

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 621.6.052.6

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1951-1962

Особенности проектирования систем гидротранспорта горнообогатительных фабрик

Людмила Всеволодовна Волгина¹, Станислав Алексеевич Сергеев¹,
Анастасия Андреевна Романова²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Акционерное общество «Институт «Оргэнергострой» (АО ОЭС); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются особенности проектирования системы гидротранспорта, являющейся частью технологической цепочки переработки руды. Проведен критический анализ текущих характеристик пульпопровода хвостового хозяйства горно-обогатительного комплекса «Рябиновский» (ГОК «Рябиновский»), расположенного около г. Алдана. При гидравлических расчетах двухфазных потоков исходными данными были химический состав транспортируемой пустой породы, характеристики производительности обогатительной фабрики, геодезические данные места складирования твердых частиц.

Материалы и методы. На основе теории двухфазных потоков авторами приведены расчеты характеристик твердых частиц, потока и потерь энергии, необходимых при проектировании пульпопроводов. Инженерными задачами расчета двухфазных потоков являются расчеты потерь напора при гидротранспорте различных материалов по трубам, определение предельных скоростей, при которых транспортируемый материал еще не осаждается на дно потока, и выбор оборудования для осуществления гидравлического транспорта. Приведена зависимость удельных потерь энергии двухфазных потоков, при средних скоростях, рекомендуемых нормативными документами на основе экспериментальных данных, полученных на кафедре гидравлики МГСУ. Транспортировка твердых частиц возможна, если поток обладает для этого достаточной энергией и на дне трубопровода не образуется осадок. Средняя скорость, соответствующая режиму транспортирования без осадка, является критической скоростью двухфазного потока.

Результаты. Сформулированные рекомендации о выборе эффективного режима гидротранспорта основаны на принципе минимизации потерь энергии. Выявлен дефицит энергии потока в рассматриваемом пульпопроводе и показана необходимость использования критерия о необходимости превышения средней скорости над критической скоростью двухфазного потока.

Выводы. Обоснована необходимость использования коэффициента запаса скорости для достижения эффективного режима транспортирования. Особое внимание уделено расчету потерь напора при критической скорости транспортирования, что является основой для выбора насосного оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротранспорт, двухфазные потоки, пульпопровод, потери напора, критическая скорость, режим гидротранспортирования, насосное оборудование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волгина Л.В., Сергеев С.А., Романова А.А. Особенности проектирования систем гидротранспорта горнообогатительных фабрик // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1951–1962. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1951-1962

Автор, ответственный за переписку: Людмила Всеволодовна Волгина, VolginaLV@gic.mgsu.ru.

Design of hydraulic transport systems for mining and processing plants

Lyudmila V. Volgina¹, Stanislav A. Sergeev¹, Anastasia A. Romanova²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Joint Stock Company "Institute "Orgenergostroy" (JSC IOES); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Peculiarities of design of the hydrotransport system, which is part of the technological chain of ore processing are considered. A critical analysis of the characteristics of the slurry pipeline of the tailing facility of the mining and processing complex "Ryabinovy" (MPC "Ryabinovy"), located near the city of Aldan, was carried out.

Materials and methods. In the hydraulic calculations of two-phase flows, the initial data were the chemical composition of the tailings, the basic features of the processing plant, and the geodetic data of the place of tailing storage. Based

on the theory of two-phase flows, the authors provide calculations of the characteristics of solid particles, flow and energy losses necessary for the design of slurry pipelines. The engineering tasks of calculating two-phase flows are the calculation of head losses during the hydrotransportation of various materials through slurry pipes, the determination of the maximum velocity at which the transported material is not yet deposited to the bottom of the flow and the choice of equipment for hydraulic transport. The dependence of specific energy losses of two-phase flows, at average velocity, below those recommended by regulations on the basis of experimental data obtained at the Department of "Hydraulics and Hydrotechnical Engineering", NRU MGSU, is given. Solid particles transport is possible if the flow has sufficient energy for this without sediment formation at the bottom of the pipeline. The average speed corresponding to the sediment-free transport mode is the critical velocity of the two-phase flow.

Results. The recommendation on the choice of an effective mode of hydrotransport is based on the principle of minimizing energy losses. The deficit of flow energy in the slurry pipeline is revealed and the necessity to use the criterion on the need to exceed the average velocity over the critical velocity of the two-phase flow is shown.

Conclusions. The necessity of using the speed reserve coefficient to achieve an effective mode of transportation was formulated. Particular attention is paid to the calculation of head losses at a critical transport speed, which is the basis for the choice of pumping equipment.

KEYWORDS: hydrotransport, two-phase flows, slurry pipeline, pressure losses, critical velocity, hydration mode, pumpin equipment

FOR CITATION: Volgina L.V., Sergeev S.A., Romanova A.A. Design of hydraulic transport systems for mining and processing plants. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1951-1962. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1951-1962 (rus.).

Corresponding author: Lyudmila V. Volgina, VolginaLV@gic.mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортировка твердых частиц водой в виде смеси по трубам (гидротранспортным системам, пульпопроводам) широко используется в промышленности [1–4]. В отличие от транспортировки суспензий [5–8], при гидротранспорте возникает вертикальная сила взвешивания [9–11], связанная с существованием разности в плотностях воды и твердых частиц. В настоящее время эффективно работают системы, переносящие:

- уголь [12];
- песок [13–15];
- рудные материалы, «хвосты» и т.д. [14, 16];
- ил [10];
- торф [11];
- лед [17–19];
- известь [20].

Гидротранспорт по трубопроводам является одним из видов непрерывного транспорта, который обладает рядом достоинств [21–24]:

- обеспечивает непрерывность потока высокой производительности без погрузо-разгрузочных работ¹;
- практически полностью автоматизирован, с высокими технико-экономическими показателями;
- снижает вредное воздействие на окружающую среду.

«Хвостами» обычно называют мелко диспергированные отходы различных производств после изъятия основного компонента из исходного сырья. Извлечение основного компонента может производиться механическим путем и без применения высоких температур. В этом случае «хвосты» представля-

ют собой мелкодробленую горную породу («пустая» порода) с тем или иным, обычно незначительным, содержанием того продукта, в результате добычи которого образовались эти «хвосты». В некоторых случаях извлечение ценного продукта производится не только при механическом воздействии (дроблении и классификации), но и при химической обработке различными реагентами (например, кислотами). В этом случае «хвосты» могут иметь специфические свойства (например, склонность к образованию устойчивых структур в водной среде). При некоторых процессах, связанных с обработкой при высоких температурах, «хвосты» приобретают иные свойства и поступают в поток в виде окалина и т.д.

Во многих случаях представляется технически удобным, эффективным и экономически целесообразным «хвосты» удалять от производства к местам складирования гидравлическим способом — напорным и безнапорным гидротранспортом. По причине специфических свойств «хвостов» (далее — твердых частиц) различных производств с 30-х годов прошлого столетия начались специальные изучения особенностей гидротранспортирования таких твердых частиц, которые актуальны и в настоящее время.

В теории двухфазных потоков транспортировка твердых частиц возможна, если поток обладает для этого достаточной энергией, все частицы подняты со дна и слой заилиения (труднопроходимые области на дне в виде осадка) не образуется [25–27]. Средняя скорость, соответствующая режиму транспортирования без осадка, является критической скоростью $v_{кр}$ двухфазного потока.

Рассматриваемый в настоящей работе пульпопровод входит в состав технологической цепочки переработки руды горно-обогатительного комплекса «Рябиновый» (ГОК «Рябиновый»), расположенного около г. Алдана. Месторождение рудного золота Рябиновое расположено в Центрально-Алданском

¹ Avksentiev S.Yu., Nikolaev A.K., Dokoukin V.P. Development and operation of hydrotransport systems under severe environmental conditions. URL: http://www.rusnauka.com/18_ADEN_2012/Economics/11_113420.doc.htm



Рис. 1. Месторождение Рябиновое, система гидротранспорта: 1 — обогатительная фабрика; 2 — пульпопроводы; 3 — хвостохранилище

Fig. 1. “Ryabinovy” deposit, hydrotransport system: 1 — processing plant; 2 — pulp pipelines; 3 — tailings

Табл. 1. Характеристики работы обогатительной фабрики

Table 1. Characteristics of the processing plant work

Характеристика, размерность Characteristics, dimensionality	Обозначение Designation	Величина Magnitude	Примечание Note
Производительность ОФ, т/час Production capacity, t/h	$M_{\text{ТВ}} / M_s$	132,7	Массовый расход по твердому материалу Mass Flow Rate of Solid Material
Массовая доля твердого материала в смеси, % Mass fraction of solid material in the mixture, %	$P_{\text{ТВ}} / P_s$	43,26	Масса воды соответственно 56,74 % The mass of water is 56.74 % respectively
Производительность по воде, т/час Water capacity, t/h	M_0	255,7	Массовый расход по воде Water Mass Flow Rate
Расчетный расход двухфазного потока, м ³ /час Design flow rate of two-phase flow, m ³ /h	$Q_{\text{см}} / Q_{\text{mix}}$	306,75	Объемный расход смеси (пульпы) Volumetric flow rate of the mixture (pulp)

золотоносном районе Якутии. В состав объектов хвостового хозяйства для размещения отходов входит: хвостохранилище, пульпопровод и система возврата в технологический процесс осветленной воды, поступившей с пульпой. Хвостохранилище предназначено для складирования отвальных «хвостов» обогащения, отстоя и осветления воды в отстойном пруду. Чаша хвостохранилища создается ограждающей первичной дамбой. Первичная дамба возводится из вскрышных пород карьера с последующим наращиванием по мере заполнения. Создаваемая емкость хранилища обеспечивает складирование отходов, образующихся за 12,5 лет отработки запасов руды. Система гидротранспорта предназначена для транспортировки твердых частиц из главного корпуса обогатительной фабрики (ОФ) на хвостохранилище. В состав сооружений входят:

- пульпонасосная станция в главном корпусе с узлом опоржжения;
- магистральные пульпопроводы от главного корпуса ОФ до хвостохранилища по гребню дамбы;
- распределительные пульпопроводы, проложенные по гребню дамбы и по левому борту хвостохранилища;
- хвостохранилище.

Принципиальная схема расположения сооружений приведена на рис. 1.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Степень неравномерности работы фабрики в течение суток по расходу смеси выражается коэффициентами $K_1 = 1,15$ и $K_2 = 0,75$.

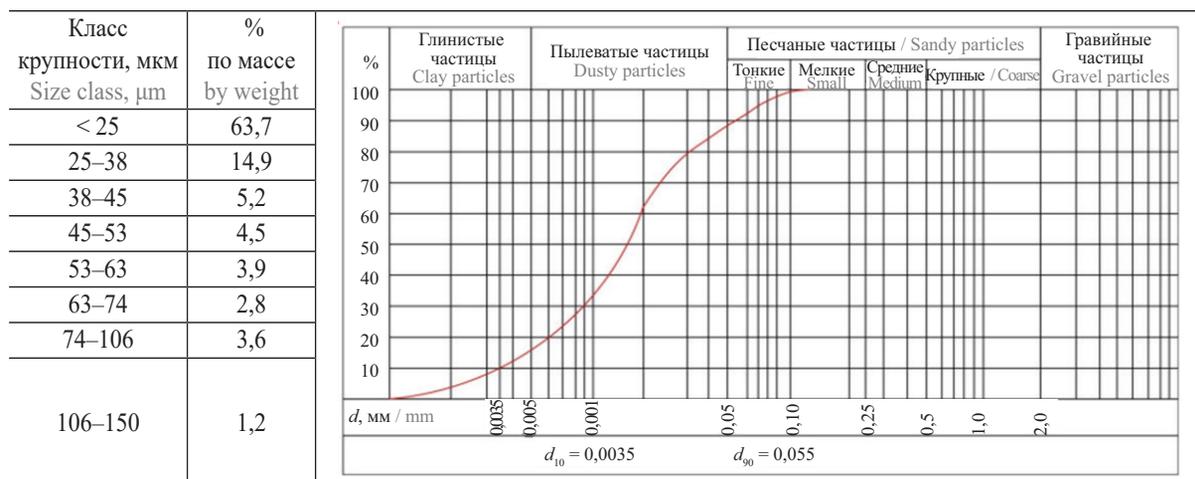
Основной задачей настоящей работы является инженерный расчет гидротранспортной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования гидротранспорта твердых частиц, образованных в результате переработки различных руд на территории СССР, были начаты в 1935 г. профессором, д.т.н. А.П. Юфимым (кафедра гидравлики, МИСИ). Им были исследованы твердые частицы после обработки Ононской руды ($d_{\text{cp}} = 0,2-2,5$ мм), Ново-Троицкие эфеля по трубам малых диаметров ($D = 32, 80$ мм). По экспериментальным данным получена формула для потерь напора $i_{\text{см}}$ для различных плотностей потока $\rho_{\text{см}} = 1,015-1,422$ т/м³ (т.е. для различных концентраций). В 1952 г. им же были проведены эксперименты по гидротранспорту отходов Березовской обогатительной фабрики, представляющих собой смесь песка с остат-

Табл. 2. Гранулометрический состав твердых частиц

Table 2. Granulometric composition of solid particles



ками неизвлеченной руды (плотность материала $4,5 \text{ т/м}^3$) по относительно большим трубам (150, 200 мм). Исследуемые плотности потоков находились в диапазоне $\rho_{\text{см}} = 1,025\text{--}1,323 \text{ т/м}^3$. Анализ кривых гранулометрического состава (определение содержания по весу разнофракционных частиц) позволил определить коэффициент разнозернистости j и средневзвешенный диаметр твердых частиц $d_{\text{ср}} = 0,224\text{--}0,323 \text{ мм}$. Экспериментальным путем определялась величина критической скорости, которая находилась в диапазоне $v_{\text{кр}} = 1,72\text{--}1,97 \text{ м/с}^2$, и величины удельных потерь напора, представленных в виде сводных графиков потерь напора $I = f(Q_{\text{см}})$. В 1939 г. В.С. Кнороз в лаборатории ВНИИГа провел исследования по гидротранспорту отходов рудообогатительной фабрики Балхашского медеплавильного комбината, имеющих следующие физико-механические характеристики твердой составляющей $\rho_{\text{тв}} = 2,65\text{--}2,7 \text{ т/м}^3$, $d_{\text{ср}} = 0,056 \text{ мм}$, по трубопроводу $D = 250 \text{ мм}$. Критической скоростью, по определению Кнороза, считается скорость, при которой и выше которой гидравлические сопротивления, выраженные высотой столба гидросмеси, равны гидравлическим сопротивлениям при движении воды. Расчет систем гидротранспорта по этой методике приводит к большим экономически нецелесообразным запасам. В 1960 г. в МИСИ были проведены научно-исследовательские работы по определению параметров для расчета гидротранспорта хвостов и намыва карт хвостохранилищ. Результаты экспериментальных исследований были обобщены в СНиП 2.05.07–85², который является актуальным в настоящее время. Недостатком проведенных исследований для определения гидравлических сопротивлений и критических скоростей при гидротранспорте «хвостов» является то, что они пригодны для твердых частиц, аналогичных по характери-

кам рассматриваемых руд (по удельному весу, степени диспергирования, технологии обогащения основного (извлекаемого) продукта).

При проектировании и анализе эффективности пульпопроводов последовательно рассматриваются характеристики:

- твердых частиц (плотность, виды твердых частиц, геометрические размеры) [26, 27];
- смеси (соотношение твердого и жидкого компонента) [28, 29];
- потока (средние по живому сечению, минимальные скорости транспортирования), позволяющие оценить потери напора по длине транспортирования [30–34].

Характеристики транспортируемых твердых частиц

При переработке руд месторождения «Рябиновое» по рассматриваемой в регламенте технологической схеме образуется отвальный продукт — «хвосты» сорбционного выщелачивания. Химический состав твердой фазы состоит из 18 компонент, основные (по массовой доле свыше 10 %) — диоксид кремния SiO_2 (60,4 %), глинозем Al_2O_3 (16,59 %), оксид калия K_2O (13,2 %). Гранулометрический состав представлен в табл. 2.

Согласно классификации, рассматриваемые твердые частицы относятся к классу пылеватых частиц. Характеристики твердых частиц, необходимых для расчета рассматриваемого двухфазного потока, представлены в табл. 3.

Характеристики потока

Соотношение жидкого и твердого расхода в смеси определяется технологией обработки породы и является рабочей характеристикой пульпонасосной станции. Одной из основных характеристик потока является действительная объемная консистенция [12] C_0 безразмерная величина — отношение суммы объемов движущихся твердых частиц в объеме пото-

² СНиП 2.05.07–85*. Промышленный транспорт. Industrial transport (дата введения: 01.07.92).

ка между двумя поперечными сечениями к величине этого объема:

$$C_0 = \frac{\rho_{см} - \rho_0}{\rho_{тв} - \rho_0}, \quad (1)$$

где ρ_0 и $\rho_{см}$ — соответственно, плотность воды и транспортируемой смеси.

В общем случае, понятие плотности вещества — это масса единицы его объема. Плотность двухфазного потока (смеси) существует только при движении, поскольку твердые частицы могут находиться во взвешенном состоянии, а следовательно, и двигаться, только если поток обладает достаточной энергией для их подъема. Движение обуславливает существующее распределение плотности по сечению, поэтому действительная плотность двухфазного потока зависит от распределения плотности и скорости по живому сечению потока. В теории двухфазных потоков существует два понятия плотности потока: расходная ρ_p и действительная $\rho_{см}$ плотности³. Действительная плотность рассчитывается для каждой части живого сечения (сегмента, в случае круглой трубы), а расходная плотность определяется через массовое содержание компонентов в смеси:

$$\rho_{см} = \frac{M_{см}}{W_{см}}, \quad (2)$$

где $M_{см}$, $W_{см}$ — масса и объем смеси.

Используя приведенные выше данные (см. табл. 1 и 2), рассчитывается значение действительной

³ СТО СРО-П 6054294800054–2018. Нормы проектирования хвостовых хозяйств гидromеталлургических заводов и обогатительных фабрик (дата введения: 21.12.2018).

Табл. 3. Характеристики твердых частиц

Table 3. Characteristics of solid particles

Характеристика Characteristic	Обозначение, размерность Designation, dimension	Расчетная формула Calculation Formula	Величина Magnitude	Примечание Note
Средневзвешенная крупность твердых частиц Weighted average particulate particle size	$d_{ср}$, мм d_{wa} , mm	$\frac{\sum_i d_i p_i}{100}$	0,0262	Пылеватые твердые частицы Dusty particulate matter
Коэффициент разнозернистости Different-grained coefficient	j	$3 \frac{d_{10}}{d_{90}}$	0,1909	—
Коэффициент транспортабельности Transportability coefficient	ψ	[7]	0,0225	—
Средневзвешенная плотность твердых частиц Weighted average solids density	$\rho_{тв}$, т/м ³ ρ_s , t/m ³	$\rho_{тв} = 0,67\rho_{SiO_2} + 0,18\rho_{Al_2O_3} + 0,15\rho_{K_2O}$	2,61	—

Примечание. p_i — вероятность содержания твердой частицы диаметром d_i в составе; d_{10} и d_{90} — крупности твердых частиц, меньше которых в составе содержится 10 и 90 % соответственно.

Note. p_i — probability of particulate matter diameter d_i in the composition; d_{10} и d_{90} — coarseness of particulate matter smaller than 10 and 90 per cent, respectively.

объемной консистенции $C_0 = 0,16$. Удельный вес потока — произведение плотности потока на ускорение силы тяжести $\gamma_{см} = \rho_{см}g = 1,27 \text{ кН/м}^3$.

Инженерными задачами расчета двухфазных потоков являются расчеты потерь напора при гидротранспорте твердых частиц по трубам, определение предельных скоростей, при которых транспортируемый материал еще не осаждается на дно потока, и выбор оборудования для осуществления гидравлического транспорта.

Оценка транспортирующей способности потока — одна из основных задач расчета. Транспортирующая способность представляет собой возможность рассматриваемого потока при данной скорости транспортировать, т.е. поддерживать во взвешенном (или подвижном) состоянии и переносить определенное количество твердых частиц [12]. Эффективная эксплуатация пульпопровода (и всей гидравлической системы) связана с выбором экономически наиболее выгодного (оптимального) режима транспортирования. Основными характеристиками, определяющими режим движения, являются критическая скорость и удельные потери энергии. Критическая скорость — это наименьшая средняя по живому сечению потока скорость, при которой все твердые частицы переносятся потоком. Удельные потери напора при движении двухфазного потока $i_{см}$ представляют в виде суммы удельных потерь напора при движении условно-однородной жидкости и дополнительных удельных потерь напора (рис. 2):

$$i_{см} = i_0 \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_0} + \Delta i. \quad (3)$$

Удельные потери напора при движении воды i_0 рассчитываются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$i_0 = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}. \quad (4)$$

Зависимость удельных потерь напора двухфазного потока от средней скорости, представленного кривой 2, получена экспериментально многими исследователями в различных странах на протяжении последних 80 лет. Линия 1 построена по уравнению Дарси (4). Пунктиром показан рост потерь напора при рассмотрении двухфазных потоков, которые можно классифицировать как условно однородные. Эффективные средние скорости транспортирования выбираются больше критической скорости [25, 26], поскольку при этих режимах не образуется слой заиливания (т.е. все твердые частицы переносятся потоком). Точка пересечения пунктирной линии I^* с линией 2 — граница применения двух теорий взвешивания. Правее этой точки применяется диффузионная теория взвешивания, и движение двухфазного потока рассчитывается на основе механизма взвешивания и переноса твердых частиц, который отождествляется с механизмом турбулентного переноса. Гравитационная теория (синяя штриховка, область правее критической скорости и выше пунктирной линии) рассматривает механизм взвешивания тесным образом с характеристиками твердых частиц. Автор теории М.А. Великанов (в 1943 г.) [12] указывает, что твердые частицы вмешиваются в разрушение турбулентных образований и в механизм последующего перехода энергии турбулентности в теплоту через вязкое трение слоев жидкости. Для каждой из теории составлены дифференциальные уравнения и предложены методики расчета систем гидротранспорта.

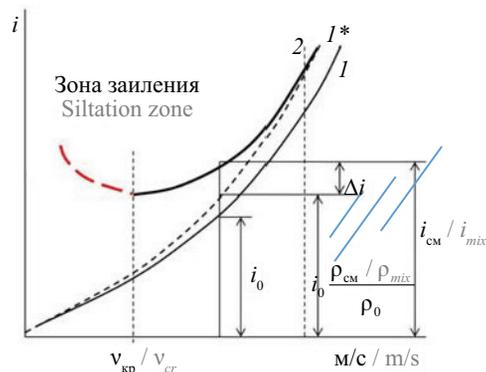


Рис. 2. Зависимость удельных потерь напора от средней скорости потока при движении воды (1) и гидросмеси (2) (I^* — условно однородная жидкость)

Fig. 2. Dependence of specific pressure losses on the average flow velocity during the movement of water (1) and hydraulic mixture (2) (I^* is a conditionally homogeneous liquid)

Область на рис. 2 левее критической скорости — область заиливания. При скоростях ниже критических потери напора растут из-за процесса осаждения твердых частиц. На рис. 3 представлены экспериментальные значения удельных потерь напора для гранулированных доменных шлаков (диаметр твердых частиц до 3 мм) и потоков с удельными весами, находящимися в диапазоне $\gamma_{см} = 1-1,5 \text{ кН/м}^3$. По вертикали i — в мм вод. ст. на единицу длины. На графике видно, что при транспортировке потоков со средней скоростью ниже критической потери напора растут по степенной зависимости и рост относительно минимального значения (соответствующего минимальным удельным потерям энергии в области критических скоростей) может достигать 60–65 процентов, следовательно, для этих условий формулы

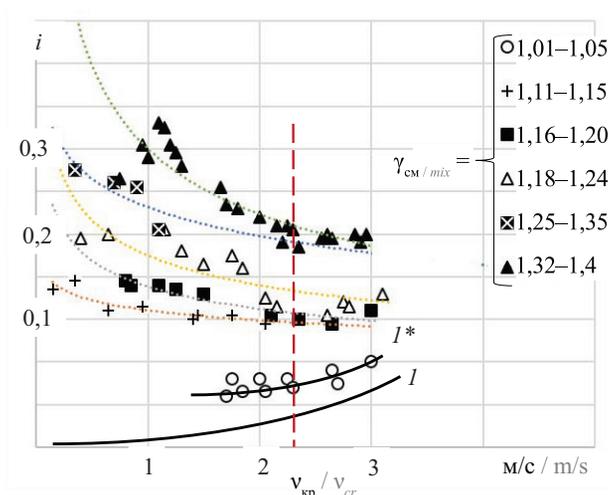


Рис. 3. Потери напора (в области заиливания) при скоростях меньше критических: I — вода; I^* — условно однородная жидкость

Fig. 3. Pressure losses (in the siltation area) at speeds less than critical: I — water; I^* — conditionally homogeneous liquid

(3) и (4) не применимы. Для потока, сопоставимого с удельным весом с рассматриваемым потоком, рост потерь напора составил 50 %.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что при скоростях ниже критической гидротранспортная система не может считаться эффективной.

Величина критической скорости зависит от диаметра трубопровода, плотности смеси, крупности частиц и для рассматриваемого потока равна (см. (5) и табл. 2) 2,08 м/с:

$$v_{кр} = 8,3\sqrt[3]{D\delta\sqrt{C_0\Psi}} \quad (5)$$

Следовательно, расход в пульпопроводе с внутренним диаметром 0,26 м должен быть не ниже: $Q_{кр} = v_{кр} \omega = 0,11 \text{ м}^3/\text{с}$. В противном случае будет образовываться слой заиления, формулы (1) и (2) не могут быть использованы, а рост потери напора может быть выше до 50 % от минимальных (при эффективном режиме транспортирования).

Проектному расходу пульпы 306,75 м³/час соответствует проектная средняя скорость смеси $v_{см.пр} = 1,64 \text{ м/с}$, значение которой ниже критической ($v_{см.пр} < v_{кр}$), и на дне трубопровода формируется неподвижный слой (осадок). При неравномерной работе фабрики в течение суток выраженная коэффициентами $K_1 = 1,15$ и $K_2 = 0,75$ скорость будет, соответственно, $v_1 = 1,2 \text{ м/с}$ и $v_2 = 2,41 \text{ м/с}$. Режимы транспортирования необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить работу системы без заиления (см. рис. 4). По оси ординат отложены средние скорости потока, точки — это средние скорости потока, рассчитанные для различных условий работы фабрики. Заштрихована область средних скоростей, соответствующая оптимальному режиму транспортирования.

Сопоставление рекомендованных средних скоростей транспортирования (соответствующих оптимальному режиму транспортирования — при минимальных удельных потерях напора и при отсутствии осадка) с проектными режимами ОФ показывает, что пульпопровод не будет работать эффективно, на дне трубопровода будет образовываться осадок, величину которого следует оценить и контролировать в процессе эксплуатации системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретические и экспериментальные исследования гидротранспорта позволили установить следующее:

- наиболее насыщенной твердыми частицами является нижняя, придонная область двухфазного потока; наибольшая масса твердых частиц движется в слое высотой от дна, равной примерно 1/3 диаметра трубы;
- верхняя часть горизонтального трубопровода занята водой, несущей мелкие и пылеватые частицы.

Первому и второму факторам удовлетворяет, в частности, эллиптическая форма сечения трубопровода с горизонтальной большой осью эллипса. В таком трубопроводе в слое высокой консистенции над дном может перемещаться больше грунта, чем в слое такой же толщины в круглом трубопроводе. Кроме того, относительно будет уменьшена область, не насыщенная твердым материалом, а турбулентное перемешивание в эллиптическом потоке будет интенсивнее, чем в круглом потоке того же расхода. Следовательно, транспортирующая способность эллиптического трубопровода должна быть больше, чем круглого.

Движение двухфазных потоков по круглым горизонтальным трубам с частичным заилением трубопровода приближается к гидротранспорту по эллип-

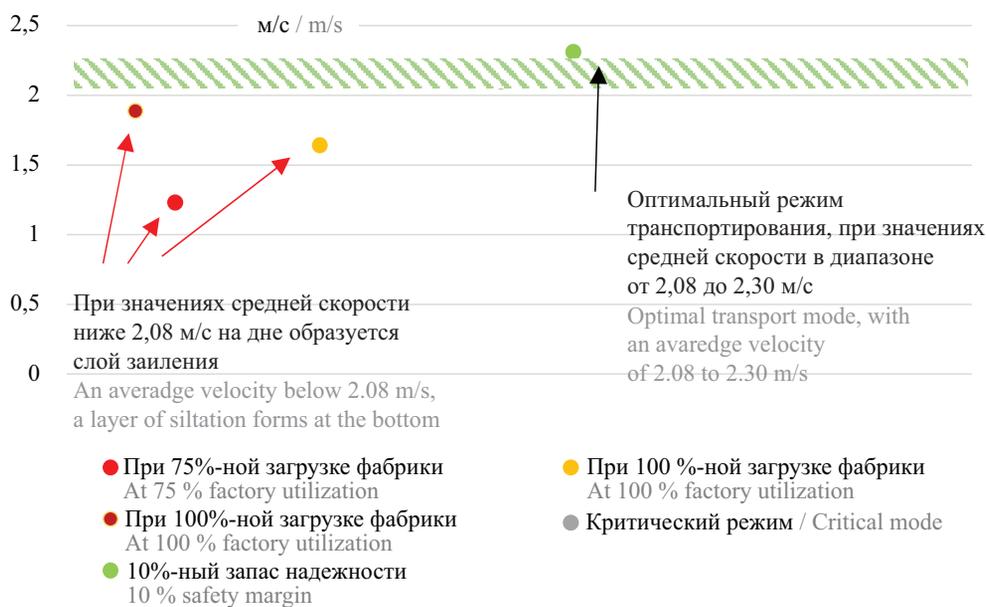


Рис. 4. Режимы транспортирования

Fig. 4. Modes of transportation

тическим трубам. Специальные исследования [12, 14] показали, что более выгодным можно считать заилиение, которое составляет 10–15 % диаметра трубы по высоте. По данным этих исследований установлено, что значение критической скорости в эллиптической трубе составляет 0,9 значения критической скорости в круглой трубе (такой же площади живого сечения).

Частичное заилиение трубопроводов может быть предусмотрено при проектировании гидротранспортной установки, поэтому необходимо производить расчет гидротранспорта по частично заиленным трубам. В то же время неправильно выполненный расчет гидротранспортной установки при незаиленном режиме может быть причиной того, что при некоторых условиях, например при значительном повышении консистенции гидросмеси, разработке более крупнозернистой породы или породы большей плотности против предусмотренной проектом, трубопровод может оказаться частично заиленным. В результате при таком заилиении образуется пробка или закупорка трубопровода.

При транспортировании «хвостов» слой заилиения является сборником для более тяжелых металлических частиц, что является способом дополнительного улавливания полезного металла или материала.

Удельные потери при гидротранспорте по частично заиленным трубам выше считаются как удельные потери напора на трение при движении воды по незаиленной трубе того же диаметра со скоростью, равной критической скорости движения (см. (5)), в которой вместо D используется значение гидравлического радиуса живого сечения трубопровода при выбранной степени заилиения.

Глубину заилиения $H_{\text{заил}}$ определяют по следующей формуле:

$$\frac{H_{\text{заил}}}{D} = 0,4 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{см}}}{Q} - 1}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{см}}$ — расход гидросмеси при $v_{\text{кр}}$; Q — заданный расход гидросмеси.

Формула (6) показывает, что чем меньше расход потока (а следовательно, чем левее по рис. 2 располагается средняя скорость транспортирования), тем больше образуется осадок (глубина заилиения) на дне трубопровода. При снижении расхода или аварийной остановки потока используются аварийные емкости или емкости для опорожнения пульпопроводов.

Как было указано ранее (рис. 2, 3), критической скорости соответствуют минимальные потери энергии. Величина полных потерь по длине всей трассы состоит из трех величин (линейные или потери по длине, местные и потери от перепада высот):

$$\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_M + \Delta H_{Hr} \quad (7)$$

Потери напора посчитаны для магистрального и распределительных трубопроводов по обычным формулам гидравлики для расчета трубопроводов:

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g} + h, \quad (8)$$

где λ — коэффициент гидравлических сопротивлений; L — длина трубопровода — 1740 м; D — диаметр трубопровода — 0,257 м; v — средняя скорость транспортирования; ζ — коэффициент местных сопротивлений; h — сумма геодезического перепада высот между началом и концом трубопровода (уровень пульпы в зумпфе и уровень наполнения хвостохранилища) и запаса на излив (3 м) — 82,0 м.

Коэффициент гидравлических сопротивлений считается согласно СНиП 2.05.07–85 (97) «Проектирование гидравлического транспорта»⁴ по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re} - 1,52)^2}, \quad (9)$$

где Re — число Рейнольдса.

Суммарные потери напора составили $\Delta H = 19,06 + 1,9 + 82 = 102,96$ м, местные потери напора приняты в размере 10 % от потерь напора по длине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. При средней проектной скорости движения двухфазного потока 1,89 м/с (соответствует расходу 0,098 м³/с и коэффициенту неравномерности работы $K_1 = 1,15$) — максимальная проектная скорость пульпы — на дне трубопровода твердые частицы будут осажаться.

2. При минимальном расходе пульпы 0,064 м³/с ($K_2 = 0,75$) на дне трубопровода будет формироваться максимальный по толщине слой заилиения.

3. Неравномерность расхода пульпы по времени (от 75 до 115 %) может привести к волновому эффекту срыва твердых частиц со дна трубопровода, что снижает технико-экономические характеристики эксплуатации всей системы гидротранспорта.

4. Рекомендуется транспортировать смесь со средней скоростью потока 2,3 м/с, что соответствует уровню $1,1v_{\text{кр}}$.

5. Начальный напор в пульпопроводе, согласно данным заказчика, соответствует 90,27 м, а суммарные потери напора составили 102,96 м, что показывает необходимость расположения пульпонасосной станции в месте соединения магистрального и распределительного трубопровода.

⁴ СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07–91* (дата введения: 2013-01-01). СНиП 2.05.07–85*. Промышленный транспорт (дата введения: 01.07.92).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алешков М.В., Волгина Л.В. Кинематические характеристики двухфазных потоков при гидробразивной резке // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 12. С. 1610–1618. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618. EDN MDNYHT.
2. Аникина С.А. Утилизация и переработка резервуарных и амбарных нефтешламов // Экологические чтения-2014. 2014. С. 102–105. EDN TMFQED.
3. Ржевский В.В. Открытые горные работы: Технология и комплексная механизация : учебник. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 552 с.
4. Федотов А.И., Шамсутдинов Э.В. Алгоритм расчета систем гидротранспорта водоугольной суспензии на объектах промышленной теплоэнергетики // Современные проблемы науки и образования 2013. № 1. С. 181–188. EDN PWAZHP.
5. Liu Y., Lv X., Zhou S., Pengfei Yu, Yun L., Bohui Sh. et al. Rheological study of low wax content hydrate slurries considering phase interactions // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. Vol. 94. Pp. 104–106. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104-106
6. Chen Y.C., Shi B.H., Fu Sh., Li Q., Yao H., Liu Ya. et al. Kinetic and rheological investigation of cyclopentane hydrate formation in waxy water-in-oil emulsions // Fuel. 2021. P. 119568. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119568
7. Ran F., Xu Ch., Chen Yu., Cong R, Fang G. Numerical flow characteristics of microencapsulated phase change slurry flowing in a helically coiled tube for thermal energy storage // Energy. 2021. Vol. 223. Pp. 120–128. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120128
8. Liu Z., Li Ya., Wang J., Zhang M., Liu W., Lang Chen et al. Rheological investigation of hydrate slurry with marine sediments for hydrate exploitation // Energy. 2022. Vol. 259. P. 124958. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124958
9. Ахмеров А.В., Осипов А.Л., Долгова А.Н., Файзуллина Г.Р. Энергосберегающая технология обезвреживания отработанного вторичного активного ила для последующего использования в качестве топливного вторичного энергетического ресурса // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2018 : мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. 2018. С. 230–234. EDN RCKLSF.
10. Беляков В.А., Купорова А.В. Добыча торфа в северной Якутии и экология // Актуальные проблемы машиноведения, безопасности и экологии в природопользовании : мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1. 2018. С. 305–310. EDN UWWBTA.
11. Волгина Л.В. Экспериментальное исследование вязкости двухфазного потока // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» 2017. 2017. С. 879–883. EDN XSNIMP.
12. Тарасов В.К., Гусак Л.Н., Волгина Л.В. Движение двухфазных сред и гидротранспорт : уч.-метод. пос. М., 2011.
13. Волгина Л.В., Гусев И.А. О гидравлическом сопротивлении при гидробразивной резке // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 3. С. 399–408. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.399-408. EDN OLJXFW.
14. Горбатов Ю.П., Мосейкин В.В., Хачатрян В.Д. О работе гидротранспорта в режиме частичного заполнения труб // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № S4. С. 376–381. EDN NENOHX.
15. Krishna R., Kumar K.N., Gupta K. CFD investigation of pressure drop reduction in hydrotransport of multisized zinc tailings slurry through horizontal pipes // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48. No. 43. Pp. 16435–16444. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.116
16. Абрамец В.С. Добыча песка и песчано-гравийной смеси в Приамурье средствами гидромеханизации // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». Екатеринбург, 4–5 апреля 2019 г. 2019. С. 109–112. EDN IUBMVK.
17. Cai L., Mi Sh., Luo Ch., Liu Zh. Numerical investigation of hydraulic and heat transfer characteristics of two-phase ice slurry in helically coiled tubes // Energy and Buildings. 2022. Vol. 256. P. 111773. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111773
18. Chami N., Salehy Ya., Burgner D., Delahaye A., Dalmazzone D., Pascal C. et al. Rheological study of mixed cyclopentane + CO₂ hydrate slurry in a dynamic loop for refrigeration systems // Energy. 2023. Vol. 263. P. 125661. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125661
19. Li B., Zhang T.T., Wan Q.C. Wei W., Chen L-L, Feng J-Ch. et al. Kinetic study of methane hydrate development involving the role of self-preservation effect in frozen sandy sediments // Applied Energy. 2021. Vol. 300. P. 117398. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117398
20. Chami N., Bendjenni S., Clain P., Fournaison L., Delahaye A., Osswald V. et al. Thermodynamic characterization of mixed gas hydrates in the presence of cyclopentane as guest molecule for an application in secondary refrigeration // Chemical Engineering Science. 2021. Vol. 244. P. 116790. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116790
21. Волгина Л.В., Медзвелья М.Л., Чемерис О.Г. Влияние мелкодисперсных включений на расчет критической скорости двухфазного потока // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 145–153. EDN SZCFEP.
22. Леонов А.М., Михеев В.А., Москаленко Т.В., Данилов О.С. Гидравлический расчет трубопровода от станции Угольная до Нерюнгринской ГРЭС // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S10. С. 404–408. EDN LRGVBD.
23. Jaworska-Jóźwiak, Dziubiński M. Effect of deflocculant addition on energy savings in hydrotransport

in the lime production process // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 11. P. 3869. DOI: 10.3390/en15113869

24. Ибад-Заде Ю.А., Гурбанов С.Г., Азизов С.Г., Алескеров В.Г. Гидравлика разноплотностного потока. М.: Стройиздат, 1982. 294 с.

25. Юфин А.П. Напорный гидротранспорт. М.: Энергоиздат, 1950.

26. Volgina L.V., Romanova A.A. Resistance coefficient of nonspherical solid particles in turbulent flow // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. мат. VI Междунар. науч. конф. 2018. С. 178–183. EDN YQGTVZ.

27. Волгина Л.В., Сергеев С.А., Романова А.А. О кинематических характеристиках селевых потоков // Гидротехническое строительство. 2018. № 10. С. 59–63. EDN YNAWUX.

28. Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Гроссу А.Н. Технология гидродобычи железной руды на месторождениях Курской магнитной аномалии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 3. С. 50–54. EDN TJYFTX.

29. Усова А.А. Порядок отработки мокрых песков открытым способом // Мат. IV Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 71–78. EDN ILQVOT.

30. Чебан А.Ю. Техническое оснащение предприятий по добыче нерудных строительных матери-

алов в Хабаровском крае // Механизация строительства. 2017. С. 23–26. EDN ZRRQLD.

31. Araya N., Ramirez Ye., Cisternas L.A., Kraslawski A. Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management // *Applied Energy*. 2021. Vol. 303. P. 117626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117626

32. Araya N., Ramirez Y., Kraslawski A., Cisternas L.A. Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 284. P. 112060. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112060

33. Babaev A., Teshabaeva E., Obidjonov A., Chorsanbiev U. Study of the hydraulic parameters of the flow of solid particles in the process of hydrotransport // *E3S Web of Conferences*. Tashkent: EcoSciences, 2023. Vol. 401. Pp. 30–34. DOI: 10.1051/e3sconf/202340103034

34. Pankov A., Pankova O. Modeling the concentration profile of the solid phase during hydrotransport of ore in pipes // *E3s web of conferences: X International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-X 2024)*, Termez, Uzbekistan, 29–30 апреля 2024 года. Vol. 548. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. P. 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/202454808009

Поступила в редакцию 30 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Людмила Всеволодовна Волгина — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus AuthorID: 57208499016, ORCID: 000-0002-2349-5005, ResearcherID: AAC-3242-2022, SPIN-код: 3032-5165, РИНЦ ID: 289878; VolginaLV@gic.mgsu.ru;

Станислав Алексеевич Сергеев — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Stanislav_sergeev91@mail.ru;

Анастасия Андреевна Романова — главный специалист; Акционерное общество «Институт «Оргэнергострой» (АО ОЭС); 115114, г. Москва, Дербеневская набережная, д. 7, стр. 10; Scopus AuthorID: 57208482859, ORCID: 0000-0003-3467-4495, SPIN-код: 4296-6925, РИНЦ ID: 969058; anastasiya.a.romanova@yandex.ru.

Вклад авторов:

Волгина Л.В. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Сергеев С.А. — идея и написание статьи.

Романова А.А. — сбор и обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aleshkov M.V., Volgina L.V. Kinematic characteristics of two-phase flows during waterjet cutting. *Bulletin of MGSU*. 2019; 14(12):1610-1618. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618. EDN MDNYHT. (rus.).

2. Anikina S.A. Utilization and processing of tank and barn oil sludge. *Environmental readings-2014*. 2014; 102-105. EDN TMFQED. (rus.).

3. Rzhetskij V.V. *Open-pit mining: Technology and complex mechanization: textbook*. Moscow, LIBRO-COM Book House, 2013; 552. (rus.).

4. Fedotov A.I., Shamsutdinov E.V. Algorithm of calculation and design of coal water slurry hydrotransport. *Modern problems of science and education*. 2013; 1:181-188. EDN PWAZHP. (rus.).

5. Liu Y., Lv X., Zhou S., Pengfei Yu, Yun L., Bohui Sh. et al. Rheological study of low wax content hydrate slurries considering phase interactions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 94:104-106. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104-106
6. Chen Y.C., Shi B.H., Fu Sh., Li Q., Yao H., Liu Ya. et al. Kinetic and rheological investigation of cyclopentane hydrate formation in waxy water-in-oil emulsions. *Fuel*. 2021; 119:568. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119568
7. Ran F., Xu Ch., Chen Yu., Cong R, Fang G. Numerical flow characteristics of microencapsulated phase change slurry flowing in a helically coiled tube for thermal energy storage. *Energy*. 2021; 223:120128. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120128
8. Liu Z., Li Ya., Wang J., Zhang M., Liu W., Lang Chen et al et al. Rheological investigation of hydrate slurry with marine sediments for hydrate exploitation. *Energy*. 2022; 259:124958. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124958
9. Ahmerov A.V., Osipov A.L., Dolgova A.N., Fajzullina G.R. Energy-saving technology for dewatering spent secondary activated sludge for subsequent use as a fuel secondary energy resource. *Innovative engineering technologies, equipment and materials 2018 : proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference*. 2018; 1:230-234. EDN RCKLSF. (rus.).
10. Belyakov V.A., Kuporova A.V. Peat extraction in Northern Yakutia and ecology. *Current issues of mechanical engineering, safety and ecology in nature management : materials of the IV-th International Scientific and Practical Conference : in 2 parts. Part 1*. 2018; 305-310. EDN UWWBTA. (rus.).
11. Volgina L.V. Experimental study of the viscosity of a two-phase flow. Integration, partnership and innovation in construction science and education : collection of materials of the international scientific conference. *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" 2017*. 2017; 879-883. EDN XSNIMP. (rus.).
12. Tarasov V.K., Gusak L.N., Volgina L.V. *Movement of two-phase media and hydraulic transport : an educational and methodical manual*. Moscow, 2011. (rus.).
13. Volgina L.V., Gusev I.A. Hydraulic resistance during waterjet cutting. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(3):399-408. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.399-408. EDN OLJXFW. (rus.).
14. Gorbatov Yu.P., Mosejkin V.V., Hachatryan V.D. On the operation of hydraulic transport in the mode of partial silting of pipes. *Mountain information and analytical bulletin*. 2006; S4:376-381. EDN NENOHX. (rus.).
15. Krishna R., Kumar N., Gupta P.K. CFD investigation of pressure drop reduction in hydrotransport of mult-sized zinc tailings slurry through horizontal pipes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(43):16435-16444. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.116
16. Abramec V.S. Extraction of sand and sand-gravel mixture in the Amur region by means of hydro-mechanization. *Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits : VIII international scientific and technical conference "Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits". Ekaterinburg, April 4-5, 2019*. 2019; 109-112. (rus.). EDN IUBMVK.
17. Cai L., Mi Sh., Luo Ch., Liu Zh. Numerical investigation of hydraulic and heat transfer characteristics of two-phase ice slurry in helically coiled tubes. *Energy and Buildings*. 2022; 256:111773. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111773
18. Chami N., Salehy Ya., Burgner D., Delahaye A., Dalmazzone D., Pascal C. et al. Rheological study of mixed cyclopentane + CO₂ hydrate slurry in a dynamic loop for refrigeration systems. *Energy*. 2023; 263:125661. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125661
19. Li B., Zhang T.T., Wan Q.C. Wei W., Chen L-L., Feng J-Ch. et al. Kinetic study of methane hydrate development involving the role of self-preservation effect in frozen sandy sediments. *Applied Energy*. 2021; 300:117398. DOI: 10.1016 / j.apenergy. 2021. 117398
20. Chami N., Bendjenni S., Clain P., Fournaison L., Delahaye A., Osswald V. et al. Thermodynamic characterization of mixed gas hydrates in the presence of cyclopentane as guest molecule for an application in secondary refrigeration. *Chemical Engineering Science*. 2021; 244:116790. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116790
21. Volgina L.V., Medzveliia M.L., Chemeris O.G. The influence of fine inclusions on the calculation of the critical velocity of a two-phase flow. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2014; 1:145-153. EDN SZCFEP. (rus.).
22. Leonov A.M., Miheev V.A., Moskalenko T.V., Danilov O.S. Hydraulic calculation of the pipeline from Ugolnaya station to Neryungrinskaya GRES. *Mining information and analytical bulletin*. 2009; S10:404-408. EDN LRGVBD. (rus.).
23. Jaworska-Józwiak B., Dziubiński M. Effect of Deflocculant Addition on Energy Savings in Hydrotransport in the Lime Production Process. *Energies*. 2022; 15(11):3869. DOI: 10.3390/en15113869
24. Ibad-Zade Yu.A., Gurbanov S.G., Azizov S.G., Aleskerov V.G. *Hydraulics of multi-density flow*. Moscow, Stroyizdat, 1982; 294. (rus.).
25. Yufin A.P. *Pressure hydraulic transport*. Moscow, Energoizdat, 1950. (rus.).
26. Volgina L.V., Romanova A.A. Resistance coefficient of nonspherical solid particles in turbulent flow. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : proceedings of the VI International Scientific Conference*. 2018; 178-183. EDN YQGTVZ.
27. Volgina L.V., Sergeev S.A., Romanova A.A. On kinematic characteristics of mudflows. *Hydraulic en-*

gineering construction. 2018; 10:59-63. EDN YNAWUX. (rus.).

28. Tret'yak A. Ya., Litkevich Yu.F., Grossu A.N. Technology of hydraulic extraction of iron ore at the deposits of the Kursk magnetic anomaly. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 3:50-54. EDN TJYFTX. (rus.).

29. Usova A.A. The procedure for processing wet sands in an open way. *Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2019; 71-78. EDN ILQVOT. (rus.).

30. Cheban A.Yu. Technical equipment of enterprises for the extraction of non-metallic building materials in the Khabarovsk Territory. *Mechanization of construction*. 2017; 23-26. EDN ZRRQLD. (rus.).

31. Araya N., Ramírez Ye., Cisternas L.A., Kraslawski A. Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management. *Applied Energy*. 2021; 303:117626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117626

32. Araya N., Ramírez Y., Kraslawski A., Cisternas L.A. Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*. 2021; 284: 112060. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112060

33. Babaev A., Teshabaeva E., Obidjonov A., Chorshanбиеv U. Study of the hydraulic parameters of the flow of solid particles in the process of hydrotransport. *E3S Web of Conferences, Tashkent, 2023*. Tashkent, EcoSciences, 2023; 401:30-34. DOI: 10.1051/e3sconf/20234010-3034

34. Pankov A., Pankova O. Modeling the concentration profile of the solid phase during hydrotransport of ore in pipes. *E3s web of conferences : X International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-X 2024), Termez, Uzbekistan, 29–30 Aprilia 2024. Vol. 548*. Les Ulis, EDP Sciences, 2024; 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/202454808009

Received January 30, 2024.

Adopted in revised form on November 10, 2024.

Approved for publication on November 10, 2024.

B I O N O T E S : **Lyudmila V. Volgina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57208499016, ORCID: 000-0002-2349-5005, ResearcherID: AAC-3242-2022, SPIN-code: 3032-5165, ID RSCI: 289878; VolginaLV@gic.mgsu.ru;

Stanislav A. Sergeev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Stanislav_sergeev91@mail.ru;

Anastasia A. Romanova — Chief Specialist; **Joint Stock Company “Institute “Orgenergostroy” (JSC IOES)**; 7 Derbenevskaya emb., build. 10, Moscow, 115114, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57208482859, ORCID: 0000-0003-3467-4495, SPIN-code: 4296-6925, ID RSCI: 969058; anastasiya.a.romanova@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Lyudmila V. Volgina — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Stanislav A. Sergeev — the idea and writing of the article.

Anastasia A. Romanova — collection and processing of material.

The authors declare that there is no conflict of interest.