

Ю. П. Харламов^{1✉}, А. А. Абдуллин¹, Д. О. Чещин¹

Стенд для экспериментальной проверки расчета параметров шламо-воздушной смеси во вращающемся горизонтальном трубопроводе

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: harlamov.igd@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрены особенности транспортирования шламо-воздушной смеси при RC-бурении горизонтальных и наклонных скважин с обратной циркуляцией очистного агента. Проведен анализ факторов, влияющих на устойчивость движения частиц разрушенной породы во вращающемся горизонтальном трубопроводе, имитирующем центральный шламотранспортный канал двойной буровой колонны. Представлены расчетные зависимости для определения параметров пневмотранспортной системы. Описана конструкция экспериментального стенда, разработанного для проверки расчетных данных в условиях, приближенных к реальному процессу бурения. Приведена методика проведения экспериментов с использованием видеорегистрации движения окрашенных частиц шлама в прозрачном вращающемся трубопроводе. Обоснована необходимость экспериментального определения скорости движения частиц и ее сопоставления с расчетными значениями для подтверждения адекватности математической модели пневмотранспортирования. Установлено, что превышение скорости транспортирования частиц над скоростью образования шлама является одним из основных условий предотвращения зашламовывания канала и обеспечения надежной работы системы очистки скважины. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации режимов работы пневмоударных комплексов для бурения горизонтальных и наклонных скважин в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: RC-бурение, бурение с обратной циркуляцией, пневмотранспорт, шламо-воздушная смесь, шламотранспортный канал, горизонтальная скважина, двойная буровая колонна, пневмоударник, скорость транспортирования частиц, вращающийся трубопровод, параметры пневмотранспортной системы

Yu. P. Harlamov^{1✉}, A. A. Abdullin¹, D. O. Cheshchin¹

Test bench for experimental verification of calculations of parameters of a sludge-air mixture in a rotating horizontal pipeline

¹N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: harlamov.igd@mail.ru

Abstract: The article examines the specific features of transporting a sludge-air mixture during RC drilling of horizontal and inclined wells with reverse circulation of the cleaning agent. An analysis is performed of the factors affecting the stability of broken rock particle movement in a rotating horizontal pipeline that simulates the central sludge-transport channel of a dual drill string. Calculation dependencies for determining the parameters of a pneumatic transport system are presented. The design of an experimental test bench is described; it was developed to verify the calculated data under conditions close to the actual drilling process. A methodology for conducting experiments is provided, involving video recording of the movement of coloured sludge particles in a transparent

rotating pipeline. The necessity of experimentally determining the particle movement speed and comparing it with calculated values is justified — this is required to confirm the adequacy of the mathematical model of pneumatic transportation. It has been established that exceeding the particle transportation speed over the sludge generation speed is one of the key conditions for preventing channel clogging and ensuring reliable operation of the well cleaning system. The obtained results can be used in designing and optimising the operating modes of pneumatic percussion drilling systems for drilling horizontal and inclined wells in complex mining and geological conditions.

Keywords: RC drilling, reverse circulation drilling, pneumatic transport, sludge-air mixture, sludge transport channel, horizontal well, dual drill string, down-the-hole hammer, particle transportation speed, rotating pipeline parameters of the pneumatic transport system

Введение

Освоение месторождений в арктических регионах сопровождается рядом специфических факторов: наличие многолетнемёрзлых пород, низкие температуры, сложная логистика и экологические ограничения. В этих условиях традиционные методы бурения (колонковое, шнековое) часто оказываются недостаточно эффективными. Одним из перспективных решений является технология RC-бурения (Reverse Circulation) [1-3], основанная на использовании двойной бурильной колонны и пневмоударника (рис.1).

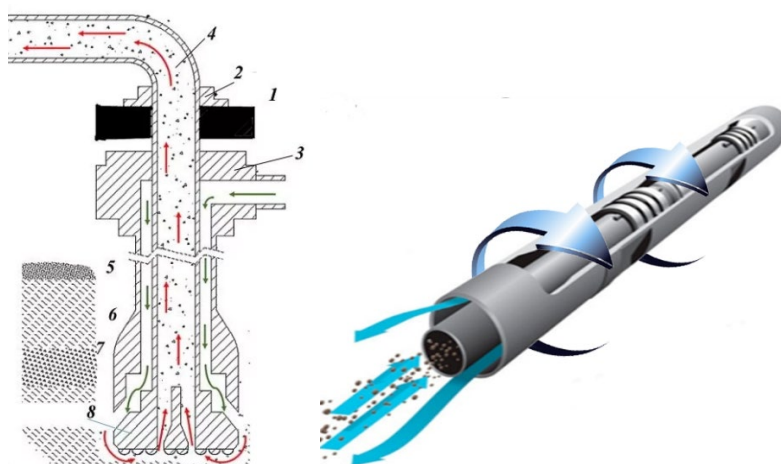


Рис. 1. Схема бурения с обратной циркуляцией очистного агента и схема движения воздушного потока в двойной буровой колонне [3]

1 – вращатель; 2 – дефлектор линии сброса; 3 – нагнетательный сальник;
4 – шламоводная линия; 5 – внутренняя бурильная труба; 6 – наружная бурильная труба; 7 – кольцевой пневмоударник; 8 – долото.

Одним из ключевых преимуществ этой технологии является минимальная потребность в воде. В условиях Арктики это критично, поскольку водоисточники могут быть замёрзшими, а транспортировка воды экономически нецелесообразна. К тому же экологические требования могут ограничивать использование буровых растворов. А применение только сжатого воздуха в RC-бурении исключает данные проблемы.

Его особенность заключается в том, что отработанный материал с забоя посредством энергоносителя (сжатого воздуха) поступает в центральный канал (осевой шламопровод), предусмотренный как в пневмоударнике, так и в буровых штангах. Обеспечение благоприятных условий для транспортирования продуктов бурения достигается за счет конструкции бурового инструмента, подразумевающей наличие гладкого шламопровода постоянного сечения (рис.1) [4-6].

Проблема транспортирования частиц

Бурение горизонтальных и наклонных скважин является еще одним перспективным направлением применения данного метода [7]. При проходке горизонтальной скважины классическим методом (с выносом шлама через затрубное пространство) длина бурения ограничена. Вызвано это тем, что в процессе выноса шлама воздушным потоком из горизонтальной скважины вектор силы тяжести направлен перпендикулярно к направлению движения транспортирующего потока (рис.2 а).

Таким образом в процессе транспортирования происходит оседание частиц шлама на дно скважины, из-за чего часть отработанной породы выносятся наружу, а некоторая часть подвергается многократному переизмельчению и вдавливаю в стенки скважины. Из осевших на дно скважины частиц образуется подстилающий слой различной толщины по длине канала. В процессе бурения этот слой может стабилизироваться и образовать пробку, закупоривающую шламотранспортную магистраль, что приводит к аварийной ситуации и остановке проведения работ (Рис. 2 б).

Бурение с обратной циркуляцией очистного агента позволяет увеличить диапазон технических возможностей пневмоударного бурения горизонтальных и наклонных скважин, повышая эффективность процесса бурения, а также дальность их транспортирования воздушным потоком. Это обусловлено сущностью движения породных частиц во вращающейся пневмотранспортной системе.

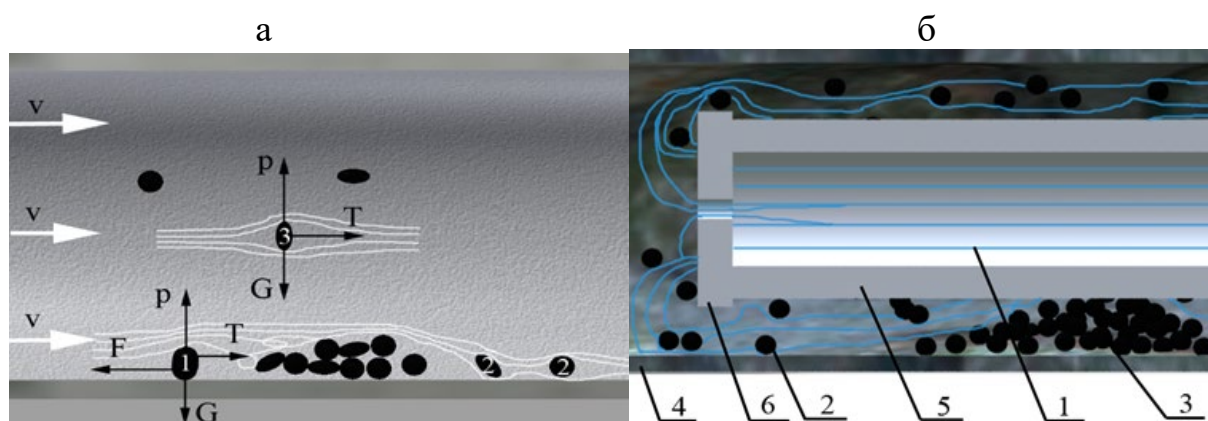


Рис. 2. Схема движения потока воздуха и частиц шлама при бурении пневмоударником:

- 1 – поток воздуха; 2 – частица шлама; 3 – осевшие частицы; 4 – скважина;
5 – буровая колонна; 6 – буровая коронка

При вращении шламопровода частицы породы находятся во взвешенном состоянии или соскальзывают со стенок трубы, благодаря чему могут транспортироваться при существенно меньшей скорости воздушного потока (рис.3) [8]. Такой характер движения частиц затрудняет образование подстилающего слоя из неподвижных фрагментов породы на дне трубопровода. Вследствие чего существенно повышается надежность транспортирования.

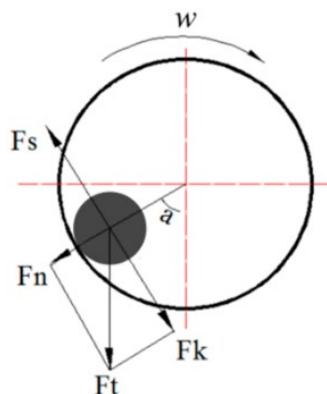


Рис. 3. Схема действия сил на частицу во вращающемся трубопроводе:
 F_s – сила трения; F_t – сила тяжести; F_n – сила нормального давления;
 F_k – касательная составляющая силы тяжести; w – скорость вращения трубопровода; α – угол поворота трубы.

Вращающийся шламопровод – это техническое решение, которое является значительным фактором обеспечивающим эффективную работу шламотранспортной системы, однако не единственным. В этой связи актуальной становится определение и других факторов, обеспечивающих надежное и эффективное транспортирование разрушенной породы по горизонтальному трубопроводу. Факторы, влияющие на эффективность транспортирования разрушенной породы определяются расчетным путем. Для решения этой задачи произведен расчет пневмотранспортной установки на основе методик, разработанных сотрудниками Томского политехнического университета и Оренбургского государственного университета [9, 10].

Расчет параметров центральной шламо-транспортной магистрали

Исходными данными для выполнения расчета являются следующие параметры: диаметр буримой скважины D_c , м; радиус центрального канала r , м; плотность разрабатываемой породы ρ , кг/м³; средний расход воздуха системы V_v , м³/ч. На основании этих величин определяются параметры пневмотранспортной системы:

1. Теоретическая скорость потока воздуха в центральном канале:

$$v = Q_v / A_{сеч}, \quad (1.1)$$

где: Q_v – расход воздуха,

$A_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения центрального канала:

$$A_{\text{сеч}} = \pi \cdot r^2 \quad (1.2)$$

где r – радиус центрального канала, м.

2. Техническая производительность бурения:

$$Q_m = V_m \cdot \rho_m, \quad (1.3)$$

где: V_m – производительность бурения, м³/ч;

ρ_m – плотность разрабатываемой породы, кг/м³.

$$V_m = 3600 \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot \vartheta / 4, \quad (1.4)$$

где D_c – диаметр скважины, м;

ϑ – скорость потока воздуха в центральном канале, м/с (см. формула 1.1).

3. Секундный расход воздуха:

$$Q_v = V_v \cdot \rho_v, \quad (1.5)$$

где V_v – средний расход воздуха системы м³/ч;

ρ_v – плотность воздуха, кг/м³, принято $\rho_v = 1,2$ кг/м³.

4. Весовая концентрация смеси:

$$\mu = Q_m / Q_v, \quad (1.6)$$

где Q_m – техническая производительность бурения (см. формула 1.3);

Q_v – секундный расход воздуха (см. формула 1.5).

5. Объемная доля твердой фазы определим из выражения:

$$\beta = 1 / (1 + \rho / \mu \cdot \rho_v) \quad (1.7)$$

где: μ – весовая концентрация смеси, кг/кг (см. формула 1.6);

ρ – плотность разрабатываемой породы, кг/м³;

ρ_v – плотность воздуха, кг/м³.

Также расчетным путем определяется скорость воздуха, необходимая для обеспечения бесперебойной работы пневмотранспортной магистрали. Ее расчет ведется следующим образом:

$$v_v = Re \frac{v}{d} \quad (1.8)$$

$$Re = Ar \cdot (1 - \beta)^{4.75} / (18 + 0.61 \sqrt{Ar (1 - \beta)^{4.75}}) \quad (1.9)$$

$$Ar = d^3 g (\rho - \rho_v) \quad (1.10)$$

$$v = \frac{\mu^*}{\rho_v} \quad (1.11)$$

где: v_v – скорость витания частицы в вертикальном участке трубопровода, м/с;
 ν – кинематическая вязкость газа при температуре транспортирования, м²/с;
 μ^* – динамическая вязкость газа при температуре транспортирования, кг/м с;
 d – эквивалентный диаметр частиц, м;
 Ar, Re – критерии Архимеда и Рейнольдса;
 β – объёмная доля твёрдой фазы;
 g – ускорение силы тяжести; м/с²;
 ρ_v – плотность газа при температуре транспортирования, кг/м³ (для воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³).

Разработка стенда для проведения эксперимента

Для проверки полученных расчетных данных экспериментальным путем в ИГД СО РАН путем модернизации ранее используемого исследовательского оборудования [11] создан специальный стенд. Стенд предназначен для измерения параметров движения шламо-воздушной смеси во вращающемся горизонтальном трубопроводе, выполненном из прозрачного материала, а именно из стекла. Для придания трубопроводу вращения вся его конструкция монтируется на токарный станок 1К62 (Рис.4).

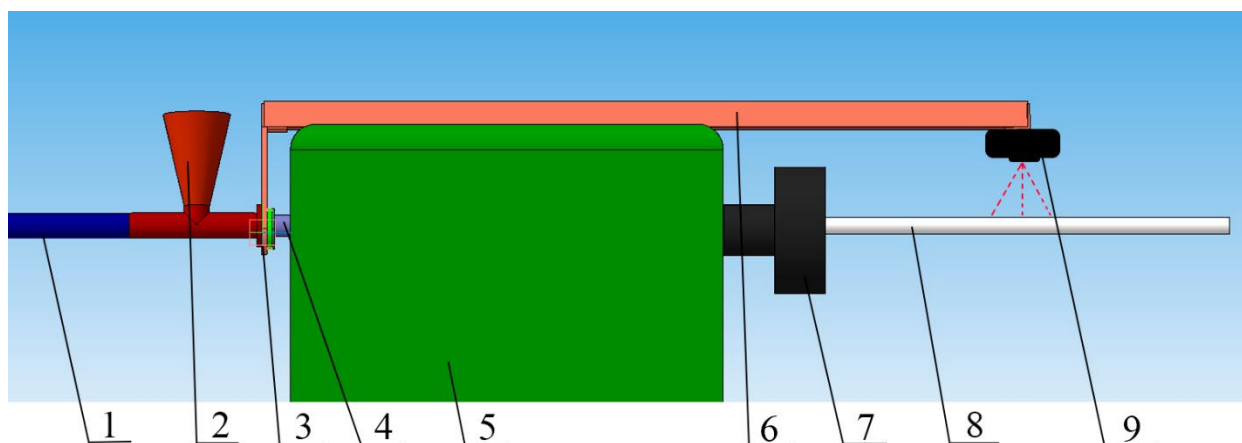


Рис. 4. Стенд для измерения параметров движения шламо-воздушной смеси в горизонтальном вращающемся трубопроводе

- 1 – рукав; 2 – воронка бункера; 3 – сальник-вертлюг; 4 – резиновая трубка;
 5 – передняя бабка токарного станка; 6 – опорная рама 7 – шпиндель станка;
 8 – стеклянная трубка; 9 – устройство видеофиксации.

Рама 6 стенда опирается на переднюю бабку 5 токарного станка. Имитатором центрального шламотранспортного канала служит стеклянная трубка 8, зажимаемая в шпиндель станка 7 посредством резиновой муфты. Стеклянная трубка посредством резиновой трубки 4 подвижно соединена с сальником-вертлюгом 3. Подвод энергоносителя (сжатый воздух) осуществляется по рукаву 1. Подача имитатора бурового шлама происходит через воронку бункера 2. Помимо этого в комплект необходимого оборудования входят: устройство видеорегистрации 9, мерная

емкость, секундомер, лабораторные весы, а также термометр для измерения температуры воздуха.

Экспериментальное определение скорости движения частиц в шламопроводе и её сравнение с расчетными данными необходимо для подтверждения адекватности разработанной математической модели пневмотранспортирования разрушенной породы в условиях вращающегося горизонтального трубопровода. Это позволяет установить соответствие между теоретически рассчитанными параметрами шламо-воздушной смеси и фактическими условиями движения частиц при бурении.

Особое значение имеет определение соотношения между скоростью движения частиц шлама и скоростью механического бурения. Скорость транспортирования разрушенной породы должна превышать скорость образования шлама на забое. В противном случае происходит накопление частиц в шланготранспортном канале, формирование подстилающего слоя и последующее зашламовывание трубопровода. Это может привести к снижению эффективности очистки забоя, повторному переизмельчению выбуренной породы, увеличению гидравлических потерь и возникновению аварийных ситуаций, связанных с закупориванием центрального канала буровой колонны.

Экспериментальная проверка также необходима для определения минимальной скорости воздушного потока, обеспечивающей устойчивое транспортирование твердых частиц без их осаждения. Полученные данные позволяют уточнить расчетные зависимости, определить влияние вращения трубопровода на характер движения частиц и установить рациональные режимы работы пневмотранспортной системы при бурении горизонтальных и наклонных скважин с обратной циркуляцией очистного агента.

Методика проведения экспериментов

Методика проведения экспериментов на описанном стенде выглядит следующим образом. По рукаву 1 (рис.4) подается сжатый воздух, расход которого измеряется расходомером VA400 с блоком сбора данных DS300. Через воронку 2 дозированными порциями фиксированного объема засыпается имитатор бурового шлама, различные фракции которого предварительно окрашиваются в определенные цвета. При вращении шпинделя 7 в стеклянной трубке 8 создаются условия, максимально приближенные к условиям движения выбуренной породы по осевому каналу двойной буровой трубы. Для определения скорости движения твердых частиц в шламо-воздушной смеси используется устройство видеофиксации, в качестве которого выступает камера DJI Osmo Action 4 с частотой видео 240 кадр./сек.

По показаниям измерительной аппаратуры экспериментально устанавливаются те же параметры шламо-воздушной смеси, что были получены в результате расчетов:

1. Скорость потока воздуха в центральном канале ϑ , рассчитываемая по формуле (1.1). Определяется по отношению показаний расходомера к площади поперечного сечения стеклянной трубки;

2. Производительность бурения V_m , рассчитанное путем высыпания порции имитатора бурового шлама заданного объема за промежуток времени, измеряемый при помощи секундомера;

3. Секундный расход воздуха Q_v .

Для проверки расчетных значений по формуле (1.5) используются показания расходомера V_v и справочное значение плотности воздуха ρ_v при температуре проведения экспериментов;

4. Весовая концентрация смеси μ , определяемая по формуле (1.6) как отношение экспериментально полученных значений технической производительности бурения Q_m к значению секундного расхода воздуха Q_v , полученных при помощи расходомера;

5. Объемная доля твердой фазы β , определяемая по формуле (1.7) путем использования значения весовой концентрации смеси μ , полученной экспериментальным путем;

6. Скорость воздуха, необходимая для обеспечения бесперебойной работы пневмотранспортной магистрали v_v проверяется путем использования в формулах (1.8), (1.9), (1.10) и (1.11) значений переменных, полученных экспериментальным путем.

С помощью постобработки кадров видеозаписи с камеры определяется скорость движения частиц в трубопроводе в зависимости от скорости воздушного потока и их взаимодействия при перемещении, а также визуальное распределение концентрации в шламопроводе.

Заключение

Таким образом, создан экспериментальный стенд, обеспечивающий моделирование движения шламо-воздушной смеси во вращающемся горизонтальном трубопроводе в условиях, приближенных к работе центрального канала двойной буровой колонны. Конструкция стенда позволяет наглядно отслеживать и фиксировать параметры движущейся по горизонтальной вращающейся трубе шламовой смеси.

Предложенная методика экспериментальных исследований позволяет определять фактическую скорость движения твердых частиц, оценивать характер их взаимодействия в потоке и сопоставлять полученные результаты с расчетными данными.

Установлено, что одним из ключевых условий надежной работы шламотранспортной системы является превышение скорости транспортирования частиц над скоростью образования шлама в процессе бурения. Соблюдение данного условия позволяет предотвратить зашламовывание канала и обеспечить непрерывный вынос разрушенной породы из скважины.

В дальнейшем результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании систем РС-бурения для горизонтальных и наклонных скважин, а также при выборе рациональных режимов работы пневмоударных буровых комплексов в сложных горно-геологических условиях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации №126021217130-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fan L., Li Z., Luo Y. Parametrical design and optimization of a reverse circulation drill bit for dust control // *Frontiers in Built Environment*. 2024. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1395464
2. Харламов Ю. П. Создание кольцевых пневмоударников для работы на высоком давлении энергоносителя // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2023. Т. 2. № 1. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-2-1-248-256.
3. Bo K., Ji F., Zhao Z., Fan L., Wang M. Optimum design of large-diameter reverse circulation drill bit // *Energies*. 2023. DOI: 10.3390/en16093913
4. Липин А.А. Погружные ударные машины с центральным шламотранспортом. Проблемы комплексного освоения минерального сырья Дальнего Востока: тр. научно – практич. конф. с участием иностран. ученых (16 – 18 сентября 2005 г., Хабаровск.). – Хабаровск: Ин-т горного дела ДВО РАН. 2005. – С. 170-175
5. Смоляницкий Б. Н., Липин А. А. Погружные пневмоударники для бурения скважин с центральным шламотранспортом, сб.докл. Международного горного конгресса (2008 г., Польша)
6. Харламов Ю. П., Абдуллин А. А., Чешин Д. О. Применение методов теории подобия при создании кольцевого геолого-разведочного пневмоударника // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2025. Т. 12. № 1. С. 65–71.
7. Чешин Д.О. Обоснование возможности применения способа интервальной продувки при бурении горизонтальных скважин пневмоударниками // *Проблемы недропользования*. – 2023. – № 2 (37). – С. 66-76. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.06622.06.2023
8. Данилов Б. Б. Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу: дис. ...докт. техн. наук / Б. Б. Данилов. – Новосибирск, 2009. – 246 с.
9. Кантаев А.С. и др. Расчет установок пневмотранспорта: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Кантаев А.С., Брус И.Д., Тураев Н.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2015. – 28 с.
10. Волошин Е.В. Расчет и компоновка пневмотранспортных установок: методические указания. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т. – 2019. – 61 с.
11. Харламов Ю. П., Чешин Д. О. Стенд для определения количества твердой фазы в шламо-воздушной смеси // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2025. Т. 12. № 3. С. 79–88.

© Ю. П. Харламов, А. А. Абдуллин, Д. О. Чешин, 2026