

Д. т. н. **Н. Г. Валиев**, д. т. н. **В. К. Багазеев**, д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉),
д. х. н. **Р. А. Апакашев**, **И. С. Бойков**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, Россия

УДК 553.623:666.76.001.8

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ РУДНЫЕ МИНЕРАЛЫ — СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

Дана характеристика нового месторождения циркон-рутил-ильменитовых песков Центральное в Рассказовском районе Тамбовской обл., не требующих операций дробления и применения химических реагентов для обогащения. Приведены классы крупности для циркона, рутила, ильменита. Рассмотрено количественное распределение рудных минералов в рудных песках месторождения Центральное по крупности. Дано определение предельно допустимого содержания взвешенных веществ в воде водоема при смешивании со сбрасываемой водой. Предложена конструкция диафрагменного сгустителя, обеспечивающего как сгущение, так и изменение гранулометрического состава твердой фракции.

Ключевые слова: циркон-рутил-ильменитовые пески, огнеупорные материалы, классы крупности, пульпа, сгуститель.

Месторождение циркон-рутил-ильменитовых песков Центральное в Рассказовском районе Тамбовской обл. относится к крупнейшим мировым россыпным месторождениям с запасами 1,6 млрд т рудных песков. По заказу горнопромышленной компании «Титан» на месторождении проведены опытно-промышленные испытания для разработки технического проекта новой опытной обогатительной фабрики (<https://tass.ru/ekonomika/6872425>). Получение промышленного концентрата планируется обеспечить за счет механического обогащения, концентрат не требует операций дробления и применения химических реагентов. (<https://moluch.ru/archive/292/66268/>).

Более 50 % всего циркона используется в керамической промышленности благодаря его способности придавать непрозрачность (белизну и яркость) и блеск таким изделиям, как плитка, керамическая сантехника и глиняная посуда. Циркон — прочный и твердый материал, который сохраняет физический и химический составы под влиянием высоких температур и агрессивных сред. Это очень хороший плавильный и огнеупорный материал, используемый для изготовления огнеупорных изделий, особенно для сталеплавильных и стекловаренных печей. Используется также как формовочный

песок для специализированного литья по выплавляемым моделям или высокоточного литья.

В природном виде циркон содержит 56–57 % ZrO_2 и 32–35 % SiO_2 . В его состав входят такие примеси, как Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 и др. При производстве огнеупоров исходный циркониевый концентрат предварительно спекают при 1600 °С и обрабатывают соляной кислотой для удаления примесей. Изделия изготавливают только на органической связке (клею), без примесей стабилизирующих веществ. После прессования изделия спекают при 1550 °С. Огнеупорность готовых изделий 1900–2000 °С.

Разработка и обогащение россыпей обычно включают следующие технологические процессы: разрушение связности и добычу рудных песков, транспортировку их на фабрику, дезинтеграцию (дробление), промывку, грохочение (отсев крупной гальки, обычно >3 мм), обесшламливание (отмыв глинистых частиц <0,05 мм), гравитационное обогащение отмытой зернистой массы на высокопроизводительных гравитационных аппаратах (конусные, винтовые сепараторы, шлюзы и т. п.), магнитную и электрическую сепарацию тяжелых концентратов. Первую стадию обогащения, включающую дезинтеграцию, обесшламливание, гравитацию, называют первичным обогащением россыпей, вторую стадию (электромагнитная, электрическая сепарация, иногда флотация) — доводкой черновых концентратов.

В результате первичного обогащения сбрасывают до 70–90 % порообразующих («пустых») минералов плотностью менее 2,9 г/см³ (глину, кварц и полевые шпаты). Тяжелые минералы плотностью более 2,9 г/см³ (ильменит,



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

рутил, циркон и др.) концентрируются почти по 90–95 % в коллективном черновом концентрате. Далее этот концентрат доводочными операциями с применением разных методов сепарации разделяется на мономинеральные селективные концентраты ильменита, рутила, циркона и др.

Рассматриваемые россыпи представлены кварцевыми песками, почти не связанными глиной и содержащими до 25–30 % (в среднем 12 %) тяжелых минералов. В составе тяжелой фракции 28–60 % ильменита, 5–14 % рутила, 7–60 % циркона и др. (рис. 1).

Все рудные минералы в основном концентрируются в двух классах крупности (см. таблицу); несколько более мелкий размер имеет циркон (см. рис. 1, в). (<http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2018/04/2018-04-06.pdf>).

Современная технология разделения коллективного титан-циркониевого концентрата предусматривает сочетание магнитной и электростатической сепарации. Эффективное разделение минералов этими методами, особенно электростатическим, достигается при крупности зерен 0,1–2 мм [1] (рис. 2). Для минералов крупностью менее 0,1 мм данные технологии не позволяют проводить эффективную переработку с извлечением редких и редкоземельных элементов из-за размеров частиц исходного сырья.

При небольшой дальности гидротранспортирования заиливание трубопровода не превышает 10 % его диаметра. Опыты показали, что при гидротранспорте одноразмерных песков расслоения по крупности практически не про-

исходит, не происходит и существенного сгущения пульпы. Наблюдается концентрация тяжелых частиц в придонной части потока, а сгуститель предназначен в основном для разделения потока на верхнюю и нижнюю (придонную) части. Таким образом, сгуститель по конструкции является технологическим приспособлением для выделения придонной части потока [2–5].

Расслоение частиц по плотности является предпосылкой попутной концентрации частиц тяжелых минералов. В опытной установке [4] разделение потоков рассматривалось на горизонтальных участках пульповода небольшой длины непосредственно перед намывом нижней части пульпы в отдельный штабель. Верхнюю часть в зависимости от содержания полезного минерала направляли на дальнейшую переработку (в штабель резерва) или в гидроотвал.

В сбрасываемой в водоем осветленной воде присутствует некоторое количество пылевидных и глинистых частиц грунта. Предельно допустимое содержание взвешенных веществ в водоеме регламентировано [6]. Предельно допустимое содержание взвешенных веществ в водоеме C_{ex} , мг/л, при смешивании со сбрасы-

Классы крупности рудных материалов

Минерал	Размер частиц, мм	Плотность, г/см ³	Содержание TiO ₂ , %
Ильменит	0,15–0,05	3,8–4,2	61,4
Рутил	0,12–0,04	3,8–4,2	96,5
Циркон	0,15–0,02	4,7	65,6



Рис. 1. Минералы тяжелой фракции месторождения Центральное: а — ильменит; б — рутил; в — циркониевый концентрат

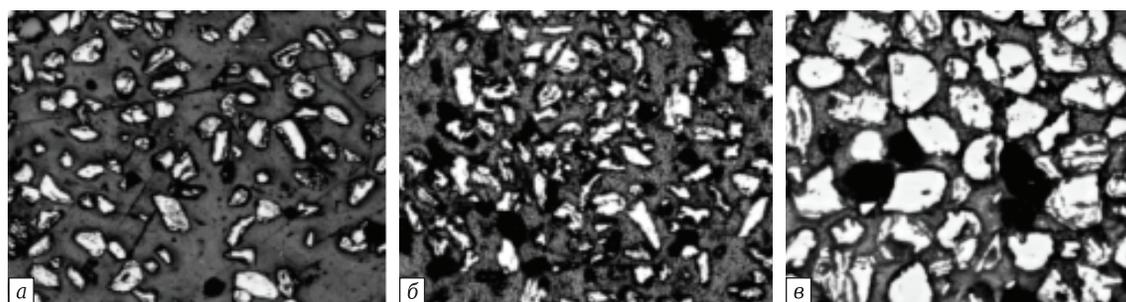


Рис. 2. Распределение рудных минералов в рудных песках месторождения Центральное по крупности: а — ильменит; б — рутил; в — циркон [1]

ваемой водой определяется по формуле (<https://docs.cntd.ru/document/553865857>)

$$C_{\text{ex}} = C_{1\text{lim}}(aQ/q + 1) + C_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где $C_{1\text{lim}}$ — допустимое по нормам увеличение концентрации взвешенных веществ в воде после спуска в водоем сбросной воды для водоемов, предназначенных для купания, спорта и отдыха, $C_{1\text{lim}} = 0,75$ мг/л; a — коэффициент смешения, определяется по данным (<https://docs.cntd.ru/document/553865857>); Q — расход воды водоема у места выпуска сбросной воды, $\text{м}^3/\text{с}$; q — средний расход сбросной воды, выпускаемой в водоем, $\text{м}^3/\text{с}$; $C_{\text{ф}}$ — содержание взвешенных веществ (фоновое) в воде водоема, мг/л.

В данном случае происходит максимальное расслоение тяжелых крупных и легких мелких частиц. Это свойство используется в гидромеханизации для сгущения пульпы в горизонтальных сгустителях. С учетом патента 1587114 «Разводящий пульпопровод» [5] и информации [2, 3] на рис. 3 показана схема сгустителя для отделения части воды и мелких частиц от полезной массы пульпы с использованием диафрагмы 4, установленной на границе раздела верхнего и нижнего потока гидросмеси.

Диафрагменный сгуститель представляет собой устройство, позволяющее делить поток гидросмеси наклонной плоскостью — диафрагмой 4, регулируемой относительно горизонтальной оси 5. Сгущение потока гидросмеси горизонтальным делением на верхнюю 2 (осветленную) и нижнюю 3 (сгущенную) части основано на том, что в нижней части потоков перемещается наибольшее количество твердого материала. При транспортировании материала, разнородного по крупности или удельному весу, в нижних слоях потока оказываются более крупные частицы и частицы с большим удельным весом. Таким образом, в диафрагменном сгустителе при делении потока происходит не только сгущение гидросмеси, но и изменение гранулометрического состава твердой фракции; как правило, с потоком осветленной воды уносятся наиболее мелкие твердые частицы.

В нашем случае плоские частицы при малых скоростях стремятся двигаться волочением по дну потока. При нахождении в потоке твердых округленных частиц одинаковых геометрических размеров окатанные частицы раньше выйдут из состояния покоя и начнут двигаться при меньшей средней скорости потока, поскольку трение качения меньше трения скольжения. Скорость перемещения окатанных частиц по дну потока будет выше, чем пластинчатых. Круглые частицы перескакивают через плоские, и скачкообразное движение круглых частиц наступает быстрее. Одинаковые по форме, но разные по размеру твердые частицы движутся с разной скоростью.

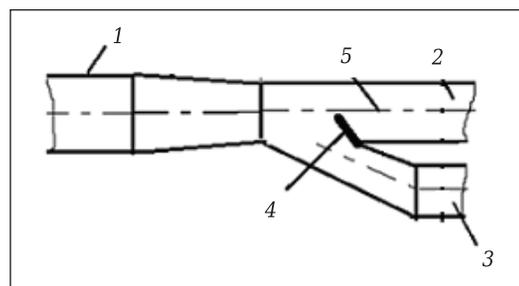


Рис. 3. Схема пульпопровода земснаряда горизонтального типа: 1 — пульпопровод от земснаряда; 2 — осветленная пульпа; 3 — сгущенная пульпа; 4 — диафрагма; 5 — горизонтальная ось

Для оценки попутной концентрации тяжелых минералов в нижнем потоке в настоящем исследовании принимаются следующие положения:

- процесс образования придонного слоя тяжелых минералов рассматривается не как процесс осаждения взвешенных частиц в потоке пульпы, а как процесс сдвижения, волочения и перекачивания частиц образовавшегося в трубопроводе осадка;

- разделение частиц в поперечном сечении потока аналогично распределению частиц по крупности по формуле Розина – Раммлера [7–10]:

$$R_i = 100 \cdot \exp \left[- \left(\frac{d_i}{d_e} \right)^b \right], \quad (2)$$

где R_i — суммарный выход частиц «+», %; d_i — крупность частиц, мм; d_e — крупность частиц, соответствующая выходу $R = 63,2$ %; b — параметр распределения частиц по крупности.

Для исследования выполнено преобразование формулы (2) к виду [4]:

$$r = \exp \left[- 3 \left(\frac{d_i}{d_n} \right)^b \right], \quad (3)$$

где r — суммарный выход частиц «+», доли ед.; d_n — номинальная крупность частиц, мм, соответствующая выходу $R = 5$ %; $b = 0,94(\lg K_n)^{-1}$; K_n — коэффициент неоднородности песков по крупности [9].

Основная часть тяжелых полезных минералов и равнораспределенных частиц песка составляет придонный слой потока. Остальные, меньшей крупности, чем равнораспределенные, и взвешиваемые из придонного слоя тяжелые частицы, выносятся верхним потоком. Дополнительное взвешивание тяжелых частиц происходит при прохождении непосредственно через ответвление, которое является местным гидравлическим сопротивлением.

При прохождении как в прямооточной части, так и в ответвлении трубопровода возникают потери энергии потока (напора). В зависимости от соотношения расходов при разделении потока разница потерь энергии достигает 20–30 %

[11, 12]. Это соотношение, по мнению авторов настоящей статьи, распространяется и на величину концентрации тяжелых частиц между верхним и нижним трубопроводами.

Большинство редкометалльных россыпей представлено практически однородным тонкозернистым материалом крупностью менее 1 мм с удельным сцеплением 7–10 кПа и углом внутреннего трения около 35°. Такие грунты по трудности разработки методами гидромеханизации относятся к первой категории с удельным расходом воды при разработке гидромониторами 4,5 м³/м³, землесосными снарядами 6,5 м³/м³ [13].

Критическая скорость движения пульпы $V_{кр}$, м/с, по пульпопроводу определяется по следующей формуле (<https://docs.cntd.ru/document/553865857>):

$$V_{кр} = 8,3(D)^{1/3}(C_0\psi_{ср})^{1/6}, \quad (4)$$

где D — диаметр пульпопровода для гидравлического транспортирования пульпы без заиливания, м; C_0 — действительная объемная консистенция пульпы, определяемая по формуле

$$C_0 = (\rho_{см} - \rho_в)/(\rho_т - \rho_в), \quad (5)$$

где $\rho_{см}$ — действительная плотность пульпы, кг/м³; $\rho_т$ и $\rho_в$ — плотность частиц взвеси и воды соответственно, кг/м³; $\psi_{ср}$ — коэффициент гидравлической крупности частиц. Значения коэффициента $\psi_{ср}$ приведены ниже:

Фракция грунта, мм.....	0,05–0,10	0,10–0,25
$\psi_{ср}$	0,02	0,20

Диаметр пульпопровода D , м, в котором поток пульпы движется в режиме скоростей, близких к критическим, следует определять по формуле (<https://docs.cntd.ru/document/553865857>)

$$D = 2\sqrt{\frac{Q_{в.пасп}}{\pi V_{кр}}}, \quad (6)$$

где $Q_{в.пасп}$ — паспортный расход по воде грунтового насоса, м³/ч.

На основе анализа закономерностей гидротранспорта пульпы, гранулометрического распределения песков и результатов физического моделирования процесса в лабораторных условиях проводили аналитическое обоснование параметров попутной концентрации тяжелых минералов. Основные положения оценки попутной концентрации: при гидротранспорте песков в трубопроводе образуется придонный слой крупных и тяжелых частиц, перемещающихся волочением и перекачиванием. При этом распределение частиц по крупности и плотности в поперечном сечении потока пульпы соответствует формуле Розина – Раммлера (уравнение (2)).

Глинистое сырье из продуктивного слоя, выделяемое при обогащении, представляет собой огнеупорное и тугоплавкое среднедисперсное сырье каолинового состава. Это сырье после дополнительной обработки глины может быть использовано для производства строительной керамики. Кварцевые пески продуктивного слоя в основной своей массе являются мелкозернистыми, с зернами преимущественно остроугольной осколочной, реже полукруглой формы, представлены кварцевым материалом с некоторой примесью полевых шпатов и слюды (<http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2018/04/2018-04-06.pdf>).

При проведении дополнительной обработки исследуемый кварцевый концентрат может быть рекомендован для производства полубелого стекла, изоляторов, труб, стекловаты, облицовочных плиток, черепицы, силикатного кирпича. При дополнительной обработке методами электромагнитной сепарации и флотации пески могут быть использованы для производства листового оконного стекла. На основе кварцевых песков возможна также организация производства жидкого силикатного стекла, весьма перспективного и дефицитного материала. Оно способно заменить цемент, так как стоит дешевле, его производство не создает экологических проблем, оно гораздо долговечнее. Жидкое стекло



Рис. 4. Готовая продукция, получаемая при комплексном использовании песков цирконильменитовых месторождений: 1 — гранулированное пеностекло; 2 — пеностекло; 3 — пенобетон; 4 — СВС-фильтры; 5 — пропант (гранулированный каолинит); 6 — акриловая краска

можно впрыскивать в грунт и получать крепкие фундаменты быстрее и с меньшими затратами. С наполнителями оно без обжига образует строительные блоки. В перспективе из жидкого стекла можно будет получать обычное оконное стекло.

В мире основная масса циркониевых концентратов используется в натуральном виде и только 10–15 % перерабатывается для получения соединений циркония, металлов и сплавов. Основными потребителями циркониевого концентрата в натуральном виде как неметаллического сырья являются производства керамики и глазури,

огнеупоров для металлургической и стекловаренной промышленности, литейного дела.

При комплексной переработке руд цирконий-ильменитовых месторождений получают такие полуфабрикаты, как гидроксиды железа, редких земель, тория, урана; металлургическую смесь фторидов редких земель; тетрафторид циркония; титановый пигмент и др. (<http://earchive.tru.ru/>). Кроме того, можно производить готовую продукцию: пропант — гранулированный каолинит, пеностекло, пенобетон, СВС-фильтры из ильменита, акриловую краску, которая в данный момент широко используется (рис. 4).

Библиографический список

1. **Левченко, Е. Н.** Научно-методическое обоснование минерало-технологической оценки редкометалльно-титановых россыпей : автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук, 2011. — 40 с. (<http://vims-geo.ru/documents/41/Levchenko.pdf>).
2. **Бессонов, Е. А.** Технология и гидромеханизация гидромеханизированных работ : справ. пособие для инженеров и техников / Е. А. Бессонов. — М. : Центр, 1999. — 544 с.
3. **Журин, В. Д.** Оборудование гидромеханизации / В. Д. Журин, А. П. Юфин. — М. : Госстройиздат, 1960. — 300 с.
4. **Багазеев, В. К.** Оценка попутной концентрации тяжелых минералов при гидротранспорте пульпы в трубопроводе / В. К. Багазеев, И. С. Бойков, Н. Г. Валиев, И. Л. Здоровец // Изв. вузов. Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 25–33.
5. **Пат. 1587114 SU.** Разводящий пульпопровод / Рошупкин Д. В. — № 4446385 ; заявл. 21.06.1988 ; опубл. 23.08.1990, Бюл. № 31.
6. **СанПиН 2.1.5.980-00. 2.1.5.** Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы (<https://legalacts.ru/doc/sanpin-215980-00-215-vodootvedenie-naselennykh-mest-sanitarnaja/>).
7. **Петропавловская, В. Е.** Гранулометрический состав как критерий регулирования свойств дисперсных систем / В. Е. Петропавловская, Т. Б. Новиченкова,

В. В. Белов, А. Ф. Бурьяков // Строительные материалы. — 2013. — № 1. — С. 64, 65.

8. **Zvereva, N. A.** Internal structure of a powder during of its compacting. In: 14 International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA / N. A. Zvereva, V. A. Valtsifer. — Praha (Czech Republic), 2000. — P. 63.

9. **Багазеев, В. К.** Гидромеханизация: разработка песчано-гравийных месторождений землесосными снарядами / В. К. Багазеев, Н. Г. Валиев. — Екатеринбург : УГГУ, 2006. — 152 с.

10. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов : исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.

11. **Филиппов, В. В.** Технологические трубопроводы и трубопроводная арматура / В. В. Филиппов. — Самара : СГТУ, 2007. — 70 с.

12. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. — М. : Машиностроение, 1992. — 560 с.

13. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник Е2. Земляные работы. Вып. 2. Гидромеханизированные земляные работы (<https://files.stroyinf.ru/Data1/2/2550/index.htm>). ■

Получено 14.06.21

© Н. Г. Валиев, В. К. Багазеев, С. Я. Давыдов, Р. А. Апкашев, И. С. Бойков, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ИССМС 2022 — МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КЕРАМИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛАМ И КОМПОНЕНТАМ

7–8 февраля 2022 г. Амстердам, Нидерланды

