

## Определение рациональных параметров для безостановочной работы гидротранспортных систем в условиях низких температур

С.Ю. Авксентьев ✉, В.И. Белоусов

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ Avksentev\_SYu@pers.spmi.ru

**Резюме:** В работе определяются параметры гидравлической системы транспортирования гидросмеси, оказывающие основное влияние на безотказность работы гидротранспортных систем горных предприятий в условиях низких температур. Установлена закономерность гидравлического и теплового взаимодействия структурных элементов напорного гидротранспорта для выбора режимов работы пульповодов в условиях отрицательных температур, на основании которой разработан алгоритм, при котором формирование автоматической системы контроля параметров гидросистемы и наличия подсистемы моделирования и прогнозирования внутренних процессов, происходящих в трубопроводе, возможно организовать процесс транспортирования, при котором корректировка температурных параметров гидросистемы происходит не по средствам внешних воздействий, а внутренними силами самой системы. Предложено использование зависимости удельного тепла трения от параметров скорости движения потока диаметра трубопровода, отношение жидкой и твердой фаз и плотность гидросмеси в условиях транспортирования хвостов обогащения медных руд при постоянной объемной концентрации, с целью формирования методики, приводящей систему транспортирования высококонцентрированных хвостов обогащения медных руд к автоматически поддерживаемому режиму работы.

**Ключевые слова:** параметры гидротранспорта, хвосты обогащения, трубопроводный транспорт, работа в условиях низких температур

**Для цитирования:** Авксентьев С.Ю., Белоусов В.И. Определение рациональных параметров для безостановочной работы гидротранспортных систем в условиях низких температур. *Горная промышленность*. 2025;(1S):86–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91>

## Determination of rational parameters for non-stop operation of hydraulic transport systems in low temperature conditions

S.Yu. Avksentiev ✉, V.I. Belousov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ Avksentev\_SYu@pers.spmi.ru

**Abstract:** The paper determines the parameters of slurry transportation systems that have a major impact on failure-free operation of hydraulic transport systems of mining enterprises in conditions of low temperatures. A regularity of hydraulic and thermal interaction of the structural elements of pump-operated hydraulic transport has been established for selection of operating modes for the slurry pipelines in conditions of negative temperatures. This regularity was used to develop an algorithm, in which the created automatic system to control parameters of the hydraulic system and the presence of a subsystem for modeling and predicting the internal processes that take place in the pipeline, makes it possible to arrange the transportation process, in which the correction of temperature parameters of the hydraulic system is based on internal forces of the system, but not on external factors. It is proposed to use the dependence of the specific friction heat on the values of the flow velocity, the pipeline diameter, the ratio of the liquid and solid phases, and the density of the slurry for conditions of pumping copper ore tailings with a constant volume concentration, in order to form a methodology that maintains an automatic operation mode of the hydraulic transport system for highly concentrated copper ore tailings.

**Keywords:** hydraulic transport parameters, concentration tailings, pipeline transport, low temperatures, operation in conditions of low temperatures

**For citation:** Avksentiev S.Yu., Belousov V.I. Determination of rational parameters for non-stop operation of hydraulic transport systems in low temperature conditions. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):86–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91>

## Введение

В условиях современного горного производства гидротранспортные системы играют ключевую роль в обеспечении эффективной и безопасной транспортировки полезных ископаемых и продуктов их переработки. Однако с учетом глобальных климатических изменений и увеличения числа горных предприятий, работающих в регионах с низкими температурами, проблема обеспечения безостановочной работы этих систем становится особенно актуальной. Наибольшие трудности при эксплуатации трубопроводов гидротранспортных систем, находящихся в районах с суровыми климатическими условиями, возникают в зимний период года. В это время при транспортировании гидросмеси по трубам возможно образование слоя льда на внутренней стенке пульповода, что вызывает осложнения при эксплуатации системы. В нерабочем состоянии внутреннее оледенение может привести к возникновению условий, при которых последующий размыв льда путём его оттаивания протекающей гидросмесью становится невозможным, т.е. возможно полное промерзание пульповода, таким образом низкие температуры могут вызывать замерзание рабочей жидкости, что приводит к авариям, увеличению затрат на обслуживание и, в конечном итоге, снижению производительности [1].

Уменьшение времени реагирования служб и систем предприятий, направленных на предотвращение аварийных ситуаций, достигается путем внедрения автоматизированных систем мониторинга и управления входными параметрами гидротранспортной системы. В тоже время использование современных материалов и технологий поддержания оптимальной температуры транспортируемой среды для предотвращения замерзания водной фазы в совокупности с мониторингом основных параметров в условиях низких температур, позволяет сократить затраты на техническое обслуживание и простои, связанные с возникновением аварийных ситуаций. Характерные параметры позволят определить условия формирования и поддержания режима движения гидросмеси, при котором тепловые процессы, формирующиеся в результате транспортирования, позволят перейти к самоподдерживающемуся тепловому режиму транспортирования хвостов обогащения в условиях отрицательных температур.

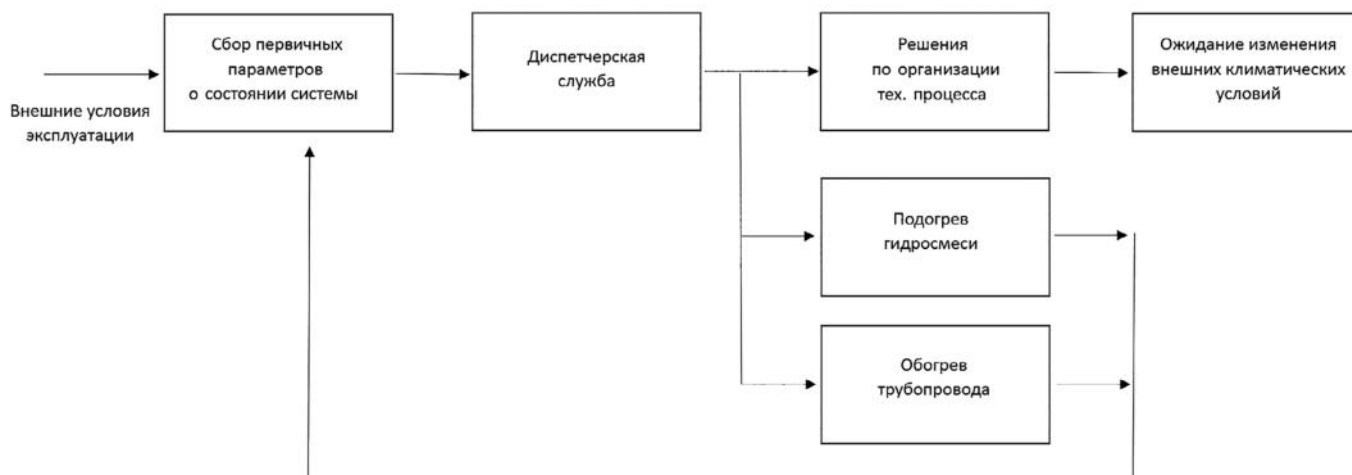
Определение рациональных параметров для безостановочной и безаварийной работы гидротранспортных систем в условиях отрицательных температур представляет собой комплексную и важную задачу, для решения которой требуется учесть множество параметров, характерных для подобных условий эксплуатации. Оптимизация гидравлических параметров позволяет минимизировать риск замерзания и обеспечить стабильность работы системы при условии, что параметры структурных элементов системы напорного гидротранспорта формируются под влиянием совокупности гидравлических, тепловых и климатических условий.

Кроме того, выбор материалов и технологий, устойчивых к низким температурам, становится очень важным. Использование современных теплоизоляционных материалов может значительно снизить теплопотери и предотвратить замерзание, что, в свою очередь, повысит надежность и долговечность систем. В свою очередь, внедрение автоматизированных систем мониторинга и управления позволяет оперативно реагировать на изменения температурных условий, что повышает безопасность эксплуатации гидротранспортных систем [2].

## Методы

Трубопроводный транспорт является одной из немногих транспортных систем на горном предприятии, поддающихся полной автоматизации [3–5]. Поэтому для предотвращения остановки работы гидротранспортных систем хвостов обогатительной фабрики на предприятиях создаются диспетчерские службы, контролирующие параметры гидравлической системы и климатические условия. Такие службы вносят корректировки в выходные параметры вспомогательных систем, таких как подогрев пульпы или обогрев трассы трубопровода, а также в организацию процессов работы, для предотвращения или компенсации негативного воздействия из-за остановки всей системы (рис. 1).

Тем не менее, применение подогрева пульпы или теплоизоляция трассы трубопроводов в каждом отдельно взятом случае становится вопросом технико-экономического обоснования. Однако практика демонстрирует, что даже долгосрочная экономия на подогреве пульпы или отказ



**Рис. 1**  
Схема процесса контроля тепловых параметров обогатительных предприятий  
Источник: [Выполнено автором]

**Fig. 1**  
A process flow diagram for controlling thermal parameters at processing plants  
Source: [Compiled by the author]

от термоизоляции оказывается ничтожной по сравнению с потерями, вызванными остановкой производственного процесса [6, 7].

Для выявления основных параметров, главным образом влияющих на работу гидротранспортной системы в условиях низких температур, на основании зависимостей уравнений теплового баланса, при условии влияния распределения концентрации твердых частиц в потоке на интенсивность тепло- и массообмена в поперечном сечении трубы, так как в отличие от однородных жидкостей системы гидротранспорта хвостов обогащения работают со слоями заиливания, что вносит существенную корректировку в картину распределения теплового потока по окружности трубы [8, 9].

Исходя из утверждения, что совокупность процессов замерзания и повреждения пульпопроводов представляет собой сложное явление, включающее взаимодействие распределения температур, теплообмена и их последствий в системе «гидросмесь – трубопровод – окружающая среда», необходимо сформировать представление о значимости параметров гидротранспортной системы на основании зависимостей Ю.В. Бубиса (1) и Г.А. Нурика (2) и определить рациональные параметры для увеличения показателей надежности системы транспортирования высоковязких гидросмесей в условиях низких температур, путем анализа значимости влияния гидравлических параметров на критическую длину транспортирования гидросмеси при изменении внешних температурных условий и скорости движения потока высоковязких сред, относительно формирования тепловой энергии по средствам совершения механической работы потока, которая выражается через диссипативную функцию предложенную Мирзаджанзаде А.Х. (3) [10]:

$$L_6 = 12,96 \frac{Q \cdot \gamma \cdot C}{\mu} \cdot \ln \frac{1537,2 \cdot \mu \cdot (t_n - \theta) - \gamma \cdot Q \cdot i}{1537,2 \cdot \mu \cdot (t_k - \theta) - \gamma \cdot Q \cdot i}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход гидросмеси, м<sup>3</sup>/ч;  $\gamma$  – плотность гидросмеси, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость гидросмеси, ккал/кг·град;  $t_n$  и  $t_k$  – начальная и конечная температура пульпы, °С;  $i$  – гидравлический уклон;  $\theta$  – температура окружающей среды, °С;  $\mu = k \cdot \pi \cdot D$ .

$$L_n = \frac{\gamma \cdot Q \cdot C}{k \cdot \pi \cdot D} \ln \frac{t_n - \theta}{t_k - \theta}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  $D$  – наружный диаметр трубопровода, м.

$$V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = a_n \sum_i \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \frac{(\eta \cdot h_1 + \tau_0) \cdot h_1}{\gamma \cdot C_p \cdot E}, \quad (3)$$

где  $V$  – скорость движения гидросмеси, м/с,  $T$  – температура пульпы, К;  $a_n$  – коэффициент температуропроводности гидросмеси;  $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с;  $h_1$  – интенсивность скоростей;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига, Па;  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $E$  – модуль Юнга, МПа.

## Результаты

В условиях сурового климата Крайнего Севера обеспечение надежной работы трубопроводов достигается за счет регулирования и поддержания температуры гидросмеси в пределах, соответствующих эксплуатационным требованиям. Одним из эффективных способов сохранения

внутренней температуры гидросмеси и защиты трубопроводов от неблагоприятного воздействия внешней среды является подземная укладка трассы трубопроводов [11, 12]. Однако этот метод имеет существенный недостаток – значительное увеличение капитальных и эксплуатационных затрат. Это объясняется тем, что каждый дополнительный метр заглубления трубопровода увеличивает стоимость укладки трассы на 20–35% в зависимости от характеристик грунта [13, 14]. Кроме того, высокая абразивность транспортируемой гидросмеси требует постоянного мониторинга состояния трубопровода и регулярного поворота его участков вокруг оси для обеспечения равномерного износа. Именно по этим причинам трубопроводы, предназначенные для транспортировки сыпучих и абразивных материалов, чаще всего прокладываются на поверхности [15].

При наземной укладке трубопроводов для поддержания необходимой температуры гидросмеси используются теплозащитные покрытия или системы подогрева. Однако подходы к утеплению трубопроводов разрабатываются индивидуально для конкретных условий, что зачастую приводит к противоречивым рекомендациям о необходимости теплоизоляции. Стоит отметить, что утепление пульпопроводов связано с существенными затратами и значительно усложняет эксплуатацию трубопроводной трассы [16].

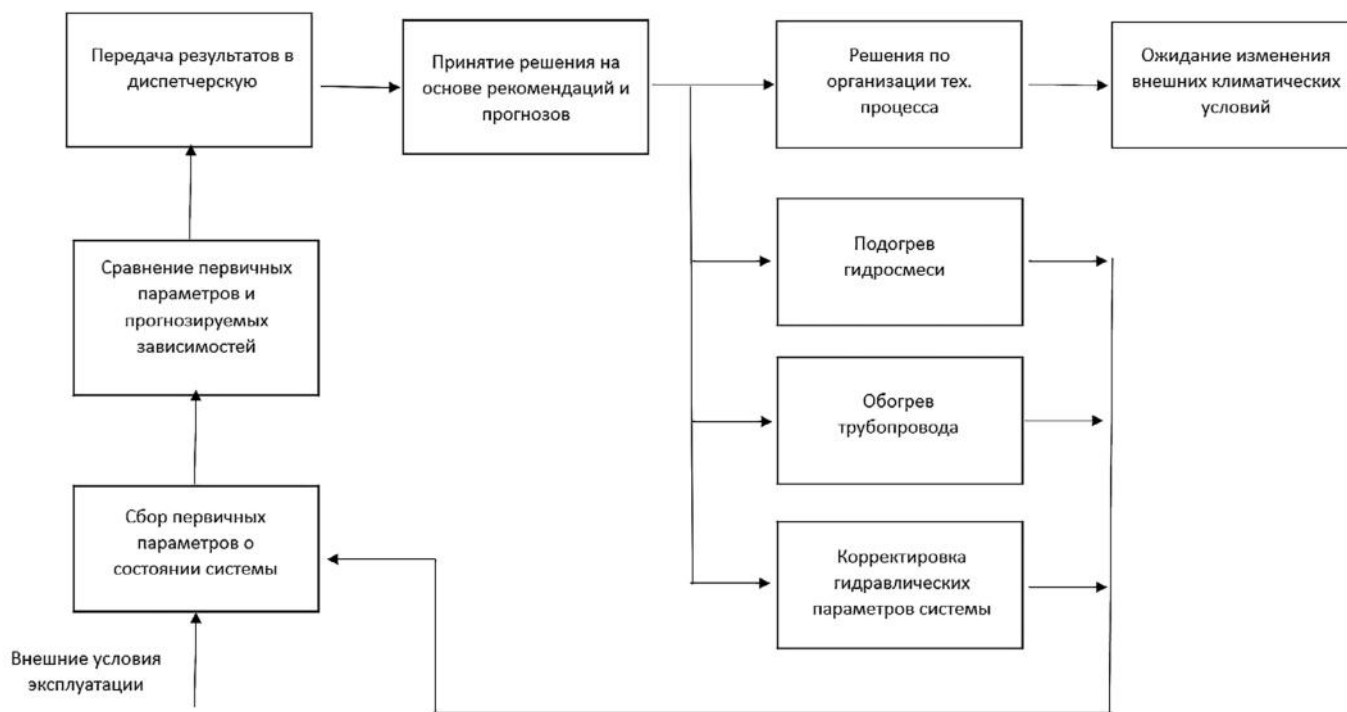
В условиях эксплуатации систем гидротранспорта при низких температурах для поддержания необходимой температуры гидросмеси применяется попутный или локальный подогрев. В качестве источников тепла при попутном подогреве применяется прокладка греющего кабеля, система теплообмена «труба в трубе» с использованием пара, поставляемого от ТЭЦ или систем теплофикации. В качестве локального подогрева чаще всего применяется добавление в промежуточные зумпфы горячей воды от ранее упомянутых систем теплофикации и локальных ТЭЦ [17].

## Обсуждение результатов

На основании ранее приведенных при описании методов зависимостей (1), (2) и (3), при условии, что начальные и конечные температуры являются целевыми параметрами, основными величинами, требующими предварительного контроля для формирования модели прогнозирования тепловых процессов, происходящих в теле гидросмеси, являются диаметр трубопровода, отношение жидкой и твердой фаз, скорость потока и плотность гидросмеси. В то же время наряду с приведенными параметрами будет влиять состав гидросмеси, так как при добычи медных руд в составе породы присутствуют глины, которые остаются в хвостах после процесса обогащения и вносят существенные изменения в процесс формирования тепла трения, и оказывают влияние на гидравлические параметры гидросмеси.

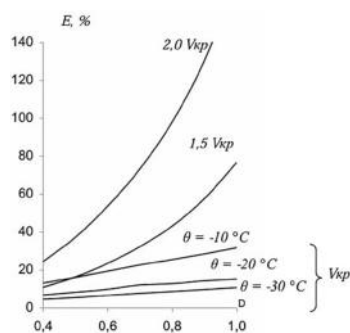
Однако существуют определенные особенности, связанные с моделированием тепловых процессов в трубопроводном транспорте горного предприятия. В частности, с увеличением диаметра трубопровода критическая скорость потока возрастает, при этом потери напора снижаются, но расход пульпы растет быстрее, что приводит к увеличению энергозатрат на транспортирование [5; 18; 19].

Кроме того, выделение тепла в процессе транспортирования увеличивается более интенсивно, чем теплопотери, вызванные ростом поверхности теплоотдачи трубопровода. В результате при определенных условиях температура пульпы начинает повышаться. Таким образом при формировании автоматической системы контроля параметров гидросистемы, при условии наличия подсистемы моде-

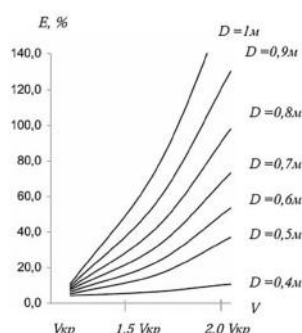


**Рис. 2**  
 Схема взаимодействия системы гидротранспорта при автоматизированной системе  
 Источник: [Выполнено автором]

**Fig. 2**  
 A schematic diagram of the interactions within a hydraulic transport system with an automated control system  
 Source: [Compiled by the author]



**Рис. 3**  
 Зависимость удельного значения тепла трения  $\varepsilon = f(D, V)$  в общих тепловых потерях при постоянной объемной концентрации  
 Источник: [17]



**Fig. 3**  
 Dependence of the specific value of friction heat  $\varepsilon = f(D, V)$  in total heat losses at constant volume concentration  
 Sources: [17]

лирования и прогнозирования дальнейших процессов, происходящих в трубопроводе, возможно организовать процесс транспортирования, при котором корректировка температурных параметров гидросистемы происходит не по средствам внешних воздействий, а внутренними силами самой системы. Принцип организации работы предполагаемой системы представлен на рис. 2.

Явление повышения температуры гидросмеси в процессе транспортирования связано с ростом гидравлического сопротивления, которое усиливает энергозатраты, в то время как уровень тепловых потерь между стенкой пульпопровода и окружающей средой остается практически неизменным. При этом влияние скорости потока на величину тепла, возникающего в результате трения, становится более заметным с увеличением диаметра трубопровода [20]. Особенно важно учитывать тепло, выделяемое в результате трения

в условиях, когда фактическая скорость потока существенно превышает критическую, а также при эксплуатации трубопроводов большого диаметра. Зависимость удельного тепла трения от параметров скорости движения потока и внутреннего диаметра трубопровода в условиях транспортирования хвостов обогащения полиметаллических руд при постоянной объемной концентрации приведена на рис. 3 [17].

### Заключение

В работе исследованы рациональные параметры для безостановочной работы гидротранспортных систем при транспортировании высококонцентрированной гидросмеси хвостов обогащения полиметаллических руд в условиях отрицательных температур, что является основой для решения проблемы возникновения аварий вследствие замерзания гидросмеси в трубопроводе и возникновения пробок на участке трассы. Кроме того, оптимизация гидравлических параметров, таких как скорость потока, диаметр труб и плотность гидросмеси, является необходимым условием для минимизации риска образования льда, что важно для поддержания стабильной и безостановочной работы гидравлической системы. В то же время использование зависимости удельного тепла трения от определенных параметров способствует формированию методики, по средствам которой возможно привести систему транспортирования высококонцентрированных хвостов обогащения медных руд к автоматически поддерживаемому режиму работы.

Установлена закономерность гидравлического и теплового взаимодействия структурных элементов напорного гидротранспорта для выбора режимов работы пульповодов в условиях отрицательных температур, на ее основании разработан алгоритм при котором формирование автоматической системы контроля параметров гидросистемы и наличия подсистемы моделирования и прогнози-



рования внутренних процессов, происходящих в трубопроводе, возможно организовать процесс транспортирования, при котором корректировка температурных параметров гидросистемы происходит не по средствам внешних воздействий, а внутренними силами самой системы, что позволит минимизировать негативный эффект и сократить эксплуатационные затраты.

Однако, применение материалов и технологий, устойчивых к воздействию отрицательных температур, включая теплоизоляцию трубопроводов и подогрев пульпы, наряду с автоматизированными системами, все также позволяет избежать замерзания водной фазы в гидросистеме, что дополнительно повышает надежность и эффективность работы гидротранспортных систем.

#### Вклад авторов

**С.Ю. Авксентьев** – определил основные цели и задачи исследования, руководство процессом сбора теоретических данных, анализом и обработкой собранных материалов.

**В.И. Белоусов** – написал основные разделы статьи, провел анализ существующих методов и методик.

#### Authors' contribution

**S.Yu. Avksentiev** – definition of the main goals and objectives of the research, guidance on collection of theoretical data, analysis and processing of the collected materials.

**V.I. Belousov** – writing the main sections of the article, analysis of the existing methods and techniques.

#### Список литературы / References

1. Safiullin R., Efremova V., Ivanov B. The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of the integrated control system of a highly automated vehicle. *The Open Transportation Journal*. 2024;18:e18744478309909. <https://doi.org/10.2174/0118744478309909240807051315>
2. Сафиуллин Р. Н., Сафиуллин Р. Р., Ефремова В. А. Метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем на горных машинах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):49–63. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_49](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_49)  
Safiullin R. N., Safiullin R. R., Efremova V. A. Method of complex assessment of on-board information and control systems on mining machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):49–63. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_49](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_49)
3. Safiullin R., Epishkin A., Safiullin R., Naotian T. Method of forming an integrated automated control system for intelligent objects. In: *Ceur workshop proceedings: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems"* (ITIDMS-II-2021). Aachen, Germany; 2021, pp. 17–26.
4. Авксентьев С.Ю., Махараткин П.Н., Александров В.И., Сафиуллин Р.Н. Определение удельных потерь напора при гидротранспорте хвостов Качканарского ГОКа. *Обогащение руд*. 2022;(3):45–50. <https://doi.org/10.17580/or.2022.03.08>  
Avksentyev S.Yu., Makharatkin P.N., Safiullin R.N., Aleksandrov V.I. Specific pressure loss calculations for tailings hydrotransport at the Kachkanar GOK. *Obogashchenie Rud*. 2022;(3):45–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2022.03.08>
5. Safiullin R.N., Safiullin R.R., Sorokin K.V., Kuzmin K.A., Rudko V.A. Integral assessment of influence mechanism of heavy particle generator on hydrocarbon composition of vehicles motor fuel. *International Journal of Engineering*. 2024;37(8):1700–1706. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.08b.20>
6. Матюшенко А.И., Красавин Г.В. Особенности проектирования водозаборов в условиях Севера. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2018;11(1):116–122. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0015>  
Matiushenko A.I., Krasavin G.V. Features of designing water reservoirs in the conditions of the north. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018;11(1):116–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0015>
7. Александров В.И., Власак П. Методика расчета потерь напора при гидротранспорте сгущенных пульп хвостов обогащения руд. *Записки Горного института*. 2015;216:38–43. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5163> (дата обращения: 06.01.2025).  
Aleksandrov V.I., Vlasak P. Design procedure of pressure losses for hydrotransport of the high concentration pulps. *Journal of Mining Institute*. 2015;216:38–43. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5163> (accessed: 06.01.2025).
8. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(3):895–908. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908>  
Zhukovsky Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):895–908. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908>
9. Николаев А.К., Зарипова Н.А. Обоснование аналитических зависимостей для гидравлического расчета транспорта высоковязких нефтей. *Записки Горного института*. 2021;252:885–895. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.10>  
Nikolaev A.K., Zaripova N.A. Substantiation of analytical dependences for hydraulic calculation of high-viscosity oil transportation. *Journal of Mining Institute*. 2021;252:885–895. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.10>
10. Козлов Д.В. Решение ледовых проблем строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. *Гидротехническое строительство*. 2014;(1):52–53.  
Kozlov D.V. Solution of ice problems in construction and operation of hydraulic facilities. *Gidrotekhnicheskoe Stroitelstvo*. 2014;(1):52–53. (In Russ.)

11. Жарницкий В.Я., Андреев Е.В. Анализ взаимодействия ледового покрова с гидротехническими сооружениями. *Природообустройство*. 2019;(4):48–54. <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-4-48-54>  
Zharnitskiy V.Ya., Andreev E.V. Analysis of the interaction of the ice cover with hydro technical structure. *Prirodoobustrojstvo*. 2019;(4):48–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-4-48-54>
12. Жарницкий В.Я., Андреев Е.В. Влияние нагрузок от движущегося ледового покрова на гидротехнические сооружения. *Природообустройство*. 2020;(1):65–71.  
Zharnitskiy V.Ya., Andreev E.V. Loads impact of the moving ice cover on hydraulic structures. *Prirodoobustrojstvo*. 2020;(1):65–71. (In Russ.)
13. Григорьев В.В., Захаров П.Е., Кондаков А.С., Ларионова И.Г. Расчет условий совместной прокладки трубопроводов надземным способом. *Математические заметки СВФУ*. 2017;24(3):78–89. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/links/ba703de6b17afef4d751d113fd98d0b7/svf192.pdf> (дата обращения: 06.01.2025).  
Grigoriev V.V., Zakharov P.E., Kondakov A.S., Larionova I.G. Calculation of conditions for joint laying of overground pipelines. *Mathematical Notes of NEFU*. 2017;24(3):78–89. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/links/ba703de6b17afef4d751d113fd98d0b7/svf192.pdf> (accessed: 06.01.2025).
14. Шариков Ю.В., Маркус А.А. Математическое моделирование тепловых потоков в трубопроводах и трубчатых объектах. *Записки Горного института*. 2013;202:235–238. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5697> (дата обращения: 06.01.2025).  
Sharikov Y.V., Markus A.A. Mathematical modeling of heat transfer in pipelines and pipe's objects. *Journal of Mining Institute*. 2013;202:235–238. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5697> (accessed: 06.01.2025).
15. Сержан С.Л., Скребнев В.И., Малеванный Д.В. Исследование влияния шероховатости стальных и полимерных труб на потери напора при гидротранспорте хвостовой пульпы. *Обогащение руд*. 2023;(4):41–49. <https://doi.org/10.17580/or.2023.04.08>  
Serzhan S.L., Skrebnev V.I., Malevanny D.V. Study of the effects of steel and polymer pipe roughness on the pressure loss in tailings slurry hydrotransport. *Obogashchenie Rud*. 2023;(4):41–49. <https://doi.org/10.17580/or.2023.04.08>
16. Tian Y., Palaev A.G., Shammazov I.A., Ren Y. Non-destructive testing technology for corrosion wall thickness reduction defects in pipelines based on electromagnetic ultrasound. *Frontiers in Earth Science*. 2024;12:1432043. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1432043>
17. Николаев А.К. *Обоснование рациональных параметров и режимов работы систем напорного гидротранспорта горных предприятий в сложных природно-климатических условиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук*. СПб.; 2004. 41 с. Режим доступа: [https://new-disser.ru/\\_avtoreferats/01002636486.pdf](https://new-disser.ru/_avtoreferats/01002636486.pdf) (дата обращения: 06.01.2025).
18. Агинец Р.В., Фирстов А.А. Совершенствование метода оценки изгибных напряжений в стенке подземного трубопровода. *Записки Горного института*. 2022;257:744–754. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.64>  
Aginey R.V., Firstov A.A. Improving the method for assessment of bending stresses in the wall of an underground pipeline. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:744–754. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.64>
19. Земенкова М.Ю., Чижевская Е.Л., Земенков Ю.Д. Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий. *Записки Горного института*. 2022;258:933–944. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.105>  
Zemenkova M.Y., Chizhevskaya E.L., Zemenkov Y.D. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies. *Journal of Mining Institute*. 2022;258:933–944. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.105>
20. Бахтизин Р.Н., Зарипов Р.М., Коробков Г.Е., Масалимов Р.Б. Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода. *Записки Горного института*. 2020;242:160–168. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.160>  
Baktizin R.N., Zaripov R.M., Korobkov G.E., Masalimov R.B. Assessment of internal pressure effect, causing additional bending of the pipeline. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:160–168. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.160>

#### Информация об авторах

**Авксентьев Сергей Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0382-1803>; e-mail: Avksentev\_SYu@pers.spmi.ru

**Белюсов Владимир Игоревич** – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: s245065@stud.spmi.ru

#### Information about the authors

**Sergey Yu. Avksentiev** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0382-1803>; e-mail: Avksentev\_SYu@pers.spmi.ru

**Vladimir I. Belousov** – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0382-1803>; e-mail: s245065@stud.spmi.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.01.2025

Поступила после рецензирования: 12.02.2025

Принята к публикации: 13.02.2025

#### Article info

Received: 11.01.2025

Revised: 12.02.2025

Accepted: 13.02.2025