОО «ГОРНОЕ БЮРО»,
Республика Казахстан, 050051, г. Алматы, пр. Достык, д. 132, оф. 2

В работе рассматриваются технологии переработки техногенных образований путем доизвлечения целевых компонентов, сокращения отходов на стадиях обогащения и после химико-металлургического передела. Этот подход принципиально отличается от существующего основного направления использования техногенных отходов в качестве вторичных ресурсов при производстве строительных материалов.

Отмечается, что в хвостах сухой магнитной сепарации магнетитовых руд присутствуют мелкие частицы с концентрацией железа, представляющей коммерческий интерес. На первом этапе необходимо механическое выделение мелких классов из большого объема пустой породы. Решение данной проблемы основано на привлечении высокопроизводительных методов воздушной классификации. Рассмотрено применение аппаратов с наклонной жалюзийной решеткой, для которых определены параметры степени фракционного извлечения в мелкий продукт хвостов магнитной сепарации. Второй этап обогащения хвостов заключается в сухом магнитном извлечении железосодержащих частиц из мелких классов. Для этих целей обсуждается применение новых магнитных сепараторов, специально разработанных ранее для работы с частицами магнетита малых размеров. В совокупности такой подход позволяет поднять общую степень извлечения железа из руды без дополнительных операций измельчения и существенных финансовых затрат.

Другое направление промышленного приложения предлагаемых технологий переработки техногенных отходов относится к производству фосфора. Фосфорная промышленность является перспективной отраслью химической промышленности. Но ее развитие несет и отрицательные черты в виде образующихся многотоннажных отходов после химико-металлургического передела. Среди них фосфорный шлам является наиболее агрессивным - это капли фосфора в водной среде, покрытые «шубой» из смеси пыли и других продуктов, связываемых с фосфором абсорбционными силами сцепления в мицеллы. Рассматривается применение для этих целей двух разработанных технологий извлечения фосфора. Для достижения этой цели необходимо разрушить минералогическую оболочку мицелл. Тогда высвободившийся фосфор оседает на дно из-за более высокой плотности и происходит расслоение.

В первом подходе разрушение оболочки мицелл производится химически. Во второй предлагаемой технологии процесс разрушения происходит за счет физического кавитационного воздействия, которое создается упругими акустическими колебаниями звуковых и ультразвуковых частот.

Экспериментальные исследования применения данных технологий к шламам с содержанием фосфора 10-90% показали степень извлечения фосфора более 95%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *техногенные отходы, обогащение, магнитная сепарация, воздушная классификация, фосфорный шлам.*

ТАУ-КЕН ӨНДІРІСІНІҢ ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРЫН ҚАЙТА ӨҢДЕУ

К.Ш. ЧОКИН[1], физ.-мат. ғыл. докторы, бас ғылыми қызметкері, *k.chokin@satbayev.university*
Н.К. НАДИРОВ, Қазақ КСР Ғылым академиясының академигі, Мемлекеттік сыйлықтың лауреаты және Қазақ КСР-інің еңбек сіңірген ғылым қайраткері, КСРО-ның құрметті мұнайшысы, КСРО өнертапқышы
А.И. ЕДИЛЬБАЕВ[2], техн. ғыл. докторы, инженер-байытушы, бас директоры, *info@gornoeburo.kz*
А.Д. МЕДВЕДЕВ[1], «Физика-техникалық институты» ЖШС лаборанты, *a.medvedev@satbayev.university*

1«ФИЗИКА-ТЕХНИКАЛЫҚ ИНСТИТУТЫ», «Қ.И. СӘТПАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗҰТЗУ» КЕАҚ
Қазақстан Республикасы, 050032, Алматы қ-сы, Ибрагимов к-сі, 11

[2]«ГОРНОЕ БЮРО» ЖШС,
Қазақстан Республикасы, 050051, Алматы қ-сы, Достық д-ғы, 132 үй, офис 2

Жұмыста техногенді түзілімдерді мақсатты компоненттерді алу, байыту сатыларында және химиялық-металлургиялық қайта бөлуден кейін қалдықтарды қысқарту жолымен қайта өңдеу технологиясы қарастырылады. Бұл тәсіл технологиялық қалдықтарды құрылыс материалдарын өндіруде қайталама ресурстар ретінде пайдаланудың қазіргі негізгі бағытынан түбегейлі ерекшеленеді.

Магнетит кендерінің құрғақ магниттік бөлінуінің құйрығында коммерциялық қызығушылық тудыратын темір концентрациясы бар ұсақ бөлшектер бар екендігі атап өтілді. Бірінші кезеңде бос жыныстың үлкен көлемінен ұсақ кластарды механикалық оқшаулау қажет. Бұл мәселені шешу ауаны жіктеудің жоғары өнімді әдістерін тартуға негізделген. Магнитті бөлу қалдықтарының ұсақ өніміне фракциялық экстракция дәрежесінің параметрлері анықталған көлбеу жалюзи торы бар құрылғыларды қолдану қарастырылады. Қалдықтарды байытудың екінші кезеңі-құрамында темір бар бөлшектерді ұсақ кластардан құрғақ магниттік алу. Осы мақсаттар үшін бұрын шағын магнетит бөлшектерімен жұмыс істеу үшін арнайы жасалған жаңа магниттік сепараторларды қолдану талқыланады. Бұл тәсіл қосымша ұнтақтау операцияларынсыз және айтарлықтай қаржылық шығындарсыз темірді кеннен алудың жалпы дәрежесін көтеруге мүмкіндік береді.

Техногендік қалдықтарды қайта өңдеудің ұсынылатын технологияларын өнеркәсіптік қолданудың басқа бағыты фосфор өндірісіне жатады. Фосфор өнеркәсібі химия өнеркәсібінің перспективалы саласы болып табылады. Бірақ оның дамуы химиялық-металлургиялық қайта бөлуден кейін пайда болған көп тонналық қалдықтар түрінде теріс ерекшеліктерге ие. Олардың ішінде фосфор шламы ең агрессивті болып табылады-бұл мицеллаларға фосфордың сіңіру күштерімен байланысқан шаң мен басқа да өнімдердің қоспасынан "тонмен" жабылған су ортасындағы фосфор тамшылары. Осы мақсатта фосфор алудың екі дамыған технологиясын қолдану қарастырылуда. Осы мақсатқа жету үшін мицеллалардың минералогиялық қабығын жою қажет. Содан кейін босатылған фосфор жоғары тығыздыққа байланысты түбіне түседі және стратификация жүреді.

Бірінші тәсілде мицелланың қабығын жою химиялық жолмен жүзеге асырылады. Ұсынылған екінші технологияда бұзылу процесі дыбыстық және ультрадыбыстық жиіліктердің серпімді акустикалық тербелістерімен пайда болатын физикалық кавитациялық әсерден туындайды.

Құрамында 10-90% фосфоры бар шламдарға осы технологияларды қолдануды эксперименттік зерттеулер 95% - дан астам фосфорды алу дәрежесін көрсетті.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *техногендік қалдықтар, байыту, магниттік айыру, ауа сыныптамасы, фосфор шламы.*

PROCESSING OF TECHNOGENIC WASTE OF MINING PRODUCTION

K.SH. CHOKIN[1], Doctor of Physical and Mathematical Science, Chief Researcher Institute of Physics and technology, *k.chokin@satbayev.university*
N.K. NADIROV, Academician of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, Laureate of the State Prize and Honored Scientist of the Kazakh SSR, Honorary Oilman of the USSR, Inventor of the USSR
A.I. YEDILBAYEV[2], Doctor of Technical Sciences, enrichment engineer, General Director of Mining Bureau LLP, *info@gornoeburo.kz*
A.D. MEDVEDEV[1], laboratory assistant лаборант Institute of Physics and technology, LLP, Satbayev University, *a.medvedev@satbayev.university*

[1]«INSTITUTE OF PHYSICS AND TECHNOLOGY, LLP, SATBAYEV UNIVERSITY»
11 Ibragimova Street, Almaty, 050032, Republic of Kazakhstan

[2]MINING BUREAU LLP,
132-2 Dostyk Street, Almaty, 050051, Republic of Kazakhstan

The article considers technologies for the processing of technogenic formations by additional extraction of target components, reduction of waste at the stages of enrichment and after chemical and metallurgical processing. This approach is fundamentally different from the existing basic outlines of the use of technogenic waste as secondary resources in the production of building materials.

It is noted that in the tailings of dry magnetic separation of magnetite ores there are fine particles with iron concentration, which are of commercial interest. At the first stage, it is necessary to mechanically separate small classes from the total number of waste rocks. The solution to this problem is based on the use of high-performance air classification methods. The use of apparatuses with an inclined louvered grating is considered, for which the parameters of the degree of fractional extraction of magnetic separation tailings into a fine product are determined. The second stage of tailings enrichment consists in dry magnetic extraction of iron-containing particles from small classes. For these purposes, the use of new magnetic separators, specially developed earlier for working with magnetite particles of small sizes, is discussed. Taken together, this approach makes it possible to increase the overall degree of iron extraction from ore without additional grinding operations and significant financial costs.

Another direction of the industrial application of the proposed technologies for the processing of technogenic waste relates to the production of phosphorus. The phosphorus industry is a promising sector of the chemical industry. But its development also bears negative features in the form of large-tonnage waste generated after chemical and metallurgical processing. Among them, phosphorus sludge is the most aggressive - it is a drop of phosphorus in an aqueous medium, absorption by a "fur coat" from a mixture of dust and other products associated with phosphorus by absorption bonds in micelles. Applications are being considered for two developed phosphorus mining targets. To achieve this goal, it is necessary to destroy the mineralogical shell of micelles. Then the released phosphorus settles to the bottom due to the higher density and separation occurs.

In the first approach, the destruction of the micelle shell is carried out chemically. In the second proposed technology, the destruction process occurs due to the physical cavitation effect, which is created by elastic acoustic vibrations of sound and ultrasonic frequencies.

Experimental studies of the application of these technologies to sludge with a phosphorus content of 10-90% have shown the degree of phosphorus recovery of more than 95%.

KEY WORDS: *technogenic waste, enrichment, magnetic separation, air classification, phosphorus sludge.*

Введение. Данная статья направлена в редакцию журнала "Нефть и газ", бессменный главный редактор которого академик **Надир Каримович Надиров.** Он принимал участие в обсуждении многих аспектов, затронутых здесь. Его научный кругозор далеко распространялся за пределы проблем химии нефти и газа. Эта статья является лишним подтверждением этого факта.

Накопление техногенных отходов приводит к загрязнению окружающей среды и является следствием нерационального использования первичных природных ресурсов, запасы большинства которых ограничены и исчерпаемы [1]. Но самой большой проблемой является огромное количество отходов, для хранения которых отчуждаются большие площади земель, в том числе и плодородных. Из-за загрязнения токсичными веществами выбывают так же земли в радиусе 200 км от места захоронения металлургических отходов [2,3]. Если образующиеся в настоящее время на промышленных предприятиях отходы производства в каком-то количестве под-

вергаются утилизации, то отходы, образовавшиеся до 1993 г., остаются лежать на поверхности, формируя техногенные массивы [4]. Включение производственного цикла переработки промышленных отходов решает одновременно две актуальные проблемы - проблему ресурсов и проблему сохранности окружающей среды [5]. Переработка техногенных отходов может стать источником большого количества сырья для химической, строительной и металлургической промышленностей [1]. В связи с этим утилизация техногенных отходов является актуальной экологической и экономической задачей. Использование техногенных отходов в качестве вторичного сырья становится особенно актуальным [6,7]. К основным отраслям промышленности, в которых техногенные отходы могут быть использованы в качестве вторичных ресурсов, относятся производство строительных материалов, производство металлов, агропромышленный комплекс, стекольная, химическая и нефтехимическая промышленности. В настоящее время применение техногенных отходов в строительстве является главным направлением переработки техногенных отходов, которое позволяет перерабатывать различные виды отходов в большом количестве с получением изделий достаточно высокого качества [1]

Для принятия стратегического решения о переработке необходимо проведение исследований состава и свойств техногенного сырья и выявление оптимальных способов его обогащения и переработки с получением кондиционной и востребованной продукции [4].

Рассмотренное выше – это основное направление в настоящем применения техногенных отходов в качестве вторичного сырья. В данной работе предлагаются технологии переработки техногенных отходов горного производства, образующихся на стадии обогащения и после химико-металлургического передела, направленные на доизвлечение целевого компонента и повышение степени переработки основного производства.

Переработка техногенных отходов обогащения магнетитовых руд. Основными отходами переработки железных руд являются хвосты, образующиеся в технологических процессах измельчения, классификации, обогащения, сгущения, фильтрования. Остановимся на операции сухого магнитного обогащения. Здесь оборудование настроено на работу с крупными фрагментами, а мелкий магнитный продукт, размером меньше нескольких десятых долей миллиметра, выделяется не столь эффективно. Поэтому в отходах сухого обогащения присутствуют мелкие частицы с концентрацией железа, представляющей коммерческий интерес. На первом этапе решение проблемы обогащения этих хвостов связано с привлечением высокопроизводительных методов классификации больших объемов хвостов с целью механического выделения мелких классов. После чего требуется применение эффективных аппаратов магнитного обогащения такого продукта при низком содержании в них магнитной фракции. В совокупности такой подход позволит поднять общую степень извлечения железа из руды без дополнительных операций измельчения и существенных финансовых затрат. Перспективы этого направления определяются разработкой технологического оборудования.

В существующих технологиях переработки руд основным методом классификации является грохочение, производимое рассеванием рудных материалов на

решето и ситах с калиброванными отверстиями. Однако, выделение материалов с размером частиц менее 1 мм нецелесообразно проводить в грохотах, так как в этом случае их удельная производительность весьма низка. Такие мелкозернистые сухие материалы рациональнее разделять с помощью воздушных классификаторов [9]. Например, удельная нагрузка гравитационных пневматических классификаторов при разделении по граничному зерну 0,1 мм в 100 раз большее чем для грохотов [10].

Среди пневматических аппаратов сепарации сыпучих материалов практический интерес представляет воздушные классификаторы с наклонной жалюзийной решеткой [9], применяемыми в промышленности строительных материалов. Они обладают высокой производительностью и имеют существенные преимущества в изготовлении и эксплуатации. Установка фракционирования дробленных материалов представлена на рисунке 1А, а воздушный классификатор отдельно показан на 1В.

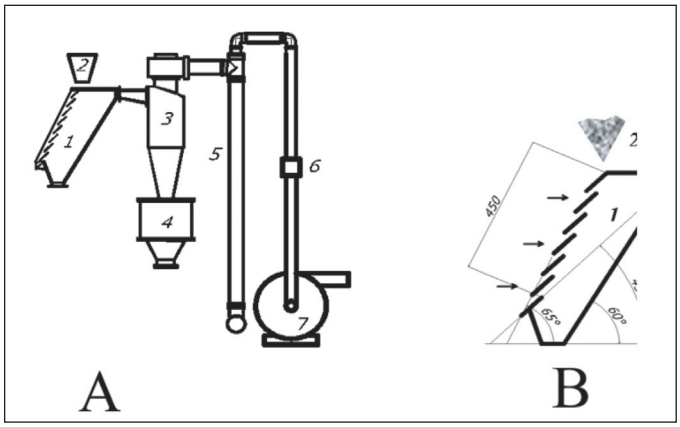

Рисунок 1 – **Схема лабораторной установки фракционирования хвостов (А) и конструкция воздушного классификатора (В) с наклонной жалюзийной решеткой: 1 – пневмоклассификатор; 2 – питатель материала; 3 – воздушный циклон; 4 – сборник мелкого класса частиц; 5 – рукавный фильтр; 6 – расходомер; 7 – вентилятор высокого давления**

Оборудование работает следующим образом. Исходный материал подается питателем (2) на верхнюю пластину жалюзи. Воздушный поток создается вентилятором высокого давления (7). Крупный класс скатывается по наклонным плоскостям жалюзи, а мелкий продукт увлекается воздушным потоком в классификатор (1). Крупная часть этого продукта попадает на дно классификатора, а остальная осаждается в циклоне (3) и пылевидная улавливается рукавным фильтром (5).

Гранулометрический состава продукта $n(x_i)$, выделяемого воздушным классификатором, можно определить, зная распределение исходного материала $N(x_i)$ по размеру частиц x_i и степень фракционного излечения продукта в мелкий класс $\Phi_s(x_i)$:

$$n(x_i) = \Phi_s(x_i) * N(x_i). \qquad (1)$$

Последнюю удобно аппроксимировать теоретическим распределением Плитта [9]:

$$\Phi_s(x) = \frac{1}{1+(\frac{x}{x_{50}})^p}. \qquad (2)$$

где для вычисления показателя эффективности разделения ***p*** можно воспользоваться критерием Элера-Майера [9]:

$$p = \frac{\ln\left(\frac{1}{9}\right)}{\ln\left(\frac{x_{75}}{x_{25}}\right)}. \qquad (3)$$

Здесь x_{25}, x_{50}, x_{75}, – средние размеры узких фракций частиц, выносимых в мелкий продукт на 25%, 50%, 75% соответственно. Параметр ***p*** определяет остроту сепарации.

Таким подходом степень фракционного излечения $\Phi_s(x_i)$ пневматической сепарации порошков можно характеризовать с помощью экспериментальных величин x_{25}, x_{50}, x_{75}, или x_{50}, и показателя ***p*** (3).

В качестве примера рассмотрим отходы магнитной сепарации, которые образуются при обогащении железосодержащих руд месторождения Бапы (Казахстан). В регионе добыче отсутствуют в должном количестве водные ресурсы и производство концентрата осуществляется только сухими методами по следующей схеме. Добываемая руда дробиться до размера менее 30 мм и проходит первую стадию магнитной сепарации до содержания железа 42-45%. Далее следует еще одна операция дробления выделенного магнитного продукта до крупности 10 мм и вторая стадия магнитной сепарации. Конечной продукцией горно-обогатительного комбината является концентрат с содержанием железа более 52%. Поэтому такая концентрация железа является целью переработки хвостов, которые являются отходами второй стадии магнитной сепарации.

Исследование процессов извлечения магнетитовых частиц из хвостов проводилось без дополнительных операций измельчения. На *рисунке 2* представлено относительное распределение $N(x)$ этих частиц по размеру ***x***:

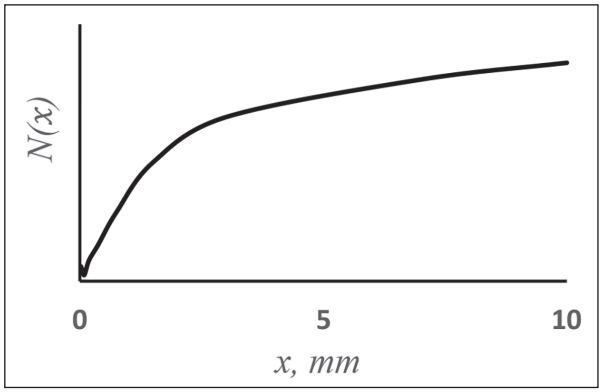

Рисунок 2 – **Относительное распределение частиц *N(x)* по размеру *x* в хвостах**

Воздушная классификация материала хвостов показала (*таблица 1*) следующие параметры степени фракционного извлечения в мелкий продукт, аппроксимированные теоретическим распределением Плитта (2). Здесь V – скорость воздушного потока на входе в классификатор.

Таблица 1 – **Параметры степени фракционного извлечения в мелкий продукт хвостов магнитной сепарации**

V, м/с	4	5	6
μ, кг/м^3	12,9	9,2	7,5
X50, мм	0,23	0,30	0,43
P	2,78	2,68	2,70

Второй этап обогащения хвостов заключается в сухом магнитном извлечении железосодержащих частиц из мелких классов.

Традиционно, магнитный сепаратор представляет собой магнитную систему, вокруг которой вращается немагнитный барабан. Руда подается с верху на вращающийся немагнитный барабан и за счет центробежной силы частицы пустой породы отбрасываются от него, а магнитные частицы остаются на барабане. В новом сепараторе [11,12], далее называемым ленточным, руда в магнитное поле подается с низу по внутренней поверхности несущей ленты, которая огибает барабан и отстоит от него на некоторое расстояние. Этот зазор является областью сепарации. К ленте измельченная руда прижата центробежно. В магнитном поле частицы магнетита притягиваются к вращающемуся немагнитному барабан, а пустая порода остается на ленте. Принципиальная новизна заключается в том, что традиционное обогащение происходит за счет того, что немагнитный частицы покидают барабан, а в [11,12] наоборот – магнитные частицы в обратном направлении уходят с поверхности ленты и притягиваются к вращающемуся барабану. Дело в том, что магнитные частицы склонны к магнитной флоакуляции, что способствует образованию некоторых достаточно крупных агломераций. Находясь в исходном материале, они контактируют с частицами пустой породы и попадя на барабан вместе магнитные флоакулянты частично прижимают и удерживают немагнитные частицы и сростки на поверхности барабана, которые затем попадают в концентрат и засоряют его. Если изначально исходный продукт находится на ленте и в магнитном поле железосодержащие частицы притягиваются к барабану, пролетая некоторое расстояние, то на барабан в меньшем количестве попадает пустая порода и эффект засорения магнитного продукта значительно снижается.

Этот способ магнитной сепарации тонкоизмельченных магнитных руд схематически представлен на *рисунке 1*. Магнитный сепаратор состоит из: подвижного барабана из немагнитного материала *1*, неподвижной магнитной системы *2*, установленной внутри него и состоящей, например, из постоянных магнитов с чередующей полярностью, транспортера с несущей поверхностью *3*, которая является выпуклой цилиндрической поверхностью с образующей, параллельной оси барабана, делителя *4*, который разделяет магнитную *5* и немагнитную *6* фракции и лотка питателя *7*.

Устройство работает следующим образом. Сыпучий материал подается питателем *7* на движущейся ленту транспортера *3* и перемещается ею в зону действия магнитного поля. Центробежная сила прижимает частицы к внутренней поверхности подвижной ленты транспортера. В зоне сепарации на магнитную частицу действует магнитная сила, противодействующая центробежной. Магнитные частицы притягиваются магнитным полем к поверхности вращающегося барабана *1*, перемещаются

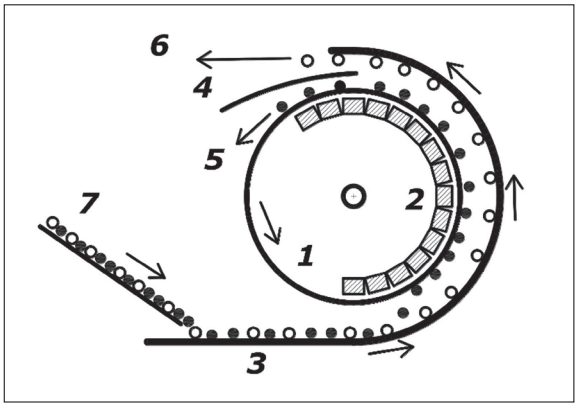

Рисунок 3 – **Схема магнитного сепаратора I**

барабаном в зону отсутствия или значительного ослабления магнитного поля, где отделяются от поверхности барабана, а немагнитные частицы остаются на движущейся ленте транспортера и переносятся ею в приемник для немагнитной фракции.

В другом предложенном способе разделение частиц по магнитным свойствам производится с помощью пневмо-магнитной сепарации [13,14], когда предварительно тонкоизмельченный материал разрыхляется и рассыпается на отдельные частицы в устройстве для создания пылевоздушной смеси и магнитная сепарация частиц производится из пылевоздушной смеси, которая с постоянной скоростью вдувается в неоднородное магнитной поле, движется там по траектории, задаваемой специальным отражателем, который обеспечивает движение пылевоздушной смеси в зоне сепарации с противоположным действием центробежной и магнитной сил. Частицы, имеющие величину магнитной восприимчивости выше некоторого значения, извлекаются из общего потока в магнитный продукт, а пустая пылевоздушная смесь удаляется из зоны сепарации.

Схема действия сил на частицу в пневмо-магнитном сепараторе представлена на *рисунке 2*. Здесь немагнитный барабан *2* сепаратора радиусом Rб окружен отражателем цилиндрической формы *3* радиусом Rэ.

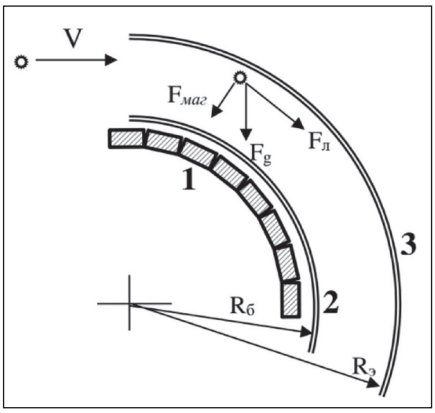

Рисунок 4 – **Схема сепарации сепаратора II и сил, действующих на частицу магнетита в зоне сепарации: 1 – магнитная система; 2 – вращающийся немагнитный барабан; 3 – отражатель**

Оба разработанных и изготовленных для магнитной сепарации прибора были применены для выделения мелких частиц магнетита из мелких классов хвостов, выделенных с помощью воздушной классификации. Выход концентрата с содержанием 53% Fe составил 1,6%.

Проведено исследование по извлечению магнетита из всех хвостов, подвергшимся измельчению до размера -0,125 мм. Оказалось, что такая операция не дает увеличения выхода концентрата с содержанием железа более 52% и является следствием того, что измельчение хвостов с общим содержанием железа менее 10% до класса -0,125 мм не дает нужного раскрытия магнетита. Требуется очень тонкий помол.

Переработка фосфорного шлама. В Республике Казахстан имеются огромные запасы фосфоритовых руд, сосредоточенных главным образом в недрах бассейна Каратау. Фосфорная промышленность является перспективной отраслью химической промышленности. Но ее развитие несет и отрицательные черты в виде образующихся многотоннажных отходов после химико-металлургического передела. Среди них фосфорный шлам является наиболее агрессивным. Его образование имеет следующую природу.

Процесс производства желтого фосфора заключается в его восстановлении из фосфорита $Ca_3(PO_4)_2$ углеродом кокса при температуре 1400-1600° С в присутствии SiO_2. Происходит возгонка. Печные газы из паров фосфора и газообразных соединений основных и побочных реакций содержат также 0.005-0.120 кГ/м^3 полудисперсной пыли. Возгоны и пыль шихты проходят через электрофильтры и направляются на конденсацию. Задача электрофильтров пропустить возгоны и убрать пыль. Однако полностью удалить пыль из печного газа не удается. В процессе конденсации фосфора происходит также конденсация прошедшей пыли и других продуктов возгонки, часть из которых оседает на частицах фосфора. В итоге поверхность некоторых капель фосфора окутывается “шубой” из смеси пыли и других продуктов, связываемых с фосфором абсорбционными силами сцепления в мицеллы. Образуется фосфорный шлам.

Фосфорный шлам – это трудно разрушаемая, стабилизированная высокоактивными загрязнениями эмульсия переменного состава. При нарушении режимов технологии объемы его образования могут быть значительными. Фосфорный шлам имеет высокую концентрацию фосфора и возгорается на воздухе. Поэтому содержится в специальных бассейнах-отстойниках под слоем воды, представляя серьезную экологическую опасность для окружающей среды. По этой причине утилизации шламов придается большое значение. Фосфорные шламы условно можно разделить на «бедные» и «богатые». Граница их разделения проходит по содержанию 35% желтого фосфора в пересчете на сухое вещество. Их переработка заключается в извлечении фосфора и является весьма трудоемкой операцией. Апробированы и широко применяются два метода [15]: отгонка фосфора с водяным паром (способ дистилляции) и непосредственное сжигание шлама в специальных печах с получением шламовой ортофосфорной кислоты. Но указанные подходы имеют общий недостаток – используют богатые шламы с содержанием фосфора не менее 70%. Поэтому в производство идет только небольшая часть образующегося шлама, а остальная остается в отстойниках. Такое состояние вопроса стимулирует приведе-

ние научно-исследовательских работ по нахождению новых технологий извлечения фосфора из фосфорного шлама.

Для достижения этой цели необходимо разрушить минералогическую оболочку мицелл. Тогда освобожденный фосфор из-за более высокой плотности оседает на дно. Происходит расслоение исходной среды.

В настоящей работе рассматриваются две разработанные [16,17] технологии получения фосфора из фосфорного шлама. Остановимся на первой из них, которая заключается в химическом разрушении оболочки мицелл. В этом случае фосфорный шлам подвергается обработке каустической содой в присутствии карбоната натрия и порошкообразного кремния соответственно в количествах 0,05-0,09% и 0,01-0,09% от массы шлама при pH водной суспензии 7,5-9,0. Для снижения расхода каустической соды и сохранения активности кремния его предварительно вымачивают в карбонате натрия, что влечет за собой понижение pH среды для образования атомарного водорода в результате реакции:

$$Si + 2NaOH \rightarrow Na_2SiO_3 + H\uparrow . \qquad (4)$$

Выделившийся автоматный водород разрушает минералогическую оболочку фосфорного шлама

Например [16], если в реактор замкнутого типа засыпать 0,5 г карбоната натрия, 0,5 г кремния, залить 1000 мл 40% фосфорного шлама и после некоторой выдержки добавить NaOH до получения pH=7,5-8,5, то происходит бурное выделение атомарного водорода Результаты экспериментов представлены в *таблице 2*.

Таблица 2 – **Результаты экспериментов по химической переработке фосфорных шламов**

pH	Na_2CO_3	Si, %	Степень извлечения фосфора, %
7,5	0,05	0,01	98,4
7,0	0,05	0,01	80,2
8,0	0,05	0,01	99,2
8,5	0,05	0,01	98,2
7,5	0,09	0,01	99,4
?,5	0,10	0,01	99,4
7,5	0,02	0,01	86
7,5	0,05	0,09	98,8
7,5	0,05	0,008	96,2
7,5	0,05	0,1	98,2

Подобные успешные опыты были проведены со шламами с содержанием фосфора 10-90%.

Во второй предлагаемой технологии [17] процесс разрушения оболочки мицелл происходит за счет физического воздействия, которое создается упругими акустическими колебаниями звуковых и ультразвуковых частот (0,5-100кГц) интенсивностью не менее 0,01 Вт/см^2. При температуре фосфорсодержащего шлама более 45° С достигается степень извлечения фосфора 98%.

Упругие колебания звуковых и ультразвуковых частот приводят к возникновению акустической кавитации, а именно, образованию в фосфорсодержащем шламе

большого количества маленьких газовых полостей. В последующем схлопывающие кавитационные газовые полости представляют собой микроисточники мощных ударных волн давления, которые механически разрушают пылевой слой фосфорных мицелл. Исходно пылевой слой фосфорных мицелл в фосфорсодержащем шламе насыщен воздухом и поэтому является «зародышем» или центром образования кавитационных газовых полостей. Происходит автоматическая пространственная «привязка» источника излучения ударных волн к объекту их воздействия и потому такое воздействие становится особенно эффективным. Интенсивность звука – среднее значение плотности потока энергии через единицу поверхности должна быть больше некоторого порогового значения – минимального значения интенсивности звука, при котором происходит образование кавитационных газовых полостей. Пороговое значение интенсивности звука для возникновения кавитации зависит от частоты упругих акустических колебаний, температуры, свойств облучаемой жидкости, её насыщенностью газом, содержанием твердых примесей и пр. С увеличение интенсивности звука возрастает скорость извлечения фосфора из фосфорсодержащего шлама.

Для создания акустической кавитации необходима жидкая среда. Фосфорсодержащие шламы имеют температуру плавления выше 45° С, высокую вязкость, уменьшающуюся с ростом температуры. Поэтому нижний температурный предел фосфорсодержащего шлама при акустической обработке составляет температуру более 45° С.

Были проведены эксперименты по ультразвуковому воздействию на фосфорный шлам [9]. В ванну заливался шлам, предварительно нагретый до температуры 45-50° С, где поддерживался при этой температуре. При этом шлам растекался по дну ванны тонким слоем, толщиной менее 1 см. Генератор с частотой 5 кГц создавал поток мощности излучения Е=0,1 Вт/см^2. Тонкий слой шлама позволяет считать, что весь шлам однородно облучается ультразвуковым потоком. Через некоторое время после выключения генератора и 5 минутного отстаивания происходило окончательное расслаивание системы. Производилось измерение количества выделившегося слоя фосфора.

Эксперименты повторялись с различным временем воздействия ультразвукового поля на шлам и различным содержанием фосфора при времени обработки 5 мин. Результаты приведены в *таблице 3* и *4*.

Таблица 3 – **Параметры ультразвукового воздействия на фосфорный шлам содержанием фосфора 40%**

Время обработки t , мин	Поток энергии W=E*t, Вт-час/см^2	Выход фосфора, %
3	0,005	72%
5	0,0084	98%
10	0,017	98%

Таблица 4 – **Результаты экспериментов по ультразвуковой переработке фосфорного шлама**

Содержание фосфора в шламе, %	Выход фосфора, %
60%	98%
45%	97%
30%	98%
20%	98%

Выше представлены две эффективные технологии переработки бедных и богатых фосфорных шламов. На практике возможна их различная комбинация.

ВЫВОДЫ. Горные предприятия, производящие миллионы тонн продукции, работают на освоенных технологических схемах, заняты текущими производственными проблемами и не проявляют интерес к отвлечению материальных, финансовых и интеллектуальных ресурсов на решение сложных задач по утилизации отходов, т.к. это приводит лишь к незначительному увеличение продукции к уже сбываемой. Экономический и интеллектуальный интерес к данной проблемы могут проявить небольшие творческие коллективы. Целесообразность и окупаемость такой деятельности обосновываются тем, что затраты на сырье, в данном случае отходы основного производства, относятся на себестоимость реализуемой продукции и условия толлинговых схем могут быть весьма выгодными.

Результаты получены при выполнении проекта ИРН AP08855664 «Разработка безотходной технологии переработки железосодержащего сырья с финальной гетерофазной металлизацией», выполняемого в рамках грантового финансирования научных исследований 2020-2022 годы из государственного бюджета Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1 Шишакина О.А., Паламарчук А.А. Обзор направлений утилизации техногенных отходов в производстве строительных материалов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 4. – С. 198-203. [Shishakina O.A., Palamarchuk A.A. Obzor napravleniy utilizatsii tekhnogennykh otkhodov v proizvodstve stroitel'nykh materialov // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. – 2019. – № 4. – S. 198-203]

2 Гончарова М.А., Копейкин А.В., Крохотин В.В. Оптимизация методики определения минералогического состава конвертерных шлаков // Строительные материалы – 2015. - № 1. – С. 64-67. [Goncharova M.A., Kopeykin A.V., Krokhotin V.V. Optimizatsiya metodiki opredeleniya mineralogicheskogo sostava konverternykh shlakov // Stroitel'nyye materialy – 2015. - № 1. – S. 64-67.]

3 Липина А.В. Исследование инновационных технологических методов утилизции серосодержащих отходов и технической серы // Успехи современной науки и образования. – 2016. -№2. – С.73-76. [Lipina A.V. Issledovaniye innovatsionnykh tekhnologicheskikh metodov utiliztsii serosoderzhashchikh otkhodov i tekhnicheskoy sery // Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya. – 2016. -№2. – S.73-76.]

4 Е.П. Волынкина Состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2017. - №2(20). -С. 43-49. [Ye.P. Volynkina Sostoyaniya i problem pererabotki tekhnogennykh otkhodov v Rossii // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. – 2017. - №2(20). -S. 43-49.]

5 Нефедова И.Н., Лотов В.А., Крашенинникова Н.С. Техногенные отходы как дополнительный источник сырья // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 4. – С. 148-149. [Nefedova I.N., Lotov V.A., Krasheninnikova N.S. Tekhnogennyye otkhody kak dopolnitel'nyy istochnik syr'ya // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. – 2004. – № 4. – S. 148-149.]

6 Бортников А.В., Самуков А.Д., Шулояков А.Д., Баранов В.Ф. Экономикоматематическое моделирование технологии рециклинга отходов переработки горных пород путем производства минеральной ваты // Обогащение руд. - 2015. - № 6 (360). - С. 35- 40. [Bortnikov A.V., Samukov A.D., Shuloyakov A.D., Baranov V.F. Ekonomikomatematicheskoye modelirovaniye tekhnologii retsiklinga otkhodov pererabotki gornykh porod putem proizvodstva mineral'noy vaty // Obogashcheniye rud. - 2015. - № 6 (360). - S. 35- 40]

7 Дюбанов В.Г., Грудинский П.И., Зиновеев Д.В., Корнеев В.П. Перспективные методы рециклинга железосодержащих техногенных отходов металлургической промышленности // Проблемы черной металлургии и материаловедения. - 2016. - № 1. - С.35-40. [Dyubanov V.G., Grudinskiy P.I., Zinoveyev D.V., Korneyev V.P. Perspektivnyye metody retsiklinga zhelezosoderzhashchikh tekhnogennykh otkhodov metallurgicheskoy promyshlennosti // Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya. - 2016. - № 1. - S.35-40]

8 Калиниченко В.П., Лазуренко В.Н., Ляхов В.П., Старцев В.Ф. Биогеосистемотехника как технологическая платформа рециклинга отходов в биосфере // Stredoevropsky Vestnik pro Vedu a Vyzkum. - 2015. - Т.65. - С.9. [Kalinichenko V.P., Lazurenko V.N., Lyakhov V.P., Startsev V.F. Biogeosistemotekhnika kak tekhnologicheskaya platforma retsiklinga otkhodov v biosfere // Stredoevropsky Vestnik pro Vedu a Vyzkum. - 2015. - T. 65. - S. 9]

9 В. Б. Пономарев. Расчет и проектирование оборудования для воздушной сепарации сыпучих материалов: учеб. пособие — Екатеринбург :Урал. ун-та, 2017. — 96 с. [V. B. Ponomarev. Raschet i proyektirovaniye oborudovaniya dlya vozdushnoy separatsii sypuchikh materialov: ucheb. posobiye — Yekaterinburg :Ural. un-ta, 2017. — 96 s.]

10 В. Б. Пономарев Сухая переработка отходов камнедробления // Горн. журн. — 2015. — № 12. С. 50 – 52. [V.B. Ponomarev Sukhaya pererabotka otkhodov kamnedrobleniya // Gorn. zhurn. — 2015. — № 12. S. 50 – 52.]

11 Евразийский патент №025638. Устройство и способ магнитной сепарации / Чокин К.Ш., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А., Югай В.Д. Опубл.30.01.2017. Бюл.№1. [Yevraziyskiy patent №025638. Ustroystvo i sposob magnitnoy separatsii / Chokin K.SH., Yedil'bayev A.I., Yedil'bayev B.A., Yugay V.D. Opubl.30.01.2017. Byul.№1.]

12 Kanat Sh. Chokin, Abdraman I. Yedilbayev, Baimurat A. Yedilbayev, Vladimir D. Yugay. Dry magnetic separation of magnetite ores // Periodico Tche Quimica. – 2020. – V.17. – P.700-710.

13 Евразийский патент №016328. Способ магнитной сепарации и устройство его осуществления / Чокин К.Ш., Едильбаев А.И., Югай В.Д. Опубл.30.04.2012г. Бюл.№04. [Yevraziyskiy patent №016328. Sposob magnitnoy separatsii i ustroystvo yego osushchestvleniya / Chokin K.SH., Yedil'bayev A.I., Yugay V.D. Opubl.30.04.2012g. Byul.№04]

14 К.Ш.Чокин, А.И.Едильбаев, Б.А.Едильбаев, В.Д.Югай Использование пневмомагитной сепарации при обогащении магнетитовых руд // Обогащение руд, -2020. - №2 - С.33-40. [K.SH.Chokin, A.I.Yedil'bayev, B.A.Yedil'bayev, V.D.Yugay Ispol'zovaniye pnevmomagitnoy separatsii pri obogashchenii magnetitovykh rud // Obogashcheniye rud, -2020. - №2 - S.33-40.]

15 В.А.Ершов, Б.Н.Белов. Технология фосфора. - Л. : Химия, 1979 -336 с. [V.A. Ershov, B.N. Belov. Technologiya phosphora. – L.: Himiya, 1979 – 336 s.]

16 Предпатент №8628 РК. Способ переработки фосфорного шлама / Б.А Бекетов., М.Ф. Тамендаров, Б.Н. Мукашев., К.Ш. Чокин. Опубл. 28.04.1999 [Predpatent №8628 RK. Sposob pererabotki fosfornogo shlama / B.A Beketov., M.F.Tamendarov, B.N.Mukashev., K.SH.Chokin. Opubl.28.04.1999]

17 Предпатент №26008 РК. Способ извлечения фосфора фосфорсодержащих шламов /М.Ф. Тамендаров, К.Ш. Чокин. Опубл. 25.01.2000 [Predpatent №26008 RK. Sposob izvlecheniya fosfora fosforsoderzhashchikh shlamov /M.F. Tamendarov, K.SH. Chokin. Opubl. 25.01.2000].