

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ В ТРУБОПРОВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА

Зеленцова А.А., Васильева М.А., Батова И.М.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: гидросмесь, концентрация, трубопроводный транспорт, дальность транспортирования, пластификатор, структура потока.

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования движения гидросмесей различного гранулометрического состава в трубопроводах разного диаметра 50, 40 и 25 мм. Рассмотрено влияние концентрации твердой фазы, типа наполнителя (песок и хвосты обогащения железной руды), а также пластифицирующей добавки на скорость транспортирования гидросмеси. Исследование направлено на повышение эффективности трубопроводного гидротранспортирования закладочных гидросмесей, используемых при закладке выработанного пространства в подземной добыче полезных ископаемых. Установлено, что характер изменения скорости потока существенно зависит от соотношения размера частиц и диаметра трубопровода, а также от структурных особенностей гидросмеси. Показано, что крупнодисперсные гидросмеси эффективнее транспортируются в трубах большего диаметра, тогда как мелкодисперсные системы сохраняют более устойчивое движение в трубах меньшего диаметра. Установлено, что применение пластифицирующей добавки способствует формированию более однородной структуры гидросмеси, снижает склонность частиц к агрегации и осаждению, повышая устойчивость потока. Полученные результаты обосновывают возможность использования трубопроводов с поэтапным уменьшением диаметра для поддержания скорости потока и увеличения дальности гидротранспортирования закладочных гидросмесей.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF TRANSPORTATION PARAMETERS OF HIGHLY CONCENTRATED HYDRAULIC MIXTURES IN PIPELINES OF VARIABLE DIAMETER

Zelentsova A.A., Vasilyeva M.A., Batova I.M.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: hydraulic mixture, concentration, pipeline transport, transportation distance, plasticizer, flow structure.

Abstract. This article presents the results of an experimental study of the flow of slurries with varying particle size distributions in pipelines with diameters of 50, 40, and 25 mm. The influence of solids concentration, filler type (sand and iron ore tailings), and a plasticizing additive on the slurry transport velocity is examined. The study aims to improve the efficiency of pipeline hydraulic transport of backfill slurries used in mined-out spaces in underground mining. It has been established that the nature of the flow velocity change significantly depends on the ratio of particle size to pipeline diameter, as well as on the structural properties of the slurry. It is shown that coarse slurries are transported more efficiently in larger-diameter pipes, while finely dispersed systems maintain more stable movement in smaller-diameter pipes. It has been established that the use of a plasticizing additive contributes to the formation of a more homogeneous slurry structure, reduces the tendency of particles to aggregate and settle, and increases flow stability. The obtained results substantiate the possibility of using pipelines with a gradually decreasing diameter to maintain the flow rate and increase the range of hydraulic transport of backfill hydraulic mixtures.

Введение

В развитии промышленности важное значение имеет эффективное решение задач транспортирования сырья, продуктов переработки и техногенных материалов как в пределах промышленного предприятия, так и на значительные расстояния между технологическими объектами. Одним из наиболее экономичных и экологических способов перемещения твердых материалов является гидравлический трубопроводный транспорт. Благодаря возможности полной автоматизации технологического процесса гидротранспорт получил широкое распространение в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, где используется для перемещения рудных пульп, хвостов обогащения, строительных растворов и закладочных гидросмесей [1].

Особое значение гидротранспортные системы приобретают при подземной разработке месторождений полезных ископаемых с применением технологий закладки выработанного пространства твердеющими смесями [2]. Закладочные смеси, содержащие хвосты обогащения и различные минеральные наполнители, транспортируются по трубопроводам в выработанное пространство, где после твердения формируют искусственный массив, способствующий перераспределению горного давления и повышению безопасности ведения горных работ. Эффективность реализации подобных технологий во многом определяется надежностью и стабильностью работы трубопроводных транспортных систем, обеспечивающих подачу гидросмеси на значительные расстояния по трубам, включающим как горизонтальные, так и вертикальные участки.

Состав закладочной гидросмеси определяется требованиями к прочности, долговечности, а также фильтрационным характеристикам формируемого массива, что накладывает дополнительные ограничения на реологические параметры смеси [3]. В практике закладочных работ наблюдается тенденция перехода к использованию пастообразных гидросмесей, позволяющих формировать закладочные массивы повышенной прочности и устойчивости. Однако увеличение концентрации твердой фазы приводит к росту внутренних сопротивлений смеси, что существенно усложняет процесс ее транспортирования по трубопроводам [4].

Для обеспечения текучести концентрированных гидросмесей и снижения энергетических затрат на их транспортирование применяются различные методы интенсификации. Одним из таких методов является использование пластифицирующих добавок, способных изменять характер межчастичных взаимодействий и снижать структурную вязкость гидросмеси [5]. Однако высокая концентрация твердой фазы, полифракционный состав и применение техногенных наполнителей существенно усложняют механизмы взаимодействия пластификаторов с компонентами гидросмеси. Это отражается как на гидродинамических характеристиках транспортируемого потока, так и на процессах структурообразования и формировании прочностных характеристик закладочного массива. Одной из ключевых задач проектирования гидротранспортных систем является поддержание скорости движения гидросмеси выше критического значения, при котором твердые частицы находятся во взвешенном состоянии. Снижение скорости потока сопровождается выпадением дисперсной фазы в донные слои трубопровода, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления и может привести к закупорке трубопровода [6].

Одним из перспективных инженерных решений, направленных на увеличение дальности транспортирования гидросмесей, является использование трубопроводов переменного диаметра. Данный подход основан на поэтапном уменьшении диаметра трубопровода по мере движения гидросмеси, что позволяет компенсировать снижение скорости потока, вызванное гидравлическими потерями, и поддерживать условия устойчивого транспортирования частиц. Подобный подход реализован в ряде крупных промышленных проектов. Так, в проекте Minas-Rio (Бразилия) для транспортирования железорудного концентрата по трубопроводу протяженностью более 520 км используются трубы диаметром 660 мм на начальных участках и 610 мм на последующих, что позволяет поддерживать оптимальный гидродинамический режим потока по всей трассе [7]. Аналогичный принцип применен в трубопроводе Antamina (Перу) длиной около 300 км, где транспортирование медно-цинкового концентрата осуществляется по трубам диаметром 250-210 мм, обеспечивая поддержание скорости гидросмеси выше критической и предотвращая осаждение твердых частиц [8]. Эффективность транспортирования твердых материалов на большие расстояния также была подтверждена при эксплуатации угольного трубопровода Black Mesa (США), по которому угольная гидросмесь транспортировалась на расстояние около 440 км [9].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных гидротранспортированию дисперсных материалов, большинство из них рассматривает влияние отдельных факторов, таких как размер частиц, концентрация твердой фазы или

скорость потока, на потери давления и распределение частиц в трубопроводе [10]. Однако в реальных гидротранспортных системах параметры движения гидросмеси формируются под совместным воздействием нескольких факторов, включая гранулометрический состав дисперсной фазы, диаметр трубопровода и реологические свойства транспортируемой среды. Поэтому особый интерес представляет комплексное исследование поведения гидросмесей различного гранулометрического состава в трубопроводах разных диаметров с учетом применения пластифицирующих добавок, способных изменять структуру потока и гидравлические потери [11, 12].

Материалы и методы

Подготовка гидросмесей. Экспериментальные исследования выполнены с использованием гидросмесей, приготовленных на основе кварцевого песка (с размером частиц 0,1-2,5 мм) и хвостов обогащения железной руды, с преобладанием частиц 0,075 мм. В качестве несущей среды служила водопроводная воды температурой 20°C. В состав образцов добавляли пластифицирующую добавку – лигносульфонат технический. Перед добавлением в гидросмесь пластификатор предварительно растворяли в воде до получения однородного раствора со светло-соломенным оттенком. Массовая концентрация твердых частиц в гидросмесях составляла 5%, 10% и 15%. Пластификатор добавляли в количестве 1% от массы твердого наполнителя. Всего было приготовлено 12 вариантов гидросмесей, различающихся типом наполнителя, его концентрацией и наличием пластифицирующей добавки.

Экспериментальная установка. Эксперименты проводились на гидротранспортной установке, схема которой приведена на рисунке 1. Трубопроводная система 1 образует циркуляционный контур общей длиной 4,5 м и соединена с концентрационным баком 2, предназначенным для приготовления и подачи гидросмеси. Объем загружаемой гидросмеси составлял 0,04 м³. Перемещение гидросмеси по контуру обеспечивалось центробежным песковым насосом 3 типа П12,5/12,5СП. Управление параметрами потока осуществлялось с использованием запорной арматуры 4.

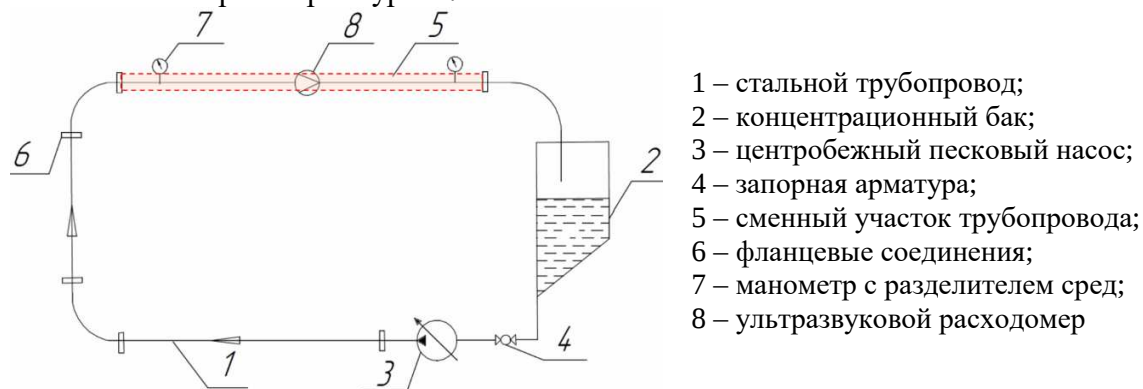


Рис. 1. Схема экспериментальной гидротранспортной установки:

Конструкция стенда предусматривала установку сменного прямолинейного участка 5 длиной 1,5 м, соединяемого с основным трубопроводом при помощи фланцевых соединений 6. Это позволяло варьировать диаметр труб (50, 40 и 25 мм) и исследовать влияние изменения диаметра трубопровода на характеристики транспортирования гидросмеси. Контроль давления в системе осуществлялся манометрами с разделителем сред 7, установленными в характерных точках трубопровода. Измерение скорости потока на экспериментальном участке выполнялось с использованием накладного ультразвукового расходомера 8.

Результаты и обсуждение

Полученные экспериментальные данные показывают, что скорость движения гидросмеси определяется сложным взаимодействием концентрации твердой фазы, гранулометрического состава наполнителя и диаметра трубопровода (рис. 2). Изменение концентрации приводит к перестройке структуры потока и изменению условий удержания частиц во взвешенном состоянии. При увеличении содержания твердой фазы возрастает

вероятность взаимодействия частиц между собой и с потоком жидкости, что влияет на гидравлические потери и скорость транспортирования.

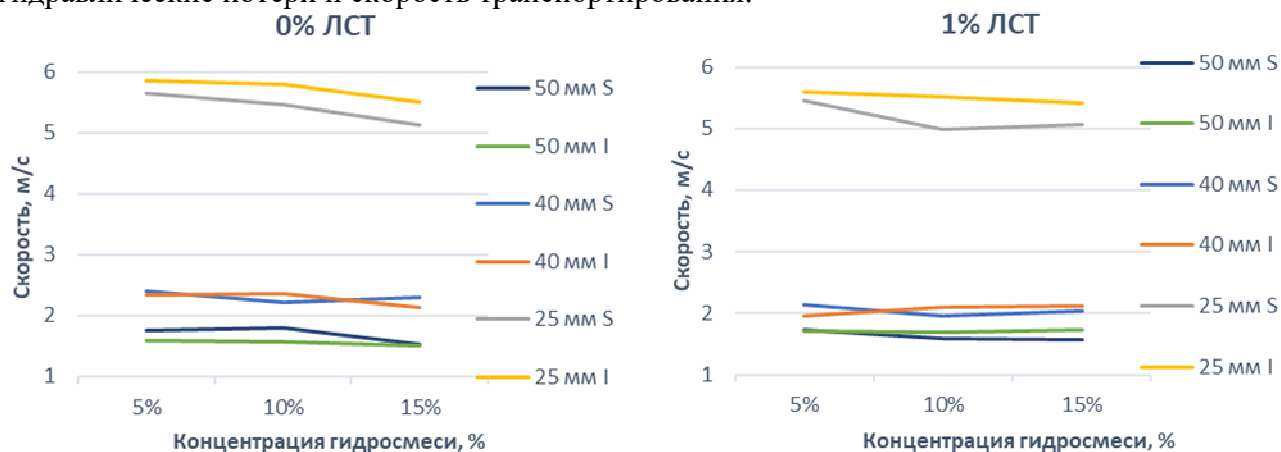


Рис. 2. Динамика изменения скорости образцов гидросмеси в трубопроводах разного диаметра от концентрации и наличия пластификатора: S – песок, I – хвосты обогащения железной руды

В трубопроводе диаметром 50 мм, вне зависимости от концентрации, скорость гидросмеси с песчаным наполнителем превышает скорость гидросмеси на основе хвостов обогащения. Это обусловлено крупным размером песчаных частиц, обладающих большей инерцией и способных активнее вовлекаться в движение в турбулентном потоке. При увеличении концентрации песка с 5% до 10% наблюдается рост скорости потока, что связано с повышением взвесенесущей способности потока и более устойчивым удержанием частиц в объеме жидкости. Дальнейшее увеличение концентрации до 15% приводит к снижению скорости гидросмеси с песком вследствие усиления межчастичных контактов и роста гидравлического сопротивления.

При уменьшении диаметра трубы до 40 мм влияние стенок трубопровода на структуру потока становится более выраженным, что приводит к изменению характера движения частиц. При концентрации 10% скорость песчаной гидросмеси снижается и становится ниже скорости гидросмеси хвостов обогащения. Это связано с тем, что относительный размер песчаных частиц по отношению к диаметру трубы увеличивается и приводит к росту интенсивности их взаимодействия со стенками трубопровода. В то же время для гидросмесей на основе хвостов обогащения наблюдается более устойчивая динамика скорости, поскольку мелкодисперсные частицы удерживаются во взвешенном состоянии и распределяются равномерно по сечению трубопровода. При дальнейшем увеличении концентрации песка до 15% скорость гидросмеси возрастает. Это связано с изменением структуры потока и равномерным распределением частиц по сечению трубопровода. Для хвостов обогащения наблюдается противоположная тенденция: при концентрации 10% скорость возрастает, однако дальнейшее увеличение концентрации приводит к ее снижению.

Наиболее выраженные различия наблюдаются при диаметре трубопровода 25 мм. В этих условиях скорость гидросмеси с песком во всем диапазоне концентраций ниже скорости гидросмеси на основе хвостов обогащения. Это связано с тем, что крупные частицы песка начинают активно взаимодействовать со стенками трубопровода и друг с другом, что приводит к увеличению трения и росту гидравлического сопротивления. Мелкодисперсные хвосты, напротив, образуют более однородную гидросмесь (гомогенную), в которой частицы распределяются по сечению трубопровода равномерно и удерживаются потоком жидкости во взвешенном состоянии. Контакт частиц со стенками трубопровода оказывается менее выраженным, что обеспечивает устойчивое движение потока и более высокую скорость транспортирования по сравнению с песчаной гидросмесью.

Дополнительные эксперименты с добавлением лигносульфоната технического (ЛСТ) показали, что пластификатор изменяет структуру гидросмеси и характер распределения частиц в потоке. Адсорбция молекул добавки на поверхности частиц вызывает

электростатическое отталкивание между ними, что препятствует их агрегации и обеспечивает более равномерное распределение твердой фазы в потоке [13]. Несмотря на значительное снижение скорости потока, такая структуризация гидросмеси уменьшает вероятность образования осадочного слоя и повышает устойчивость гидротранспортирования. Наиболее выраженный эффект наблюдается для мелкодисперсных гидросмесей. После добавления пластификатора скорость гидросмеси на основе хвостов обогащения в трубах диаметром 50мм и 40мм становится выше скорости песчаной гидросмеси. Это связано с высокой удельной поверхностью мелких частиц, на которой адсорбируется большее количество молекул добавки, что способствует стабилизации структуры дисперсной системы.

Полученные результаты позволяют сформулировать практический подход к проектированию трубопроводных систем. Для транспортирования крупнодисперсных материалов целесообразно использовать участки трубопроводов большего диаметра, тогда как для эффективного перемещения мелкодисперсных гидросмесей могут быть применены трубы меньшего диаметра. Следовательно, по мере движения гидросмеси возможно поэтапное уменьшение диаметра трубопровода, что позволяет компенсировать снижение скорости, вызванное гидравлическими потерями и поддерживать условия устойчивого транспортирования.

Использование пластифицирующих добавок в сочетании с мелкодисперсными гидросмесями дополнительно повышает устойчивость потока и снижает вероятность осаждения частиц. Это создает возможность использования трубопроводов с поэтапным уменьшением диаметра для поддержания скорости потока и увеличения дальности транспортирования гидросмеси без существенного увеличения энергетических затрат.

Выводы

Выполненные исследования позволили установить особенности движения гидросмесей различного гранулометрического состава при транспортировании в трубопроводах различного диаметра и оценить влияние концентрации твердой фазы и пластифицирующей добавки на скорость потока. Показано, что характер изменения скорости существенно зависит от соотношения размера частиц и диаметра трубопровода. В трубах большого диаметра более высокие скорости характерны для гидросмесей с крупнодисперсным наполнителем, тогда как при уменьшении диаметра возрастает влияние стенок трубопровода, и скорость транспортирования таких смесей снижается. При диаметре 25 мм наблюдается обратная зависимость: мелкодисперсные гидросмеси на основе хвостов обогащения перемещаются устойчивее и характеризуются более высокой скоростью по сравнению с песчаными гидросмесями.

Полученные зависимости показывают, что поэтапное изменение диаметра трубопровода позволяет поддерживать устойчивое состояние потока по мере движения гидросмеси и тем самым снижать вероятность образования донных отложений. В трубах большого диаметра формируются условия, благоприятные для транспортирования крупнодисперсных частиц, тогда как уменьшение диаметра способствует более устойчивому перемещению мелкодисперсных материалов.

Установлено, что применение пластифицирующей добавки способствует формированию более однородной структуры гидросмеси и уменьшает склонность частиц к осаждению. Несмотря на некоторое снижение скорости потока, структурирование гидросмеси обеспечивает равномерное распределение частиц и уменьшает риск заиливания трубопровода. Это особенно характерно для мелкодисперсных гидросмесей, для которых после добавления пластификатора наблюдается более устойчивое движение в трубопроводах различных диаметров.

Таким образом, полученные результаты показывают, что комплексное управление гранулометрическим составом гидросмеси, ее концентрацией, диаметром трубопровода и реологическими свойствами системы может рассматриваться как эффективный инженерный подход для повышения устойчивости гидротранспортирования и увеличения дальности транспортирования минеральных гидросмесей.

Список литературы / References

1. Li Y., Fu J., Yang J., Wang J. Research on Slurry Flowability and Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill: Effects of Cement-to-Tailings Mass Ratio and Mass Concentration // Materials. 2024, vol. 17(10), p. 2222. DOI: 10.3390/ma17102222.
2. Wang X., Wang Y., Hao D., Zhao H., Hu Z. Study on the Flow Velocity of Safe and Energy-Saving Transportation of Light-Particle Slurry // Applied Sciences. 2024, vol. 14(14), p. 6313. DOI: 10.3390/app14146313.
3. Wang C., Zhang L., Li Y., Chen H., Zhou Q. Experimental Investigation on Flow Behavior of Paste Slurry Transported by Gravity in Vertical Pipes // Processes. 2022, vol. 10, iss 9, p. 1696. DOI: 10.3390/pr10091696.
4. Vlasak P., Coarse Particles-Water Mixtures Flow in Pipes. Journal of Mining Institute. 2017. Vol. 225, p. 338-341. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.338.
5. Mishra S., Kaushal D. R. Highly concentrated iron ore slurry flow through pipeline with and without chemical additive; part I: Experimental investigations and proposed model for the prediction of pressure drop // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2025, vol. 73, no. 2, pp. 143-154. DOI: 10.2478/johh-2025-0011.
6. Большунова О.М., Ватлина А.М., Коржев А.А. Влияние концентрации гидросмеси на энергоэффективность работы системы насос-пульпопровод // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021: Тезисы докладов. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 147-149.
6. Bolshunova O.M., Vatlina A.M., Korzhev A.A. The influence of the concentration of the hydraulic mixture on the energy efficiency of the pump-pulp pipeline system // Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics: IPDME-2021: Theses. – SPb.: Saint Petersburg Mining University, 2021. – P. 147-149.
7. Miedema S.A., Head A. Loss Model for Homogeneous Slurry Transport for Medium Sized Particles // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2015, vol. 63(1), pp. 1-12. DOI: 10.1515/johh-2015-0005.
8. Derammelaere R., Shou G. Antamina's Copper and Zinc Concentrate Pipeline Incorporates Advanced Technologies // Hydrotransport 15: proceedings of the 15th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids, Banff, Canada, 3-5 June 2002. – Cranfield: BHR Group, 2002. – P. 485-500.
9. Heywood N.I., Cheng D.C.-H. Flow in Pipes. II. Multiphase Flow // Physics in Technology. 1984, vol. 15(6), pp. 291-300. DOI: 10.1088/0305-4624/15/6/i04.
10. Авксентьев С.Ю., Сержан С.Л., Труфанова И.С. Определение параметров гидротранспорта хвостов обогащения железной руды качканарского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №11. – С. 3-14. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-11-3-14.
10. Avksentiev S.Yu., Serzhan S.L., Trufanova I.S. Determination of parameters of hydrotransport of tailings of iron ore processing at Kachkanarsky GOK // Mining information and analytical bulletin. 2018, no. 11, pp. 3-14. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-11-3-14.
11. Александрова Т.Н., Потемкин В.А. Разработка методики оценки процесса гидроциклонирования с учетом реологических параметров минеральной суспензии // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 908-916. – DOI: 10.31897/PMI.2021.6.12.
11. Aleksandrova T.N., Potemkin V.A. Development of a methodology to assess the hydrocyclone process with account of the rheological properties of the mineral slurry // Journal of Mining Institute. 2021, vol. 252, pp. 908-916. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.12.
12. Ihle C.F. Economic pipe diameter of settling slurries // Journal of Cleaner Production. 2020, vol. 264, p. 121475. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121475.
13. Ouyang X., Qiu X., Chen P. Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate – A potentially useful water reducer // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2006, vol. 282-283, pp. 489-497. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.12.020.

Сведения об авторах:

Васильева Мария Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин	Vasilyeva Maria Aleksandrovna – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of transport technological processes and machines
Зеленцова Анна Александровна – аспирант	Zelentsova Anna Aleksandrovna – postgraduate student
Батова Ирина Михайловна – магистрант eskanord@yandex.ru	Batova Irina Mikhailovna – master's student

Information about authors:

Получена 20.01.2026