

Оценка технической возможности и экономической эффективности гидротранспортирования измельченного промпродукта применительно к разработке перспективных месторождений КМА

Терехин Е. П.^{1*}, Казанцев А. А.¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (филиал), г. Губкин
Белгородской обл., Россия

*e-mail: teryekhin50@mail.ru

Реферат

Введение. Большинство железорудных карьеров России и СНГ относятся к разряду глубоких, а перспективные месторождения Курской магнитной аномалии – КМА (Приоскольское, Чернянское, Погромецкое и др.), мощность покрывающих пород которых составляет 100–150 м, и карьеры на их базе уже на стадии начала добычных работ будут глубокими.

Целью работы является обоснование преимуществ гидротранспорта перед другими видами промышленного транспорта с выявлением технической возможности и экономической эффективности новой схемы вскрытия и транспорта перспективных месторождений КМА на уровне предпроектных разработок.

Объектами исследования выбраны Приоскольское и Чернянское месторождения.

Основными методами исследований были приняты графический и графоаналитический, а также технико-экономическое сравнение вариантов. Основу предложения по разработке перспективных месторождений КМА составляет новая компоновка промышленной площадки горно-обогажительного комбината с размещением частей дробильно-измельчительного комплекса внутри карьера и выдачей руды в виде пульпы на поверхность трубопроводным транспортом для последующего обогащения.

Результаты. В целом предпроектное технико-экономическое сравнение по двум перспективным месторождениям КМА говорит о снижении затрат на перемещение руды из карьера до промплощадки при применении гидротранспорта в сравнении с циклично-поточной технологией. Применение новой технологии позволит снизить транспортные затраты в 1,5–2 раза и повысить производительность труда на транспорте руды в 2–3 раза.

Ключевые слова: перспективные месторождения; Курская магнитная аномалия; КМА; вскрытие карьера; гидротранспорт руды; пульпа; дробление; измельчение; обогащение; транспортные затраты.

Введение. Уже в конце 1980 гг. большинство железорудных карьеров Советского Союза, в том числе и Курской магнитной аномалии (КМА), перешагнули 200-метровой рубеж глубины, а в настоящее время приблизились к 500 м и относятся к разряду глубоких.

Как показывают исследования и опыт разработки месторождений полезных ископаемых, с возрастанием глубины открытых горных работ наблюдается тенденция увеличения издержек производства вследствие ухудшения горно-технических условий.

Увеличение глубины карьера особенно заметно сказывается на себестоимости добычи, затраты на транспортирование горной массы перешагнули 50 %-ый

рубеж на большинстве предприятий [1]. За последние десять лет высота подъема горной массы автосамосвалами, а также вторичные перевозки и перегрузки в среднем по карьерам железорудной отрасли возросли в 3,5 раза.

Применение современного горнотранспортного оборудования, даже с повышенной единичной мощностью, не может снизить (или сохранить на одном уровне) себестоимость добычи полезного ископаемого.

При циклично-поточной технологии (ЦПТ) используется комбинированный автомобильно-конвейерный транспорт, сочетающий эффективность мобильности внутрикарьерного автомобильного с низкими удельными эксплуатационными затратами конвейерного. Использование комбинированного транспорта при постоянно меняющейся глубине разработки на карьерах позволяет оптимизировать расстояния транспортирования руды автотранспортом из забоев до дробильно-перегрузочных установок (ДПУ) путем удлинения конвейерных линий на глубину карьеров [2–4].

Анализ отечественного и зарубежного опыта транспортирования железной руды [5–7] показывает, что необходимость применения нескольких видов транспорта диктуется постоянным увеличением глубины карьера и дальности откатки. От правильного выбора зоны применения того или иного вида транспорта зависят конечные технико-экономические показатели разработки месторождения. На железорудных карьерах России и ближнего зарубежья наибольшее распространение получила комбинация автомобильного и железнодорожного транспорта, а в последние годы и на отечественных, и на зарубежных карьерах начали применять автомобильно-конвейерный транспорт.

С другой стороны, самым эффективным для транспортирования угля, руды, вскрышных пород и хвостов обогащения в горнодобывающей промышленности является применение гидротранспорта. Постоянная модернизация гидравлического транспорта, которая шла по линии совершенствования и увеличения мощности оборудования [8], повышения его износоустойчивости, особенно трубопроводов [9], повышения удельного веса транспортируемого материала в пульпе [10], сокращения затрат на обработку грузов после гидротранспорта, сделала его вполне конкурентоспособным традиционным видам перемещения материалов.

В России гидротранспорт железорудного концентрата (ЖРК) от Лебединского ГОКа (ЛГОК) до Оскольского электрометаллургического комбината (ОЭМК) работает с 1982 г. и имеет параметры: пропускная способность пульпопровода – 2,3 млн т в год; протяженность – 26,5 км; диаметр труб – 300 мм; содержание концентрата в пульпе – 50 %. Наибольшая длина отдельных пульпопроводов за рубежом: 770 км (ЮАР), 480 км (Канада), 400 км (Бразилия), 250 км (Германия) и 210 км (США) [11].

По существу данной работы большой интерес представляет опыт комбинации *автосамосвал–гидротранспорт* на железорудном карьере «Сэвидж Ривер» (остров Тасмания) [12], разработка которого была начата в 1969 г. Технология включает в себя погрузку руды экскаваторами и погрузчиками в забое в большегрузные автосамосвалы, которые транспортируют ее к перегрузочному пункту, расположенному на борту карьера, для дробления в конусной дробилке и последующего самоизмельчения на обогатительной фабрике. Затем обогащенная руда транспортируется гидротранспортом на расстояние 85 км по трубам диаметром 244 мм, толщина стенок труб 6,5–12,5 мм. Скорость движения пульпы 1,67 м/с. Содержание твердых частиц достигает 55–60 % (по весу).

В США гидротранспорт измельченных материалов даже в условиях магистрального транспорта является наряду с водными перевозками одним из самых

экономичных способов доставки по сравнению с другими видами транспорта, а по производительности труда – одним из самых высокопроизводительных.

В СССР исследованиями института ВНИИПТМАШ [13, 14] установлено, что при дальности транспортирования от 2 до 200 км массовых сыпучих грузов из всех видов транспорта (железнодорожный, конвейерный, автомобильный и др.) самым экономичным является гидротранспорт.

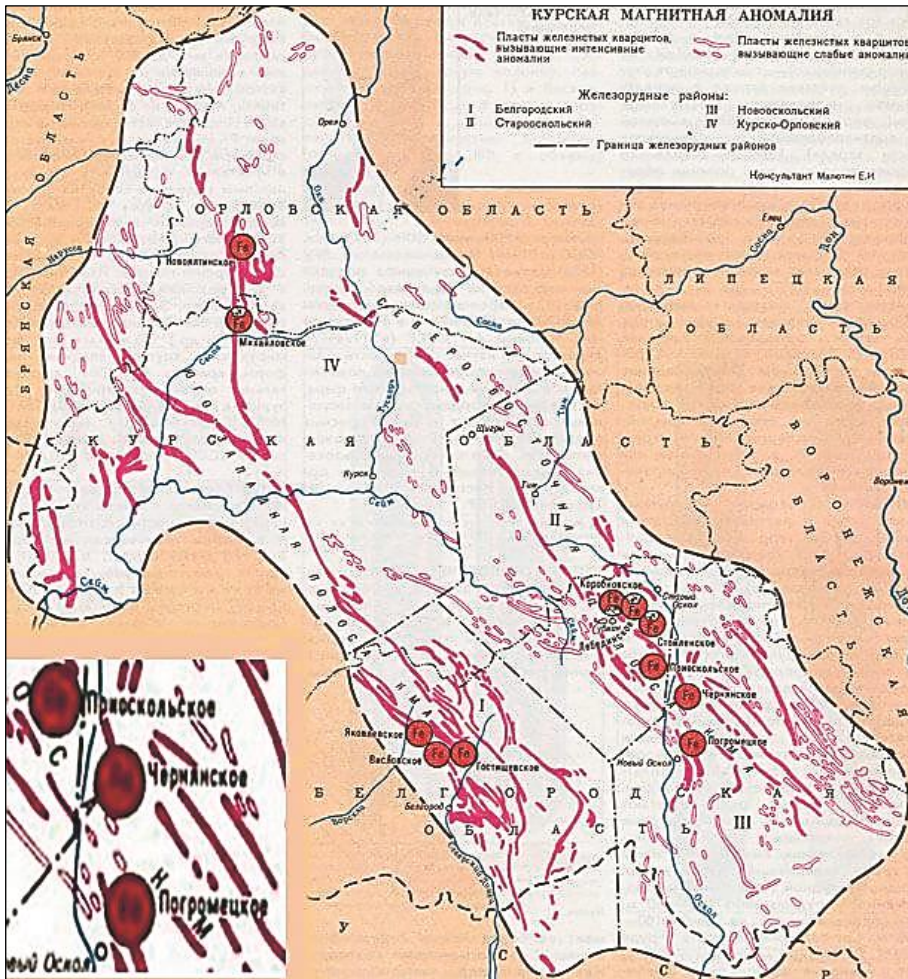


Рисунок 1. Месторождения Курской магнитной аномалии
Figure 1. Kursk Magnetic Anomaly deposits

Помимо указанного, отмечаются следующие преимущества гидротранспорта:

- непрерывность процесса транспортирования и возможность автоматизации;
- отсутствие погрузочно-разгрузочных работ;
- возможность прокладки трубопроводов, заглубленных в землю, что позволяет уменьшить занятие плодородной земли;
- почти полностью исключается влияние на транспорт атмосферных условий, а также влияние транспорта на экологию;
- не нужен обратный транспорт порожняка.

Методы. Основу предложения по разработке перспективных месторождений КМА составляет новая компоновка промышленной площадки горно-обогатительного комбината с размещением частей дробильно-измельчительного комплекса внутри карьера и выдачей руды в виде пульпы на поверхность трубопроводным транспортом для последующего обогащения.

Принципиальная схема вскрытия и разработки месторождения заключается в том, что на нерабочем борту карьера на кровле скальных пород размещается дробильно-измельчительный комплекс с насосной станцией пульпопровода, руда на который подается посредством ЦПТ от мобильных дробильно-перегрузочных установок с аппаратами крупного дробления. Транспортирование руды из забоев до ДПУ осуществляется автотранспортом, а ее обогащение после доставки по пульпопроводу производится на обычной поверхностной промплощадке.

Гидротранспорт промпродукта осуществляется при содержании твердого в гидросмеси до 60 % существующими центробежными или поршневыми насосами с разделительным устройством.

По данным [17] и опыту применения гидромеханизации на вскрышных работах в карьере Лебединского ГОКа видно, что при использовании гидротранспорта производительность труда в 2–3 раза выше, чем при применении других видов транспорта, а капитальные и эксплуатационные затраты самые низкие.

Основными методами исследований приняты графический, графоаналитический и метод технико-экономического сравнения вариантов. По этим методикам обосновывалось преимущество гидротранспорта перед другими видами промышленного транспорта, разрабатывались принципиальные схемы вскрытия перспективных месторождений КМА, определялось рациональное размещение объектов обогащения, транспортных коммуникаций и на уровне предпроектных разработок выявлялись техническая возможность и экономическая эффективность новой схемы вскрытия и транспорта. В качестве объектов исследования выбраны Приоскольское и Чернянское месторождения.

В настоящее время на крупных железорудных карьерах России и за рубежом наибольшее распространение получили следующие схемы вскрытия и транспорта руды из глубоких горизонтов.

Схема 1. От экскаваторных забоев руда доставляется автотранспортом на экскаваторные перегрузочные склады, расположенные на нерабочем (или рабочем) борту карьера, откуда железнодорожным транспортом по открытой траншее – до корпуса крупного дробления на обогатительной фабрике.

Схема 2. От экскаваторных забоев также автотранспортом руда доставляется на внутрикарьерный комплекс крупного дробления, после крупного дробления руда транспортируется ленточным конвейером, расположенным в открытой траншее или в наклонном тоннеле, до обогатительной фабрики.

Схема 3. Схема аналогична второй, только дробленая руда на поверхности перегружается в железнодорожные составы и доставляется до обогатительной фабрики.

В данной работе рассматривается четвертая схема транспортировки руды.

Схема 4. На нерабочем борту на уровне кровли руды строятся корпуса среднего и мелкого дробления и измельчения. Полученный промпродукт гидротранспортом доставляется на дальнейшую переработку на поверхностную промплощадку.

В этом варианте в карьере размещается несколько полустационарных дробильно-перегрузочных установок крупного дробления, от которых руда транспортируется ленточными конвейерами до корпуса среднего и мелкого дробления

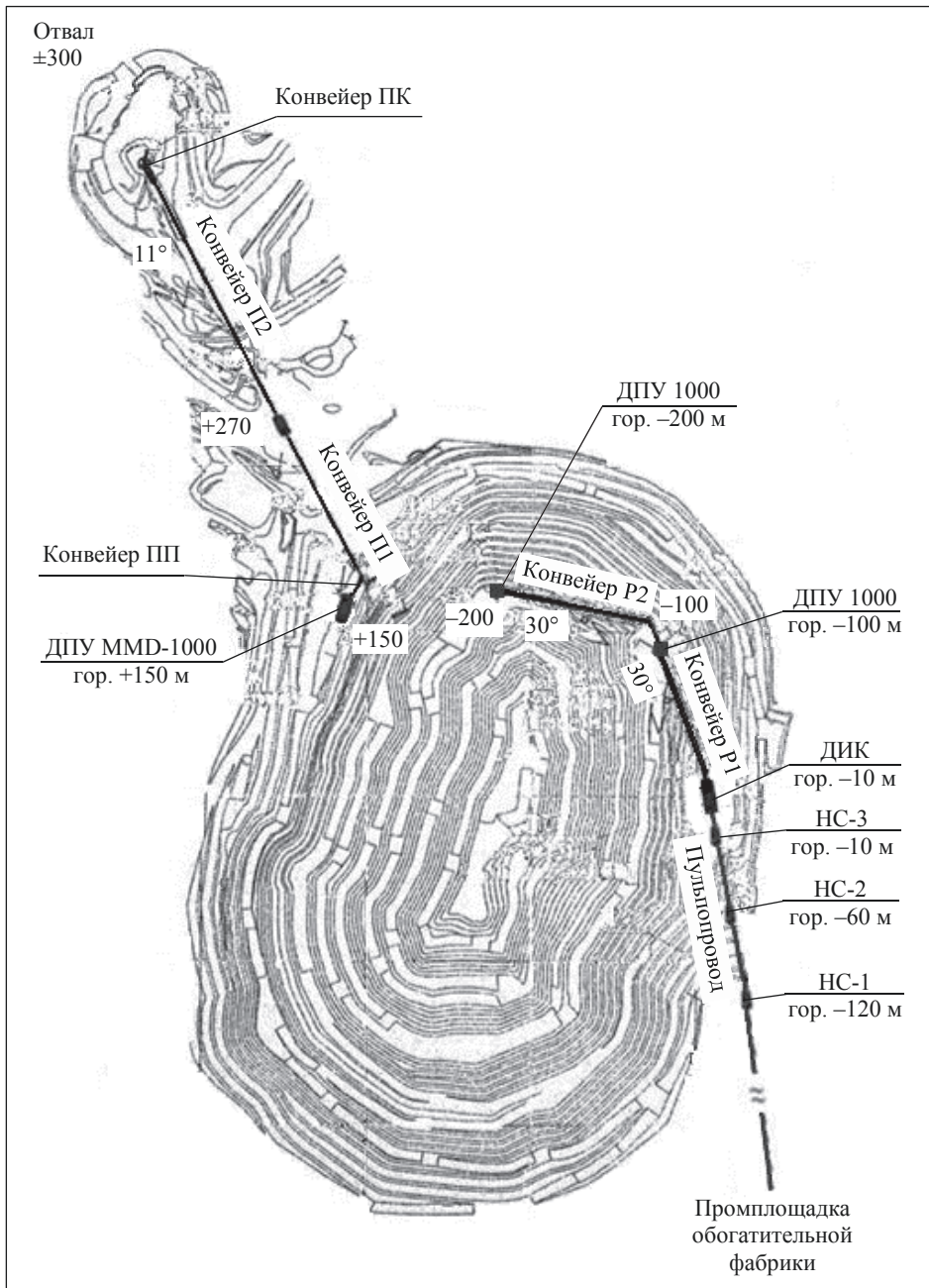


Рисунок 2. Примерный план карьера Приоскольского ГОКа (повернуто)
 Figure 2. The blueprint of the Prioskolsky GOK open pit (reversed image)

и первой стадии измельчения. На поверхностную промплощадку для обогащения гидротранспортом подается промпродукт – рудная масса в виде пульпы.

Рассматривался и второй вариант, когда в карьере размещаются корпуса дробления и обогащения, кроме цеха обезвоживания и подготовки концентрата. В этом случае из карьера гидротранспортом выдаются на поверхностные сооружения концентрат и хвосты обогащения.

Однако упор был сделан на первый вариант, обеспечивающий только измельчение руды и ее гидротранспортирование на поверхность для обогащения, потому что он не требует больших затрат на горно-капитальные работы и минимизирует сложности по эксплуатации обогатительного комплекса в карьере.

Результаты по условному карьеру. Перед тем как рассмотреть технологию разработки конкретного месторождения, был произведен технико-экономический анализ модели условного карьера, приближенного по параметрам к новым карьерам КМА. Расчетные параметры технологической схемы гидротранспорта измельченной руды, полученные с использованием известных методик и новых исследований [18–21], а также ее эффективность представлены в табл. 1.

В России и за рубежом выпуск высоконапорных (более 100 м вод. ст.) и высокопроизводительных (более 2000 м³/ч) шламовых насосов весьма ограничен, несмотря на большое количество фирм, производящих насосное оборудование. Наиболее близким по параметрам 3000/90 является шламовый насос марки LCC-M 300 × 700 американской фирмы GIW, входящей в немецкий концерн KSB. Паспортная характеристика шламового насоса дается при работе на воде. Пересчет напорной характеристики с воды на пульпу можно производить умножением паспортного напора на отношения плотностей пульпы к воде и КПД насоса при перекачке пульпы к перекачке воды.

Обсуждение результатов. Для бесперебойной работы двухлинейной системы потребуется:

- одна головная и две промежуточные насосные станции;
- на каждой станции по 2 рабочих и 1 резервному шламовому насосу GIW LCC-M 300 × 700;
- 2 рабочих и 1 резервный пульповод $d = 630$ мм.

Удельная энергоемкость транспортирования на подъем у гидротранспорта выше, чем у конвейерного, вследствие затрат энергии на перемещение несущей фазы (воды) в двухфазной системе, но при определении эффективности транспортирования необходимо учитывать капитальные и эксплуатационные (не только энергетические) затраты посредством удельных приведенных затрат.

Расчеты по аналогичному проекту, выполненные институтом Центрогипро-руда еще в конце 1980-х гг. и скорректированные по текущим ценам и тарифам, показывают, что приведенные затраты на доставку руды из карьера на обогатительную фабрику даже при расстоянии транспортирования 3 км в 2–3 раза ниже, чем при других видах транспорта (*Исследование технологической возможности и целесообразности вскрытия глубоких горизонтов железорудных карьеров с внутрикарьерным расположением частей дробильно-обогатительного комплекса с гидродъемом продуктов обогащения: отчет о НИР (заключ.): 1.1.-у-1-85-ТП / Науч.-исслед. ин-т по проблемам КМА им. Л. Д. Шевякова; рук. Пак С. В.; исполн.: Романенко В. А. [и др.]. Губкин, 1986. 70 с. № ГР 01850077226. Инв. № 02860114383*).

Результаты по Приоскольскому ГОКу. Вызывает интерес сравнительная оценка вариантов схем вскрытия Приоскольского и Чернянского месторождений, рассматривался весь горнотранспортный комплекс.

За базовый вариант схемы вскрытия и транспорта руды Приоскольского ГОКа принят вариант, предусмотренный в предпроектных проработках института Центрогипроруда. Карьер вскрывается в южной части месторождения. Объем горно-капитальных работ составляет 100 млн м³, в том числе 7 млн м³ скальной вскрыши. Годовая производительность карьера 20 млн т.

В карьере на кровле скальных пород (отметка –10 м) размещается корпус крупного дробления (ККД), транспортирование руды (неокисленных кварцитов) от забоев до ККД осуществляется автотранспортом (среднее расстояние 2 км). От ККД дробленая руда конвейерным транспортом выдается на поверхность (расстояние 1,3 км), где перегружается на железнодорожный транспорт и доставляется на обоганительную фабрику (расстояние 9 км).

Таблица 2. Параметры гидротранспорта промпродукта
Table 2. The parameters of middling hydraulic transportation

Массовая подача по твердому, т/ч	2427
Расход по пульпе, м ³ /ч	2863
Массовая концентрация, %	55
Тип насоса	GIW LCC-M 300 × 700
Скорость транспортирования, м/с	2,8
Протяженность трассы, км	10
Наружный диаметр трубопровода, мм	630

Предлагается расширить площадку ККД в карьере под корпус измельчения и станцию перекачки пульпы для замены транспортной системы *конвейерный–железнодорожный* на один гидротранспорт. Схемы разработки и вскрыши могут быть одинаковыми в обоих вариантах, а транспортная схема сводится только к гидравлической подаче измельченной руды на фабрику обогащения.

В предлагаемом варианте в карьере на отметке –10 м (рис. 2) размещаются: две дробильно-перегрузочные установки ДПУ-1000 (с дробилками ККД 1500/180); корпус среднего и мелкого дробления; корпус первой стадии измельчения и классификации; сгустители; объекты гидротранспорта промпродукта обогащения. Руда на ДПУ-1000 из забоев доставляется автосамосвалами. После первой стадии измельчения руда в виде пульпы гидротранспортом доставляется на поверхностную промплощадку, где расположены корпус обогащения в составе второй и третьей стадии измельчения и других отделений полного цикла обогащения.

Система гидротранспорта включает следующие основные сооружения: головную насосную станцию, промежуточные насосные станции, конечный пункт, камеру пуска трубоочистителя, корпус ингибиторного хозяйства, линейную часть трубопровода

Оборудование головной и оборудование промежуточных насосных станций идентичны. Пульпа перед перекачкой на всех стадиях подвергается перемешиванию. Пульпопровод работает по разомкнутой схеме «из насоса в зумпф». Расчетная глубина укладки трубопровода принята 2 м, трубы укладываются в тепловой изоляции. При увеличении сопротивления трубопровода и снижении производительности, вызванных отложениями на стенках трубы в процессе эксплуатации, возникает необходимость пропуска трубоочистителя. Для защиты пульпопровода от коррозионно-эрозионного износа перед подачей пульпы в магистральные насосы головной станции проводится ее перемешивание с известковым молоком, которое изготавливается в ингибиторном хозяйстве [22]. Для защиты всасывающих

и нагнетательных магистралей насосных станций и оборудования, смонтированного в них, предусматривается установка предохранительных устройств (табл. 2).

В предлагаемом варианте после углубления карьера по рудному телу на 100 м одна установка ДПУ-1000 перемещается на отметку –100 м, ближе к забоям, и поставляет руду на конусную дробилку КСД-КМД по ленточному трубчатому конвейеру под углом 30°. Вторую установку ДПУ-1000 перемещают в глубь карьера, когда он достигнет отметки –200 м, и связывают с первой тоже ленточным транспортером. Применение ДПУ, в принципе, приемлемо для обоих вариантов внутрикарьерного дробления (базового и предлагаемого).

В обоих вариантах технологии вскрышных и добычных работ приняты идентичными. Если за основу вскрышных работ брать применение ЦПТ, то по аналогии с Ковдорским ГОКом [23] породная ДПУ со шнековой двухвалковой дробилкой типа MMD-1000 располагается на дневной поверхности. Транспортирование осуществляется ленточным конвейером в две очереди с укладкой породы комплексом поточного отвалообразования (КПО) во внешний отвал высотой до 150 м.

В варианте с гидротранспортированием промпродукта необходима большая площадь для размещения сооружений в карьере, поэтому объем горно-капитальных работ вырастет до 132 млн м³, в том числе скальной вскрыши – 13 млн м³.

Основываясь на скорректированных сравнительных расчетах института ЦентрОГПРурода (*Исследование технологической возможности и целесообразности вскрытия глубоких горизонтов железорудных карьеров с внутрикарьерным расположением частей дробильно-обоганительного комплекса с гидродъемом продуктов обогащения: отчет о НИР (заключ.): 1.1.-у-1-85-ТП / Науч.-исслед. ин-т по проблемам КМА им. Л. Д. Шевякова; рук. Пак С. В.; исполн.: Романенко В. А. [и др.]. Губкин, 1986. 70 с. № ГР 01850077226. Инв. № 02860114383*), можно увидеть, что затраты на сооружения и здания внутри карьера увеличатся в 1,76 раза с учетом повышенной сейсмостойкости. При этом капитальные затраты не учитывают равноценной в обоих вариантах статьи на производство вскрышных и добычных работ. Несмотря на то что сметная стоимость строительства проектируемого предприятия по новому варианту превысила на 8 % базовый, замена системы транспорта руды с автомобильно-конвейерно-железнодорожного в базовом варианте на автомобильно-гидротранспортный дала экономию капитальных затрат в 20,5 %. Однако в целом по комбинату, в основном в связи с большими объемами горно-капитальных работ, произошло удорожание сметной стоимости.

Обсуждение результатов. Несмотря на увеличение амортизационных отчислений от горно-капитальных работ, эксплуатационные расходы на добычу кварцитов в предлагаемом варианте снизились на 10 % по сравнению с базовым. Из-за удорожания стоимости строительства себестоимость 1 т концентрата составила для базового варианта 1126 р., для сравниваемого – 1147 р., а приведенные затраты соответственно 1850 р. и 1930 р.

Удорожание произошло в основном за счет увеличения объема горно-капитальных работ. Несложные расчеты показывают, что при дополнительном объеме горно-капитальных работ не более 20 млн м³ (в расчетах принято 32 млн м³) приведенные затраты на 1 т концентрата составят 1700 р., т. е. на 7–8 % ниже базового варианта.

В сравнительных расчетах предполагалось применение традиционного дробильного и измельчительного оборудования. Необходимы оригинальные технические решения для размещения дробильно-измельчительного комплекса в карьере, в частности замена традиционных горизонтальных шаровых мельниц со спираль-

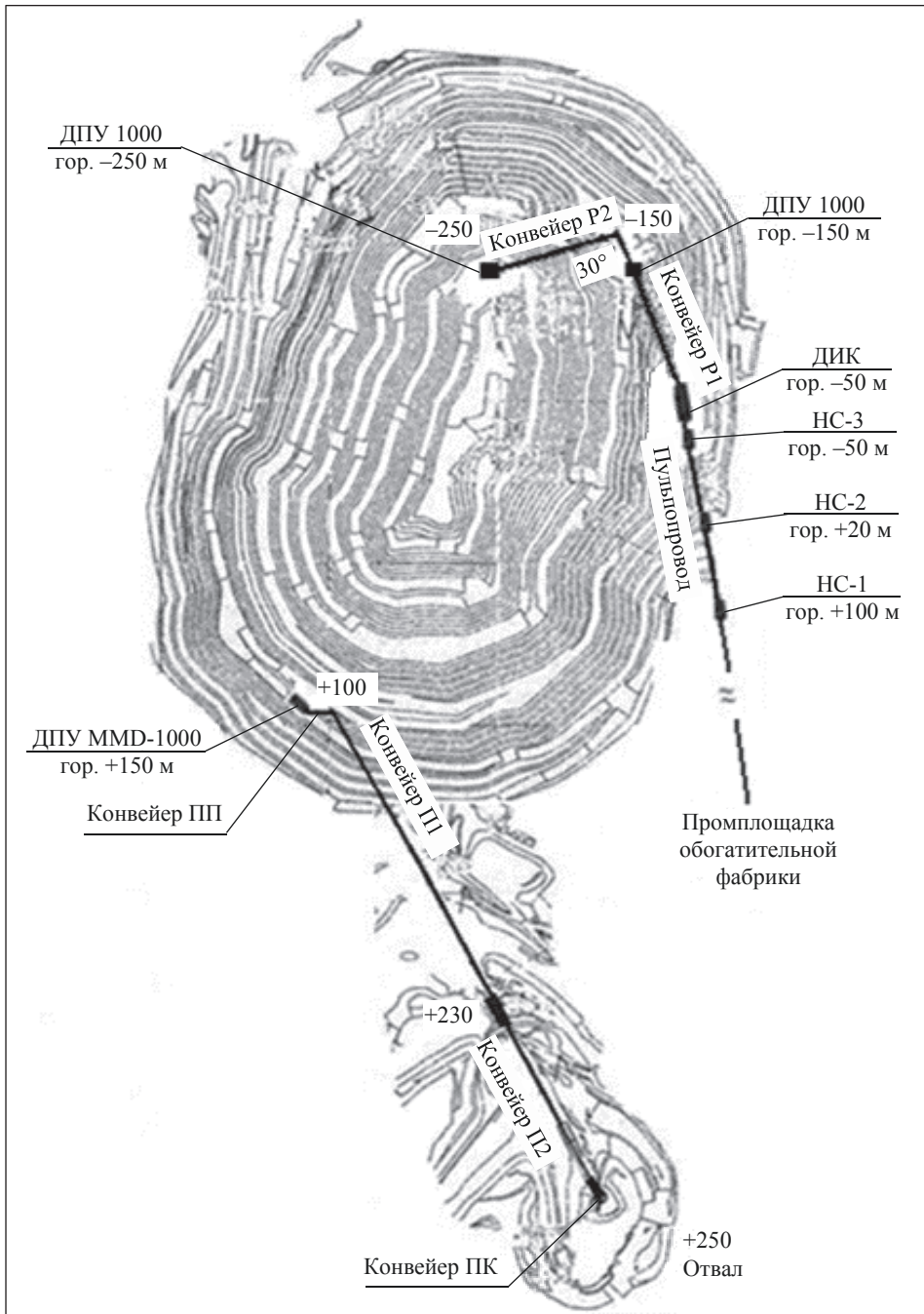


Рисунок 3. Примерный план карьера Чернянского ГОКа
 Figure 3. The blueprint of the Chernyansky GOK open pit

ными классификаторами на современные вертикальные с гидроциклонами, радиальных сгустителей – на вибросгустители, установка новых компактных машин в корпусе КСД-КМД.

Для снижения объема горно-капитальных работ не исключено рассмотрение варианта установки измельчительного комплекса (мелкое дробление и измельчение) не в карьере на кровле скальных пород, а на поверхности и замены только железнодорожного участка системы транспортирования на гидротранспортный (замена автомобильно-конвейерно-железнодорожного транспорта руды на автомобильно-конвейерно-гидротранспортный). Однако это усложняет транспортную систему и при небольших расстояниях до ОФ разъединение обогатительного комплекса на поверхности вряд ли будет эффективным.

Таким образом, по Приоскольскому ГОКу можно сделать следующие выводы.

В результате сравнения базового и предлагаемого вариантов можно сделать вывод о нецелесообразности такой схемы гидроподъема руды вследствие больших объемов дополнительных горно-капитальных работ и высокой стоимости сейсмостойкого строительства.

В то же время при размещении внутри карьера объектов для получения измельченной руды (I стадия измельчения), пригодной для гидротранспорта, приведенные затраты на 1 т концентрата увеличились только на 5 %, а капитальные затраты на транспортирование снизились на 20,5 %.

В условиях, аналогичных Приоскольскому ГОКу, гидротранспорт промпродуктов обогащения окажется эффективным при компактном размещении дробильно-измельчительного оборудования для сокращения дополнительных объемов горно-капитальных работ до 20 млн м³.

Результаты по Чернянскому ГОКу. Сравнительная оценка вариантов схем вскрытия Приоскольского ГОКа показала, что эффективность внутрикарьерного размещения части дробильно-обогатительного комплекса и гидротранспорта промпродуктов обогащения зависит в основном от объемов горно-капитальных работ. Поэтому для Чернянского ГОКа, где неокисленные кварциты разрабатываются вслед за отработкой богатых руд, важное значение придавалось поиску площадки для размещения дробильно-измельчительного оборудования без дополнительных (или минимальных) объемов горно-капитальных работ.

В качестве базового варианта разработки Чернянского месторождения, обоснованного Минчерметом СССР в предпроектных проработках института Центрогипроруда, принято освоение месторождения в три очереди:

I очередь – 6,5 млн т богатой руды в год;

II очередь – 20 млн т неокисленных кварцитов в год;

III очередь – 20 млн т неокисленных кварцитов в год.

В данной работе сравнение вариантов схем вскрытия проводится только по показателям второй очереди, причем отличие от базового варианта Приоскольского ГОКа заключается лишь в том, что корпус крупного дробления расположен внутри карьера на горизонте –50 м на площадке, оставшейся после добычи богатой руды. В предлагаемом варианте на этой же площадке строятся объекты среднего и мелкого дробления и I стадии измельчения (рис. 3). Для их размещения дополнительных объемов горно-капитальных работ не требуется. Измельченная руда доставляется гидротранспортом для последующей переработки на поверхностную промплощадку. Таким образом, циклично-поточная технология доставки неокисленных кварцитов из карьера до обогатительной фабрики автомобильно-конвейерно-железнодорожным транспортом заменяется автомобильно-гидравлическим

транспортом. В обоих вариантах вскрытия технологии вскрышных и добычных работ идентичны. По мере углубления карьера по рудному телу возможно перемещение установок ДПУ на более низкие горизонты, как и в варианте Приоскольского ГОКа.

Для более компактного размещения внутрикарьерных объектов и их устойчивости от сейсмических и ударных волн при взрывных работах необходимы поиски новых конструктивных решений (непрямолинейные контуры зданий и сооружений, совмещение вспомогательных объектов, применение крутонаклонных конвейеров в передаточных галереях и т. д.).

Система гидротранспорта промпродуктов первой стадии измельчения (крупность материала менее 2 мм и содержание класса $-0,074$ мм до 60 %) включает в свой состав те же основные сооружения, что и в проекте Приоскольского ГОКа.

Эксплуатационные затраты на доставку 1 т сырой руды из карьера гидротранспортом оказались в 2,5 раза ниже, чем конвейерно-железнодорожным. На такое снижение затрат существенно повлиял рост производительности труда на транспорте – в 7–8 раз по сравнению с I вариантом.

Расчеты показывают, что изменение схемы вскрытия и транспорта руды привело к снижению капитальных затрат на технологический транспорт и их увеличению по обогатительной фабрике с учетом удорожания стоимости строительства зданий и сооружений в карьере, а в целом удельные капитальные вложения на 1 т концентрата оказались практически одинаковыми в обоих вариантах.

Обсуждение результатов. Замена циклично-поточной схемы транспорта руды на гидротранспорт промпродуктов снизила себестоимость добычи 1 т кварцитов на 20 % при незначительном уменьшении приведенных затрат на 1 т концентрата.

Обобщая полученные результаты по Чернянскому ГОКу, можно сделать следующие выводы о преимуществе предлагаемой технологии:

- снижение капитальных и эксплуатационных затрат и, как следствие, себестоимости добычи руды;

- увеличение производительности труда на транспорте руды в 7–8 раз;

- сокращение площади земельного отвода на 50 га.

И это несмотря на увеличение себестоимости передела обогащения, вызванного удорожанием стоимости строительства части обогатительной фабрики внутри карьера.

Заключение. В целом предпроектное технико-экономическое сравнение по двум перспективным месторождениям КМА говорит о снижении затрат на перемещение руды из карьера до промплощадки гидротранспортом в сравнении с ЦПТ при условии сокращения дополнительных объемов горно-капитальных работ под измельчительный комплекс до 20 млн м³.

Применение гидротранспорта раскрывает перспективы автоматизации технологических процессов измельчения и транспортирования руды.

Полученные результаты говорят о высокой эффективности гидроподъема руды, однако удорожание стоимости строительства части обогатительного комплекса внутри карьера не всегда окупается этим эффектом.

Сдерживающими факторами внедрения такой технологии разработки глубоких карьеров являются отсутствие высоконапорных шламовых насосов большой производительности и опыта разработки сейсмостойких компактных модульных конструкций зданий и сооружений для размещения внутри карьера.

В связи с неоднозначностью результатов по двум месторождениям целесообразно продолжить исследования по уточнению рациональной области применения предлагаемой схемы вскрытия и транспорта руды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев В. Л., Бахтурин Ю. А., Журавлев А. Г. Основные аспекты формирования и новые научные направления исследований транспортных систем карьеров // Наука и образование. 2015. № 4. С. 67–72.
2. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Ленточные конвейеры на современном этапе развития горной техники // Горный журнал. 2017. № 9. С. 85–90. DOI: 10.17580/gzh.2017.09.15
3. Jennings A., Perrone P., Cornet J. Case study: correcting control problems on Essroc's multidrive station, horizontally curved conveyor // Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2013. Vol. 334. P. 472–476.
4. Thompson M., Jennings A. Impumelelo coal mine is home to the world's longest belt conveyor // Mining Engineering. 2016. 14 October. P. 14–35.
5. Шилин А. Н. ЦПТ при отработке глубоких карьеров черной металлургии // Горный журнал. 1978. № 4. С. 15–18.
6. Кантемиров В. Д. Обоснование рациональных способов повышения производительности комплексов ЦПТ: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2000. 176 с.
7. Деревяшкин И. В. Исследование и обоснование параметров горных машин и технологии выполнения горно-капитальных работ при вскрытии перспективных карьерных полей Курской магнитной аномалии: дис. ... д-ра. техн. наук. М.: МГОУ, 2002. 435 с.
8. Hai-Liang Xu, Wei Chen, Cong Xu. Cavitation performance of multistage slurry pump in deep-sea mining // AIP Advances. 2019. Vol. 9. P. 105024. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5125800> (дата обращения: 23.01.2020).
9. Александров В. И., Васильева М. А. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 471–479. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.471
10. Авксентьев С. Ю., Сержан С. Л., Труфанова И. С. Определение параметров гидротранспорта хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа // ГИАБ. 2018. № S11. С. 3–14. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-11-3-14
11. Терехин Е. П., Булгаков И. С. Совершенствование насосного оборудования для гидротранспорта железорудного концентрата // ГИАБ. 2016. № 1. С. 163–168.
12. Волгина Л. В., Тарасов В. К., Зоммер Т. В. Влияние характеристик двухфазного потока на эффективность системы гидротранспорта // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер. Политематическая. 2012. Вып. 3(23).
13. Коновалов В. С. Перспективные типы машин для транспорта массовых сыпучих грузов на средние и дальние расстояния. М: ВНИИПТМАШ, 1960. 138 с.
14. Романенко В. А., Кривошеев И. Л. Эффективность дальнего гидротранспорта железорудных концентратов // Промышленный транспорт. 1974. № 1. С. 20–22.
15. Помельников И. И. Состояние и перспективы развития железорудной промышленности в условиях «медвежьего рынка» // Горная промышленность. 2015. № 4, № 5. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/ekonomicheskoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-zhelezorudnoj-promyshlennosti-v-usloviyakh-medvezhego-rynka> (дата обращения: 02.02.2022)
16. Яковлев В. Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 7. С. 5–20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20
17. Кононенко Е. А. Возможности и перспективы гидромеханизации на карьерах // ГИАБ. 2004. № 7. С. 152–158.
18. Приходченко С. Д. Анализ современных моделей гидротранспортных систем // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. 2007. Вип. 78. С. 56–62.
19. Semenenko E., Nykyforova N., Tatarko L. The features of calculations of hydrotransport plants of geotechnological systems // New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. 2015. P. 397–401.
20. Singh J. P., Kumar S., Mohapatra S. K. An experimental study on head loss characteristics of pipe bends for flow of coal-water slurry at high solid concentration // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. No. 233(5). P. 1151–1161.
21. Vlasak P., Kysela B., Chara Z. Fully stratified particle-laden flow in horizontal circular pipe // Particulate Science and Technology. 2014. Vol. 32. No. 2. P. 179–182.
22. Qu C.-R., Xu B., Wu J., Liu J.-X., Wang X.-T., Ranliao Huaxue Xuebao. Effect of limestone addition on PM2.5 formation during fluidized bed coal combustion under O2/CO2 atmosphere // Journal of Fuel Chemistry and Technology. 2013. Vol. 41. Iss. 8. P. 1020–1024.
23. Тимофеев И. К. Непрерывный транспорт – основа инновационного развития горных производств // Промышленный транспорт. 2010. № 1. С. 38–40.

Сведения об авторах:

Терехин Евгений Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (филиал). E-mail: teryekhin50@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3955-947X>

Казанцев Антон Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (филиал). E-mail: antonkazantsev81@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8765-0895>

DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-55-69

Assessing technical capacities and economic efficiency of granulated middling hydraulic transportation as applied to Kursk Magnetic Anomaly deposits development

Evgenii P. Terekhin¹, Anton A. Kazantsev¹¹ National University of Science and Technology MISiS (branch), Gubkin, Belgorod region, Russia.

Abstract

Introduction. The majority of iron ore open pits in Russia and the CIS belong to the category of deep open pits, same as prospective Kursk Magnetic Anomaly (KMA) deposits (Priorskolskoye, Chernyanskoye, Pogrometskoye, etc.) with the thickness of overburden equal to 100–150 m where the open pits will be deep already at the early stage of mining operations.

Research objective is to provide rationale for hydraulic transportation advantage over other types of industrial transport and identify technical capacities and economic efficiency for a new scheme of opencasting and transport of promising fields of KMA at the stage of the pre-project development.

Research objects are Priorskolskoye and Chernyanskoye deposits.

The main methods of research were the graphic method, graphic-analytical method and method of technical and economical comparison of different options. The basis of the proposal for development of the prospective KMA deposits is a new layout of the industrial site of a mining-and-processing facility with location of parts of the crushing and grinding complex in the open pit and hoisting of ore in the form of pulp to the surface by pipeline transport for further beneficiation.

Results. In general, the prefeasibility study involving the technical and economical comparison of two prospective KMA deposits shows cost savings with regard to ore transportation from the open pit to the industrial site by hydraulic transport compared to the cyclic-flow technology. The new technology enables reduction of the transportation costs by 1,5–2 times and increase in labour productivity with regard to ore transportation by 2–3 times.

Keywords: prospective deposits; Kursk Magnetic Anomaly; opencast development; hydraulic transportation of ore; pulp; crushing; grinding; enrichment; transport costs.

REFERENCES

1. Iakovlev V. L., Bakhturin Iu. A., Zhuravlev A. G. Main aspects of forming and new scientific directions of research of open pit mining transport systems. *Nauka i obrazovanie = Science and Education*. 2015; 4: 67–72. (In Russ.)
2. Galkin V. I., Sheshko E. E. Belt conveyors at the modern stage of mining engineering development. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2017; 9: 85–90. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/gzh.2017.09.15
3. Jennings A., Perrone P., Cornet J. Case study: correcting control problems on Essroc's multidrive station, horizontally curved conveyor. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*. 2013; 334: 472–476.
4. Thompson M., Jennings A. Impumelelo coal mine is home to the world's longest belt conveyor. *Mining Engineering*. 2016; 14 October: 14–35.
5. Shilin A. N. Cyclic-flow technology at deep pits development in ferrous metallurgy. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1978; 4: 15–18. (In Russ.)
6. Kantemirov V. D. *Rationale for rational means of improving the productivity of cyclic-flow complexes: PhD in Eng. diss.* Ekaterinburg; 2000. (In Russ.)
7. Dereviashkin I. V. *Study and rationale for the parameters of mining machinery and technology for main development in the course of potential quarry fields early development in the Kursk Magnetic Anomaly: DSc in Eng. diss.* Moscow: MRSU Publishing; 2002. (In Russ.)
8. Hai-Liang Xu, Wei Chen, Cong Xu. Cavitation performance of multistage slurry pump in deep-sea mining. *AIP Advances*. 2019; 9: 105024. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.5125800> [Accessed 23 January 2020].

9. Aleksandrov V. I., Vasilieva M. A. Hydraulic transportation of thickened tailings of iron ore processing at Kachkanarsky GOK based on results of laboratory and pilot tests of hydrotransport system. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2018; 233: 471–479. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2018.5.471

10. Avksentiev S. Iu., Serzhan S. L., Trufanova I. S. Determination of parameters of hydraulic tailings beneficiation of iron ore in Kachkanar GOK. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; S11: 3–14. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2018-4-11-3-14

11. Terekhin E. P., Bulgakov I. S. Improvement of pumping equipment for hydraulic transport of iron ore concentrate. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 1: 160–162. (In Russ.)

12. Volgina L. V., Tarasov V. K., Zommer T. V. Influence of two-phase flow characteristics on hydrotransport systems efficiency. *Internet-vestnik VolgGASU. Ser. Politematicheskaya = Scientific and Technical Multi-Topic Internet Journal of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2012; 3(23). (In Russ.)

13. Konovalov V. S. *Promising types of machines for bulk cargo transport at medium and long distances*. Moscow: VNIITMASH Publishing; 1960. (In Russ.)

14. Romanenko V. A., Krivosheev I. L. The effectiveness of long-distance hydrotransport of iron-ore concentrate. *Promyshlennyy transport = Industrial Transport*. 1974; 1: 20–22. (In Russ.)

15. Pomelnikov I. I. The state-of-the art and prospects of the iron ore industry development in conditions of “bear market”. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry*. 2015; 4: 28. (In Russ.) Available from: <https://mining-media.ru/ru/article/ekonomicheskoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-zhelezorudnoy-promyshlennosti-v-usloviyakh-medvezhego-rynka> [Accessed: 02 February 2022]

16. Iakovlev V. L. Solid mineral deposits integrated development methodology for Russian mineral resource base development strategy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyy zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 7: 5–20. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20

17. Kononenko E. A. Opportunities and prospects of hydraulic mining of open pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2004; 7: 152–158. (In Russ.)

18. Prikhodchenko S. D. An analysis of modern models of hydrotransport systems. *Mining Electromechanics and Automation Engineering: collection of scientific and technical studies*. 2007; 78: 56–62.

19. Semenenko E., Nikiforova N., Tatarko L. The features of calculations of hydrotransport plants of geotechnological systems. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*. 2015: 397–401.

20. Singh J. P., Kumar S., Mohapatra S. K. An experimental study on head loss characteristics of pipe bends for flow of coal-water slurry at high solid concentration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 233(5): 1151–1161.

22. Vlasak P., Kysela B., Chara Z. Fully stratified particle-laden flow in horizontal circular pipe. *Particulate Science and Technology*. 2014; 32(2): 179–182.

24. Qu C.-R., Xu B., Wu J., Liu J.-X., Wang X.-T., Ranliao Huaxue Xuebao. Effect of limestone addition on PM_{2.5} formation during fluidized bed coal combustion under O₂/CO₂ atmosphere. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 2013; 41(8): 1020–1024.

25. Timofeev I. K. Continuous transport is the basis of innovative development of mining. *Promyshlennyy transport = Industrial Transport*. 2010; 1: 38–40. (In Russ.)

Received 29 April 2021

Information about the authors:

Evgenii P. Terekhin – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mining, National University of Science and Technology MISiS (branch). E-mail: teryekhin50@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3955-947X>

Anton A. Kazantsev – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mining, National University of Science and Technology MISiS (branch). E-mail: antonkazantsev81@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8765-0895>

Для цитирования: Терехин Е. П., Казанцев А. А. Оценка технической возможности и экономической эффективности гидротранспортирования измельченного промпродукта применительно к разработке перспективных месторождений КМА // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 3. С. 55–69. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-55-69

For citation: Terekhin E. P., Kazantsev A. A. Assessing technical capacities and economic efficiency of granulated middling hydraulic transportation as applied to Kursk Magnetic Anomaly deposits development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyy zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 3: 55–69 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-55-69