



К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ю.П. ПАНОВ, О.С. БРЮХОВЕЦКИЙ*

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для выбора рациональных схем технологии гидравлического транспортирования горной массы необходима оптимизация ее основных параметров.

Большое число факторов, определяющих эффективность гидротранспорта, затрудняет полную формализацию взаимосвязей основных процессов транспортирования между собой и другими производственными процессами горно-обогатительного производства.

Цель. Выявить специфические особенности основных процессов гидротранспортной технологии, установить факторы, параметры, определяющие их оптимальную работу, и предложить инструмент оптимизации как отдельных звеньев, так и всей цепочки гидравлического транспортирования горной массы.

Материалы и методы. Применительно к поставленной задаче оптимизации параметров процесса гидротранспортирования минерального сырья материальной основой ее решения являются интегральные характеристики напорного движения рудных и породных гидросмесей, полученные авторами и другими исследователями эмпирическим или теоретическим путем на различных объектах горнодобывающих и горно-перерабатывающих предприятий.

Результаты. Выяснено, что основным фактором (помимо множества других, менее значимых), определяющим эффективность гидротранспорта, является крупность транспортируемого куска (руды, породы, угля).

При этом характер изменения финансовых затрат и результатов оценки эффективности гидротранспортной технологии всегда будет относиться к конкретному месторождению, принятой технологической схеме, используемому оборудованию.

Заключение. Задача оптимизации параметров гидротранспортной технологии может быть решена с применением технологии цифровых двойников, позволяющей решать вопросы управления сложными технологическими процессами, при этом оперативно вносить коррективы в режимы и параметры рабочих процессов как на отдельных производственных линиях, так и на предприятии в целом.

Ключевые слова: напорный гидравлический транспорт, гидротранспортная технология, горная масса, крупность отдельных фракций, параметры гидротранспортирования, критерии оптимизации, технология цифровых двойников

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Панов Ю.П., Брюховецкий О.С. К вопросу оптимизации параметров гидротранспортной технологии. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2023;65(6):8—13. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-6-8-13>

Статья поступила в редакцию 25.09.23

Принята к публикации 08.12.2023

Опубликована 29.12.2023

* Автор, ответственный за переписку

TO THE QUESTION OF PARAMETER OPTIMIZATION OF HYDRAULIC TRANSPORTATION TECHNOLOGY

YURI P. PANOV, OLEG S. BRYUKHOVETSKY*

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. The selection of rational schemes for the technology of hydraulic transportation of rock mass requires optimization of the main parameters of this technology. A large number of factors determining the efficiency of hydraulic transportation hamper the formalization of relationships of the main transportation processes both between themselves and other mining and processing processes.

Aim. To identify specific features of the main processes in hydraulic transportation technology, to establish the factors and parameters that determine their optimal operation, and to propose an optimization tool for both individual links and the entire chain of hydraulic transportation of rock mass.

Materials and methods. The problem of parameter optimization of hydraulic transportation of mineral raw materials is solved based on the integral characteristics of the pressure movement of ore and rock hydraulic mixtures. These characteristics were previously obtained empirically or theoretically by the authors of the present paper and other researchers at various mining companies.

Results. Among the variety of factors determining the efficiency of hydraulic transportation, the size of the transported piece (ore, rock, coal) was found to play the major role. At the same time, the nature of changes in economic expenditures and results of evaluating the effectiveness of hydraulic transportation technology will always relate to a specific field, the accepted technological scheme, and the equipment used.

Conclusion. The problem of parameter optimization of hydraulic transportation processes can be solved using digital twin technology. This technology can be used to address the issues of managing complicated technological processes, as the same time allowing timely adjustments to the modes and parameters of operational processes both on individual production lines and at the enterprise as a whole.

Keywords: pressure hydraulic transportation, hydraulic transport technology, rock mass, the size of individual fractions, parameters of hydro-transportation, optimization criteria, digital twin technology

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Panov Yu.P., Bryukhovetsky O.S. To the question of parameter optimization of hydraulic transportation technology. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023;65(6):8—13. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-6-8-13>

Manuscript received 25 September 2023

Accepted 18 December 2023

Published 29 December 2023

* Corresponding author

Цифровая трансформация в геологоразведке и горнодобывающей промышленности приводит к появлению новых представлений об оценке эффективности применяемых технологий. Особенно это касается вопроса оптимизации работы отдельных звеньев сложных промышленных систем, к которым относится технология гид-

равлического транспортирования минерального сырья.

Напорное гидравлическое транспортирование горной массы (руды, породы, закладочных материалов и т.д.) является прогрессивным техническим направлением, так как в определенных геологических и горнотехнических условиях позволяет

объединить процессы очистных работ, транспорта и переработки горной массы в одну поточную линию.

Другими словами, гидравлическое транспортирование на горных предприятиях следует рассматривать как основу поточной технологии, включающей перемещение горной массы под землей, водоотлив, подъем на поверхность, транспорт на поверхности, подготовку сырья к последующей переработке.

Эта технология позволяет управлять техническими и технологическими параметрами процесса транспортирования сырья, воздействовать на технико-экономические показатели основных стадий горно-обогатительного производства для повышения его эффективности [3].

Рассмотрение гидравлического транспортирования как технологии накладывает свои требования к оптимизации технологических параметров всех процессов горного производства, на которые этот вид транспорта оказывает влияние.

Специфические особенности гидротранспорта и большое число факторов, определяющих его эффективность, затрудняют полную формализацию взаимосвязей основных процессов гидротранспорта между собой и другими звеньями горно-обогатительного производства. Вследствие этого выбор рационального варианта транспортной схемы и оптимизация ее параметров являются сложной многофакторной задачей.

Разработка месторождений полезных ископаемых с использованием гидротранспортной технологии изменяет качественные и количественные показатели их эксплуатации. Это особенно касается подземного способа разработки рудных залежей, где преимущества указанного способа транспортирования в благоприятных условиях проявляются наиболее значимо.

На практике возможны следующие варианты технологических схем гидротранспортирования при подземной разработке минерального сырья [2, 7].

Вариант 1. Гидротранспорт руды под землей и на поверхности с одновременной промывкой и обогащением руды в процессе гидротранспортирования (богатые железные руды Яковлевского месторождения КМА и др.).

Вариант 2. Гидроподъем и гидротранспорт руды, попутная промывка руды и отделение шламов, повышение извлечения полезных компонентов при обогащении (свинцово-цинковые и баритовые руды Салаирского месторождения и др.).

Вариант 3. Рудничный гидравлический транспорт компонентов твердеющей закладочной смеси с утилизацией пород горнопроходческих выработок без выдачи пород на поверхность (североуральские бокситовые месторождения и др.).

Вариант 4. Раздельная отработка руд разного качества, предварительное обогащение руды под землей с выделением пустой породы, гидротранспорт обогащенной руды на поверхность к месту дальнейшей переработки, пустой породы — под землей для закладки выработанного пространства (богатые железные руды и железистые кварциты КМА и др.).

Вариант 5. Полный цикл обогащения руды под землей с выдачей гидротранспортом готового концентрата на поверхность и размещением хвостов обогащения в подземных горных выработках (руды цветных и редких металлов и др.).

Возможны и другие варианты технологических схем гидротранспорта сырья, в частности при комбинированной (открыто-подземной) разработке месторождения, при доработке прибоновых запасов, при повторной разработке, при разработке в сложных горно-геологических и климатических условиях [7]. Может оказаться целесообразным применение этой технологии параллельно с использованием традиционных способов транспорта — железнодорожного, конвейерного, автомобильного.

Все это усложняет математическую интерпретацию технологического процесса гидротранспортирования в целом, так как каждый вариант носит частный характер. Общим для всех вариантов является влияние крупности транспортируемого куска на гидравлические, технологические и в итоге на экономические показатели гидротранспортной технологии. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Оптимальный размер транспортируемого куска может быть различным для различных технологических процессов, осуществляемых при реализации рассматриваемой технологии, в том числе при:

- подготовке горной массы (руды, породы) к гидротранспортированию (дробление, измельчение, пульпообразование и др.);
- гидротранспортировании (потери напора при движении воды и гидросмеси, износ оборудования и трубопроводов и др.);
- обезвоживании и складировании готового продукта (руды, породы, хвостов и др.).

Эффективность перечисленных процессов в их экономическом содержании в значительной степени зависит от крупности транспортируемого куска.

Отбитая горная масса перед гидротранспортированием подвергается дроблению и измельчению до крупности, определяемой требованиями технологии дальнейшей переработки (сгущение, обогащение, складирование и др.), при этом для каждого процесса будет свой оптимальный размер куска. Вместе с тем процесс дробления (измельчения) руды весьма трудоемкий и затратный и составляет до 50% от стоимости отбитой руды.

Применяемые в настоящее время на шахтах дробильные устройства позволяют получать продукт крупностью 6—15 мм. При такой крупности кусков руды (например, богатые железные руды) возможно лишь их предварительное обогащение. Глубокое обогащение может быть достигнуто лишь после доведения крупности куска руды до размеров 1 мм и меньше, то есть они требуют измельчения. Этот процесс весьма дорогостоящий и, как правило, на обогатительных фабриках с целью экономии электроэнергии и уменьшения износа оборудования процесс дробления осуществляют в несколько стадий, разделенных процессами грохочения (классификации) для выделения фракций определенной крупности, чтобы не подвергать их повторному дроблению.

Кроме того, следует учитывать, что крупность частиц, кроме других факторов, определяет величину потерь напора при их гидравлическом транспорте. Поэтому то, что может быть оптимальным с точки зрения энергопотребления при дроблении (измельчении), может не соответствовать минимальным энергозатратам при гидротранспорте.

Исследования показывают [8], что чем больше крупность транспортируемого материала, тем больше потери напора, однако до определенного значения — примерно до 3 мм — при дальнейшем увеличении крупности куска кривая удельных гидравлических сопротивлений (потерь энергии при движении гидросмеси) выполаживается, что объясняется кинематическими особенностями перемещения частиц грубодисперсной фракции [5].

Подобная ситуация с оптимизацией крупности транспортируемого материала возникает и при анализе влияния ее на степень износа трубопроводов и оборудования при гидротранспорте, затрат на обезвоживание и складирование сырья.

Что касается износа трубопроводов при гидротранспорте, то этот показатель является одним из основных при оценке эффективности гидротранспортных систем.

Общий износ трубопроводов складывается из износа от трения скольжения и качения частиц

по стенке, кавитационного износа, износа от удара частиц под разными углами о стенку, коррозионного износа от воздействия обогащенной кислородом гидросмеси, износа от гидравлических ударов.

Экспериментами и теоретическими исследованиями установлено, что в обычных условиях транспортирования дробленых руд, при скоростях больше критической, основная роль в износе принадлежит ударному износу [1, 5]. Он уменьшает наклеп, образующийся при волочении частиц по нижней стенке трубопровода, приводит к образованию наружных микротрещин в стенке и тем самым стимулирует более интенсивное протекание других видов износа (коррозии, кавитации).

Исследованиями доказано, что, начиная с некоторого значения максимального размера транспортируемого куска, увеличение крупности частиц не оказывает существенного влияния на величину износа трубопровода. При этом на величину ударного износа плотность и размер твердых частиц влияют сильнее, чем скорость их перемещения. Это обстоятельство может быть определяющим при установлении предельной крупности дробления (измельчения) рудной массы перед гидротранспортированием.

Отмеченные особенности влияющих факторов при оценке эффективности гидротранспортной технологии не ограничиваются только значением крупности транспортируемого материала. Множество других факторов, в том числе плотность руды, объемная концентрация и скорость движения гидросмеси, содержание в ней тонких фракций (крупностью менее 0,2 мм), диаметр трубопровода и др. также оказывают определенное влияние, и прежде всего на энергоемкость процесса транспортирования.

В общем случае характер изменения финансовых затрат и результатов оценки эффективности гидротранспортной технологии всегда относится к конкретному месторождению, к принятой технологической схеме, используемому оборудованию.

Математическое описание оптимального варианта технологии гидротранспорта минерального сырья в каждом случае будет частным, в известной степени оригинальным.

Вместе с тем задача оптимизации может быть решена с привлечением технологии цифровых двойников (Digital Twin), которая получает все большее распространение в промышленности, в том числе и при оптимизации транспортных систем.

Цифровой двойник — это программный аналог промышленного объекта (изделия, технологии, транспортного потока и др.), моделирующего в режиме реального времени внутренние процессы, технические характеристики и поведение объекта в условиях влияния случайных воздействий и окружающей среды, параметры которых передаются с датчиков реального объекта [4, 6].

Цифровой двойник связан с реальным объектом через облачный сервис, что позволяет собирать, накапливать и анализировать полученную с датчиков информацию, обрабатывать ее в виде математических моделей внешнего вида, оперативно корректировать режимы и параметры рабочих процессов объекта. Эта технология позволяет решать задачи управления не только отдельными технологическими процессами, производственными линиями, но и предприятием в целом.

Применительно к поставленной задаче оптимизации параметров процесса гидротранспор-

тирования минерального сырья материальной основой ее решения являются интегральные характеристики напорного движения рудных и породных гидросмесей, полученные учеными МГРИ и другими исследователями, представляющие собой уникальную научную и практическую базу для проектирования и рационального использования прогрессивной гидротранспортной технологии на горных предприятиях.

В заключение отметим, что создание системы математических и компьютерных моделей (цифрового двойника) для оптимизации параметров гидротранспортной технологии на объектах горнодобывающей отрасли в каждом конкретном случае потребует предварительного детального технико-экономического обоснования целевой функции: минимизации затрат, либо максимизации прибыли, либо нечто иного, например обеспечения необходимого уровня надежности, безопасности, минимального ущерба окружающей среде и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брюховецкий О.С. Методические основы ударного разрушения стенок трубопроводов потоками твердых частиц при гидравлическом транспортировании // Москва: МГП «Геолнформмарк» — ВНИИ экономики минер. сырья и геол.-развед. работ, 1990. 68 с.
2. Брюховецкий О.С., Иляхин С.В., Яшин В.П. Основы горных технологий: учебное пособие для СПО. СПб.: Лань, 2020. 352 с. ISBN 978-5-8114-6441-8.
3. Брюховецкий О.С. Рудничный напорный гидравлический транспорт горной массы: учебное пособие. СПб.: Лань, 2021. 196 с. ISBN 978-5-8114-3589-0.
4. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-Journal. 2019. № 10—2(34). С. 101—104.
5. Смолдырев А.Е. О сопротивлении движению в системах трубопроводного транспорта. М.: Промышленный транспорт, 1982. С. 11—12.
6. Цехла С.Ю., Симченко Н.А. Цифровой двойник в системе управления промышленным объектом // Большая Евразия: Развитие, безопасность, сотрудничество: Ежегодник. Мат-лы Третьей междунар. науч.-практич. конф. в рамках Общественно-научного форума «Здравствуй, Россия!». Москва, 14—15 октября 2020 года / Отв. ред. В.И. Герасимов. Вып. 3. Ч. 2. М.: Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2020. С. 794—796.
7. Черных А.Д., Брюховецкий О.С., Логинский А.П. Доработка запасов руд за контурами карьера с закладкой выработанного пространства. М.: Цветметинформация, 1987. 126 с.
8. Юфин А.П. Гидромеханизация. М.: Стройиздат, 1974. 496 с.

REFERENCES

1. Bryukhovetsky O.S. Methodological foundations of shock destruction of pipeline walls by flows of solid particles during hydraulic transportation. Moscow: IHP "Geolnformmark" — Research Institute of Economics miner. raw materials and geol.-intelligence. works, 1990. 68 p. (In Russian).
2. Bryukhovetsky O.S., Ilyakhin S.V., Yashin V.P. Fundamentals of mining technologies: a textbook for SPO. St.-Petersburg: Lan, 2020. 352 p. ISBN 978-5-8114-6441-8 (In Russian).
3. Bryukhovetsky O.S. Mine pressure hydraulic transport of rock mass: textbook. St.-Petersburg: Lan, 2021. 196 p. ISBN 978-5-8114-3589-0 (In Russian).
4. Kokorev D.S., Yurin A.A. Digital twins: concept, types and advantages for business // Colloquium-Journal. 2019. No. 10—2(34). P. 101—104 (In Russian).
5. Smoldyrev A.E. On resistance to movement in pipeline transport systems. Moscow: Industrial Transport, 1982. P. 11—12 (In Russian).
6. Tsekhla S.Yu., Simchenko N.A. Digital twin in the industrial facility management system // Greater Eurasia: Development, security, cooperation: The yearbook. Materials of the Third International scientific and practical conference within the framework of the Public

- Scientific Forum "Hello, Russia!". Moscow, October 14—15, 2020 / Editor-in-chief V.I. Gerasimov. Issue 3. Part 2. Moscow: Institute of Scientific Information on Social Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2020. P. 794—796 (In Russian).
7. Chernykh A.D., Bryukhovetsky O.S., Loginsky A.P. Refinement of ore reserves behind the contours of the quarry with the laying of the developed space. Moscow: Tsvetmetinformatsiya, 1987. 126 p. (In Russian).
8. Yufin A.P. Hydromechanization. Moscow: Stroyizdat, 1974. 496 p. (In Russian).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Панов Ю.П. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Брюховецкий О.С. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Yuri P. Panov — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Oleg S. Bryukhovetsky — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Панов Юрий Петрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ректор ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия тел.: +7 (495) 255-15-10, доб. 2002
e-mail: rektor@mgri.ru
SPIN-код: 9249-9725
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0776-0446>

Yuri P. Panov — Cand. of Sci. (Tech.), Senior Researcher, Rector, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia tel.: +7 (495) 255-15-10 (ext. 2002)
e-mail: rektor@mgri.ru
SPIN-code: 9249-9725
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0776-0446>

Брюховецкий Олег Степанович* — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия тел.: +7 (495) 255-15-10, доб. 21-19
e-mail: bryhovetskyos@mgri.ru
SPIN-код: 8619-2065

Oleg S. Bryukhovetsky* — Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia tel.: +7 (495) 255-15-10, ext. 21-19
e-mail: bryhovetskyos@mgri.ru
SPIN-code: 8619-2065

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author