

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2025.2.8

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКЕ, ПРОВЕТРИВАЕМОЙ ПРИ ПОМОЩИ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

А.В. Таций

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье представлены результаты численного исследования закономерностей временной динамики пассивной вредной примеси в тупиковой горной выработке, проветриваемой при помощи вентиляционного трубопровода. Проведено 16 вариантов моделирования с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) для различных сочетаний расхода воздуха и отставания трубопровода от забоя. Получены зависимости изменения средней концентрации примеси от времени, выявлена экспоненциальная закономерность затухания. Установлены степенные зависимости затухания концентрации вредной примеси от расхода воздуха и отставания трубопровода. Предложена модель, позволяющая прогнозировать минимальное необходимое время проветривания выработки после буровзрывных работ для достижения безопасного уровня загрязненности. Результаты имеют прикладное значение для проектирования вентиляции и повышения промышленной безопасности при ведении проходческих работ.

Ключевые слова: рудник, тупиковая выработка, нагнетательный способ проветривания, CFD-моделирование, буровзрывные работы, безопасность.

Введение

Обеспечение эффективной вентиляции в тупиковых горных выработках является важной задачей в области промышленной безопасности и охраны труда. Особое значение приобретает контроль за удалением вредных примесей после буровзрывных работ (БВР), когда концентрации токсичных веществ могут значительно превышать предельно допустимые значения. Ранее в ряде работ [1-5] исследовались особенности структуры воздушных потоков и предложены критерии для оценки эффективности проветривания тупиковых выработок. В настоящей работе исследуется динамика распространения вредных примесей в трехмерной постановке.

Подобными вопросами о проветривании тупиковых выработок с моделированием выноса вредных примесей рассматривались в ряде исследований [6-8]. Основной особенностью настоящего исследования является изучение влияния отставания вентиляционного трубопровода на вынос вредной примеси из призабойной зоны с использованием трёхмерного нестационарного численного моделирования на основе методов вычислительной гидродинамики, что позволило более точно воспроизвести структуру воздушных потоков и динамику выноса примесей во времени.

В настоящей работе исследуется поведение пассивной примеси в условиях нестационарного проветривания выработки с учетом различных параметров вентиляции. Таким образом, целью исследования является определение зависимостей скорости выноса пассивной примеси из тупиковой выработки от расхода воздуха и расстояния от вентиляционного трубопровода до забоя на основе численного моделирования.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения безопасности и эффективности проветривания тупиковых выработок, а также возможностью использования полученных результатов для обоснования увеличения отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя при производстве взрывных работ. Понимание закономерностей распространения вредных примесей позволяет разработать более точные регламенты допуска персонала и оптимизировать проветривание тупиковых выработок.

Разработки модели и выходные параметры

Математическое моделирование проводилось с использованием пакета ANSYS Fluent [9]. В основу легла геометрическая модель тупиковой выработки, воспроизводящая параметры, полученные при обследовании выработки на руднике «Купол» [2]. Моделирование носило нестационарный характер, временной интервал составлял 30 минут, что соответствует нормативному времени проветривания после буровзрывных работ.

Для имитации вредной примеси использовалась пассивная примесь, равномерно распределённая в призабойной зоне на расстоянии 25 метров от забоя (рисунок 1). Распределение воздушного потока моделировалось для 16 различных режимов, полученных в результате комбинации:

- четырёх значений расхода воздуха: 4,35; 8,7; 13,05 и 17,4 м³/с (от 25% до 100%);
- четырёх значений отставания трубопровода: 10, 15, 30 и 50 метров.

Контрольные поперечные сечения располагались вдоль выработки с шагом 5 метров в призабойной части и 10 метров ближе к устью, всего – 11 сечений.

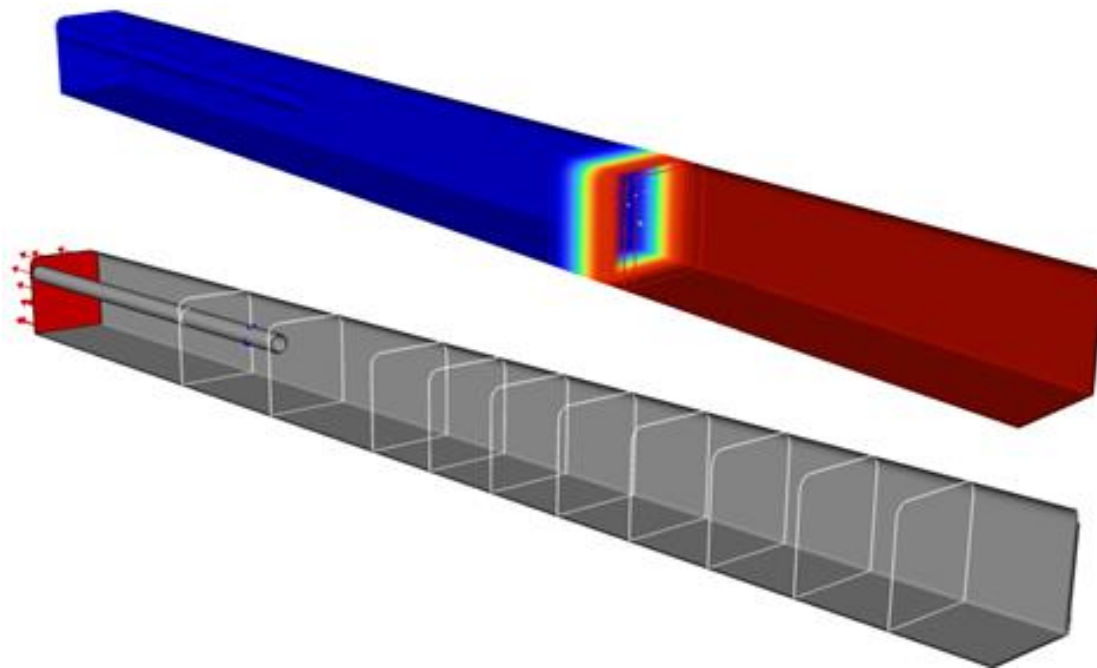


Рис. 1. Исследуемая выработка с сечениями для вывода результатов и начальное заполнение концентрации вредной примеси в тупиковой выработке

Основным анализируемым параметром моделирования выступала средняя по сечению концентрация вредной примеси как функция времени. Данные сохранялись с шагом 0,1 секунды, что позволило получить высокую временную разрешающую способность данных моделирования. Концентрации регистрировались в каждом из выбранных сечений в течение всего расчетного периода.

Представление результатов

Первым этапом анализа стало построение графиков зависимости средней концентрации примеси от времени проветривания для каждого из поперечных сечений. Эти зависимости демонстрируют динамику выноса примеси в процессе проветривания при различных режимах проветривания (рисунок 2).

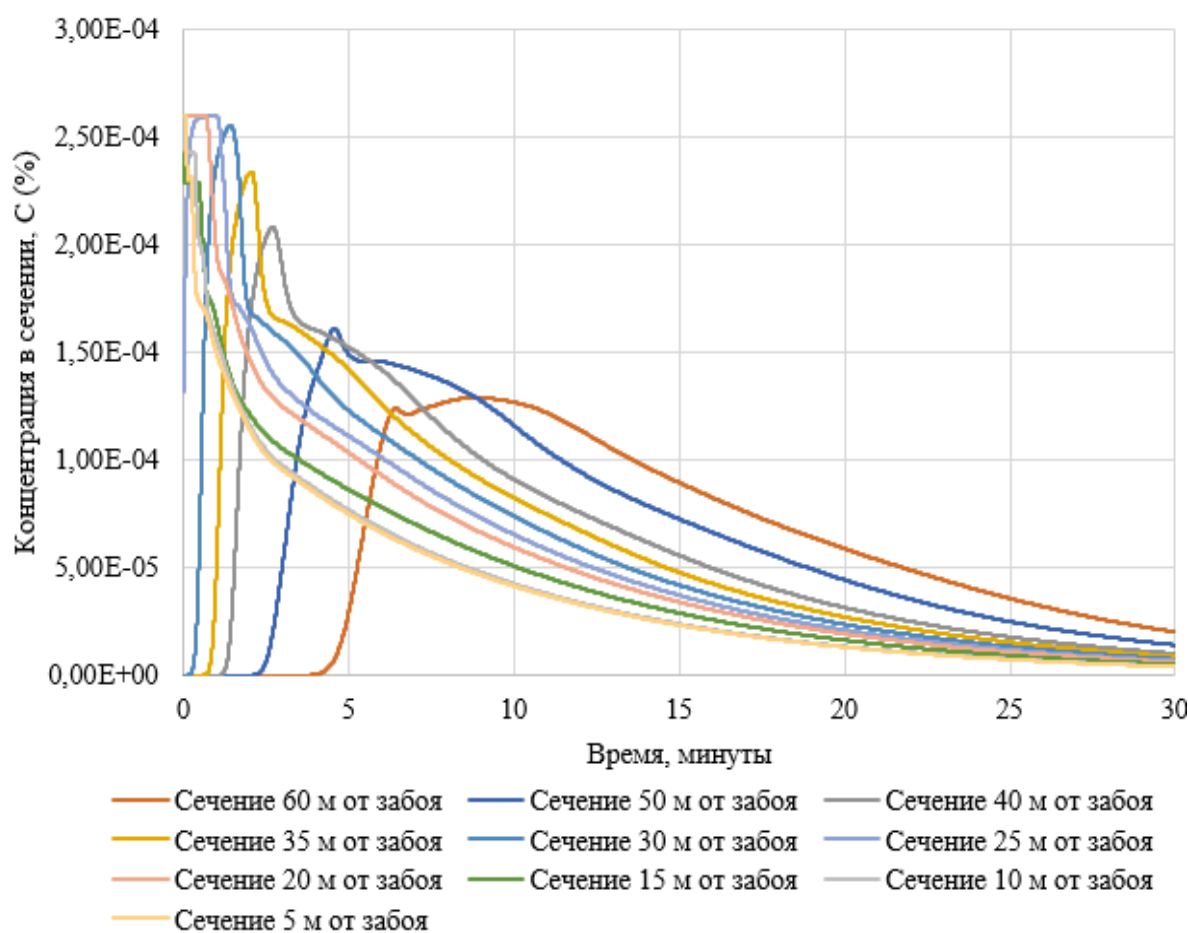


Рис. 2. Зависимость концентрации в разных сечениях вдоль выработки от времени проветривания

Для анализа функционального вида зависимостей, представленных на рисунке 1, и последующего аппроксимирования полученные концентрации были приведены к безразмерной логарифмической форме:

$$\ln\left(\frac{C(t)}{C_0}\right) \quad (1)$$

где $C(t)$ – текущая средняя концентрация во времени, C_0 – начальная концентрация примеси.

На рисунке 3 приведен пример графиков зависимости концентрации в логарифмическом виде при расходе воздуха $4,45 \text{ м}^3/\text{с}$ и при отставании трубопровода 15 метров.

Анализ полученных логарифмических зависимостей показал, что, начиная с определенного времени (от 4 до 11 минут в зависимости от исходных параметров) графики принимают линейный вид, тем самым зависимости приобретают линейный вид с примерно одинаковым углом наклона до конца времени проветривания.

Указанные участки логарифмических зависимостей были аппроксимированы в диапазоне от начала устойчивого линейного снижения до окончания моделируемого периода (30 минут). Введён параметр B , характеризующий наклон логарифмической прямой и отражающий скорость выноса примеси, а также параметр A , определяющий её вертикальное смещение. Таким образом, аппроксимирующее выражение имеет вид:

$$\ln\left(\frac{C(t)}{C_0}\right) = A + B \cdot t. \quad (2)$$

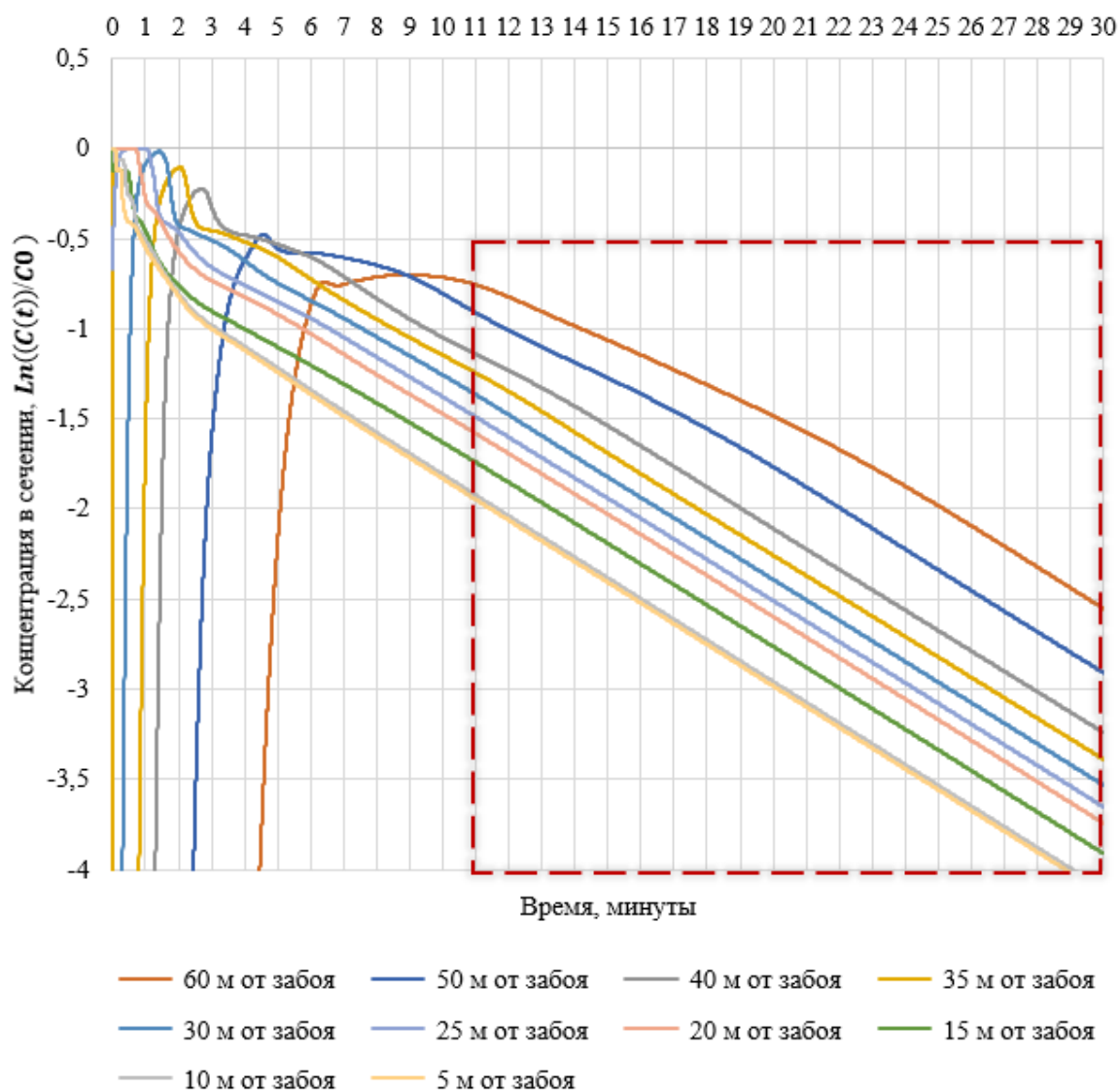


Рис. 3. Зависимости средних концентраций в логарифмической форме в разных сечениях выработки при отставании трубопровода 15 метров

Особое внимание было уделено параметру B , который в физическом смысле характеризует скорость экспоненциального убывания концентрации примеси с течением времени. Значения параметра B в различных поперечных сечениях при различном расходе воздуха, поступающего на проветривание, при отставании трубопровода 10 метров приведены на рисунке 4.

При этом параметр B практически не зависит от того, в каком поперечном сечении измеряется средняя концентрация. Это связано с тем, что в призабойной зоне во время проветривания быстро формируется достаточно однородное распределение примеси из-за активного перемешивания воздуха за счёт крупномасштабного турбулентного вихря, протяженность которого изменяется в зависимости от отставания трубопровода и варьируется от 10 до 55 метров.

Для более глубокого анализа закономерностей изменения параметра B были собраны значения этого коэффициента для всех вариантов моделирования, охватывающих разные комбинации расхода воздуха и отставания вентиляционного трубопровода. Рассмотрены усреднённые значения B по диапазону поперечных сечений от 10 до 40 метров

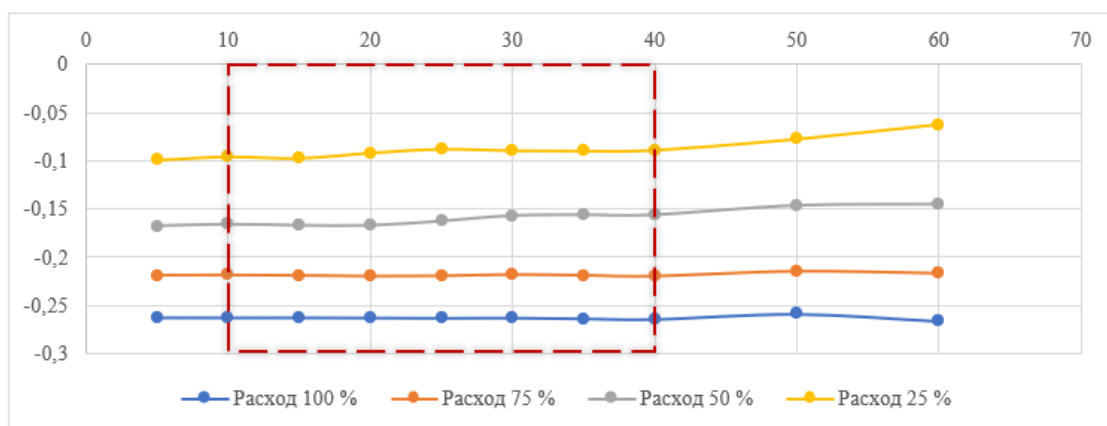


Рис. 4. Зависимость скорости уменьшения концентрации в различных сечениях от расхода воздуха

Аппроксимировав средние полученные значения в данном диапазоне сечений метров параметра скорости уменьшения концентрации «В» для каждого из отставания вентиляционного трубопровода, установлена его степенная зависимость с показателем 0,7 от расхода воздуха, а также его степенная зависимость с показателем -0,5 от величины отставания (рисунок 5).

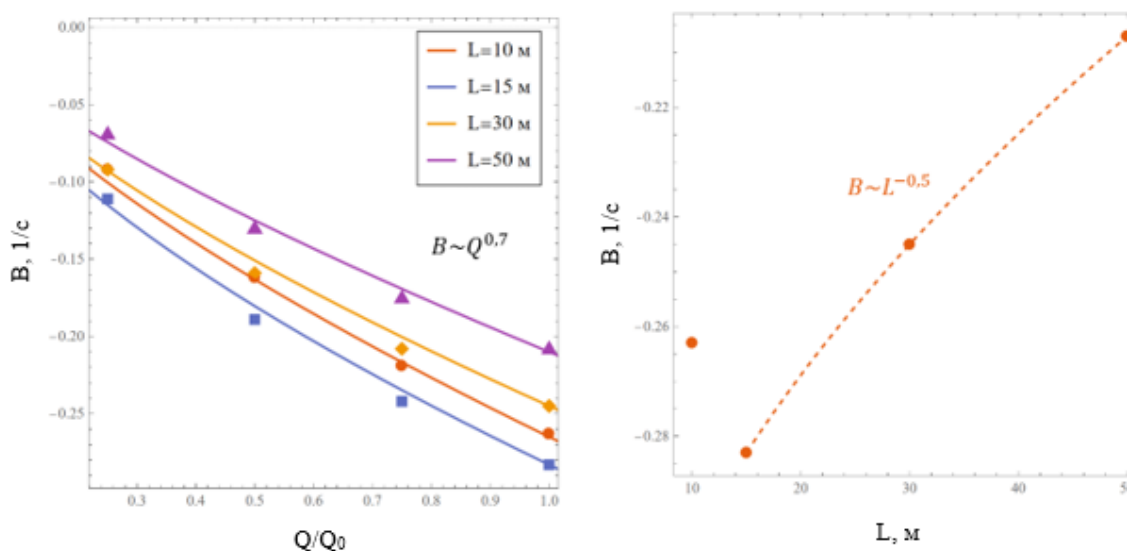


Рис. 5. Зависимости параметра В от расхода воздуха и величины отставания вентиляционного трубопровода

Выявленный функциональный характер зависимости коэффициента В от расхода воздуха и величины отставания трубопровода позволил определить общий вид зависимости снижения концентрации примеси в забое тупиковой выработки с течением времени.

$$C = C_0 \exp \left(A - \frac{\beta Q^{0,7}}{L^{0,5}} t \right) = C^* \exp \left(- \frac{\beta Q^{0,7}}{L^{0,5}} t \right) \quad (3)$$

$$C^* = C_0 \exp A$$

где C – концентрация примеси в момент времени t (%), C_0 – начальная концентрация (%), β – эмпирический коэффициент, определённый в ходе аппроксимации, Q – расход воздуха (в м³/с), L – расстояние от конца трубопровода до забоя (в м), t – время (в минутах).

Полученное выражение позволяет прогнозировать временную динамику выноса вредной примеси в тупиковой выработке в зависимости от конкретных условий вентиляции. Также выражение может служить инструментом для количественной оценки эффективности различных мероприятий по оптимизации выноса вредных примесей, направленных на изменение расхода воздуха или отставания вентиляционного трубопровода. Полученная модель может быть использована:

- для оценки необходимого времени проветривания после буровзрывных работ;
- при обосновании допустимых отставаний вентиляционного трубопровода от забоя;
- в процессе оптимизации графиков допуска персонала в выработку.

Таким образом, в ходе проведённого численного моделирования была установлена закономерность временного выноса пассивной примеси из тупиковой выработки, проветриваемой нагнетательным трубопроводом. Полученная модель позволяет прогнозировать необходимое время проветривания для достижения допустимых концентраций вредных веществ, а также использовать результаты для обоснования допустимого отставания вентиляционного трубопровода и повышения промышленной безопасности при ведении проходческих работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тацкий, А.В. Исследование турбулентного течения при нагнетательном проветривании тупиковой выработки методами численного моделирования // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., 28-29 ноября 2023 г. /ПНИПУ – Пермь, 2023. – С. 243-251.
2. Каменских А.А., Файнбург Г.З., Семин М.А., Тацкий А.В. Экспериментальные исследования проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом при различном отставании вентиляционного трубопровода от груди забоя // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9, № 1. – С. 41-52. – DOI: 10.17073/2500-0632-2023-08-147.
3. Semin M., Faynburg G., Tatsiy A., Levin L., Nakariakov E. Insights into turbulent airflow structures in blind headings under different ventilation duct distances // Scientific Reports. – 2024. – V. 14, № 1. – Номер статьи 23768. – DOI: 10.1038/s41598-024-74671-3.
4. Тацкий А.В., Гришин Е.Л., Паршаков О.С., Русинов А.Н. Анализ влияния положения вентиляционного трубопровода на структуру крупномасштабного турбулентного вихря в тупиковых выработках // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 633-642.
5. Тацкий А.В. Анализ влияния отставания вентиляционного трубопровода на эффективность проветривания тупиковой выработки с использованием нагнетательного способа // Горное эхо. – 2024. – № 2 (95). – С. 92-98. – DOI: 10.7242/echo.2024.2.17.
6. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15-23. – DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.
7. Ольховский Д.В., Паршаков О.С., Бублик С.А. Исследование динамики газовой обстановки подземных выработок после проведения взрывных работ // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8, № 1. – С. 47-58. – DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-86.
8. Шалимов А.В., Исаевич А.Г. Моделирование конвективного движения метана в тупиковой выработке при всасывающем способе проветривания // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2023. – № 1. – С. 515-523. – DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-515-523.
9. Левин Л.Ю., Газизуллин Р.Р., Зайцев А.В. Использование программного модуля ANSYS CFX при решении научно-производственных задач проветривания шахт и рудников // САПР и графика. – 2011. – № 10. – С. 64-66.