

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ГЛУБОКОГО РУДНИКА ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКИПОВОГО СТВОЛА

Д.А. Поспелов¹, А.В. Зайцев¹, М.А. Семин¹, С.В. Мальцев¹, Е.Н. Мизонов²

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: dimapospelov7@gmail.com

² ПАО «ГМК «Норильский никель», Москва, Россия

Аннотация: Потребность в увеличении объемов добычи полезных ископаемых на рудниках в конечном счете приводит к возрастанию количества требуемого для проветривания рудников воздуха. Увеличить подачу воздуха в шахту можно за счет ввода в вентиляцию имеющихся нейтральных шахтных стволов, которые, как правило, являются скиповыми. Подача воздуха по скиповым стволам может оказаться энергозатратной вследствие их относительно малого диаметра и большого количества технологического оборудования, расположенного в них. Для выяснения целесообразности перевода скипового ствола СС-1 рудника «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель» из нейтрального в воздухоподающий проведен анализ зависимости относительных энергозатрат на его проветривание от его диаметра, скорости воздуха и коэффициента аэродинамического сопротивления. Показано, что относительные энергозатраты на проветривание ствола не превышают 20% от энергозатрат на поддержание расходов во всех горных выработках рудника при величинах диаметра ствола от 6,5 м и более, а также при скоростях воздуха в стволе менее 9 м/с. Теоретический анализ воздухораспределения в руднике при различных значениях коэффициента аэродинамического сопротивления и диаметра ствола показал, что для уменьшения погонных энергозатрат на проветривание наиболее эффективным мероприятием при любых скоростях воздуха в стволе является снижение коэффициента аэродинамического сопротивления, однако это труднодостижимо, так как требуется замена технологического оборудования ствола и остановка технологического процесса рудника.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, скиповой ствол, энергозатраты, численное моделирование, энергоэффективность, коэффициент аэродинамического сопротивления, диаметр ствола, скорость воздуха.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-77-30008.

Для цитирования: Поспелов Д. А., Зайцев А. В., Семин М. А., Мальцев С. В., Мизонов Е. Н. Повышение энергоэффективности системы вентиляции глубокого рудника за счет изменения аэродинамических параметров скипового ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 135–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_135.

Enhancement of ventilation system energy efficiency through the change of aerodynamic characteristics in skip shafts in deep mines

D.A. Pospelov¹, A.V. Zaitsev¹, M.A. Semin¹, S.V. Maltsev¹, E.N. Mizonov²

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: dimapospelov7@gmail.com

² OJSC MMC Norilsk Nickel, Moscow, Russia

Abstract: The increasing production outputs in underground mining leads to the increased air requirements for mine ventilation. Mine air supply can be enhanced by adding the mine ventilation system with the existing non-airing shafts which are the skip shafts, as a rule. Air delivery in skip shafts can consume much energy as the shafts have a small diameter and a plenty of process equipment installed. Aimed to assess expedience of converting skip shaft SS-1 in NorNickel's Oktyabrsky Mine to an air supply shaft, the energy consumption of the shaft ventilation is analyzed as function of the shaft diameter, air flow velocity and the aerodynamic drag factor. The energy consumption of shaft ventilation is not higher than 20% of total energy spent to maintain air flow rate in all underground openings at the shaft diameters from 6.5 m and larger and at the air velocities not less than 9 m/s in the shaft. The theoretical analysis of air distribution in the mine versus the aerodynamic drag factor and shaft diameter shows that the most effective approach to reducing the linear ventilation energy input at any air velocities in the shaft is the decrease in the aerodynamic drag factor. This is a hard hitting objective as it requires re-equipment of the shaft and the mining process shutdown.

Key words: mine ventilation, skip shaft, energy consumption, numerical modeling, energy efficiency, aerodynamic drag factor, shaft diameter, air velocity.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-77-30008.

For citation: Pospelov D. A., Zaitsev A. V., Semin M. A., Maltsev S. V., Mizonov E. N. Enhancement of ventilation system energy efficiency through the change of aerodynamic characteristics in skip shafts in deep mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(9):135-144. [In Russ.]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_135.

Введение

Для увеличения и поддержания объемов добычи полезных ископаемых на рудниках возникает необходимость расширения площадей обрабатываемых участков и увеличения глубины ведения горных работ, что ведет к возрастанию протяженности вентиляционных сетей горных выработок, в результате чего возникает необходимость в большем количестве воздуха, подаваемого в рудники. Проветривание рудника «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель» осуществляется всасывающим способом

по фланговой схеме. В настоящее время свежий воздух поступает с поверхности в подземные горные выработки по вертикальным стволам: клетевым стволам (КС-1, КС-2), грузовому стволу (ГС), вспомогательному закладочному стволу (ВЗС) и вспомогательному скиповому стволу (ВСС) за счет общешахтной депрессии, создаваемой главными вентиляторными установками на вентиляционных стволах ВС-1, ВС-2, ВС-3 и ВС-4 без участия в проветривании скиповых стволов СС-1 и СС-2, которые являются нейтральными. Увеличить подачу воз-

духа в рудник можно за счет ввода новых главных вентиляторных установок, проектирования новых шахтных стволов для нужд вентиляции, реконструкции имеющихся нейтральных шахтных стволов с целью их использования для вентиляции.

Наиболее трудными и энергозатратными участками глубоких рудников при проветривании являются воздухоподающие и вентиляционные стволы, что связано с их большой протяженностью, высокими значениями скоростей воздуха в них, большим погонным аэродинамическим сопротивлением ввиду наличия армировки, перекрытия части сечения различным технологическим оборудованием и пр. [1]. Их доля в общей депрессии рудника может достигать 50–70% [2–6]. По данной причине при проектировании воздухоподающих и вентиляционных стволов глубоких рудников необходимо учитывать ожидаемые эксплуатационные энергозатраты по фактору вентиляции.

Отдельным интересным вопросом является возможность исследования повышения энергоэффективности проветривания глубоких рудников за счет увеличения подачи воздуха по скиповым стволам. Согласно [7], использование скиповых стволов для целей вентиляции должно в каждом конкретном случае обосновываться в проекте технико-экономическими расчетами, учитывающими все связанные с этим недостатки. При этом должны быть разработаны специальные мероприятия по герметизации надшахтных зданий и обеспыливаю.

В литературе описано небольшое количество исследований, поведенных ранее по этому вопросу. В работе [8] использовались CFD методы для оценки влияния расстрелов различной конфигурации на эксплуатационные расходы на проветривание ствола. В [9] исследова-

лась армировка с канатно-профильными проводниками и консольными расстрелами, которая позволяла достичь сопротивления ствола, сравнимого с гибкой канатной армировкой, уменьшая энергозатраты, при этом не требовалось увеличение диаметра ствола по фактору горизонтальных динамических колебаний. В работе [10] вычислялись коэффициенты трения различного технологического оборудования ствола при помощи теоретических и эмпирических уравнений, основываясь на подробной информации о стволе. В работах [11, 12] рассчитывались безопасные и энергоэффективные аэродинамические и геометрические характеристики ствола, во внимание принималось взаимное аэродинамическое влияние движущихся скипов и воздуха в стволе. Так, согласно действующей на территории РФ нормативной документации [13], в стволах, предназначенных только для спуска и подъема грузов, максимальная допустимая скорость воздуха может быть не более 12 м/с. В работе [11] выявлено, что при достаточно высокой скорости воздуха 18 м/с аэродинамическое влияние воздушного потока на технологическое оборудование пренебрежимо мало, следовательно, при оценке максимально допустимой скорости воздуха в скиповых стволах необходимо рассмотреть другие факторы, а именно, энергозатраты на проветривание ствола.

В настоящей работе оценена возможность использования скипового ствола СС-1 рудника «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель» для подачи свежего воздуха в рудник и увеличения энергоэффективности системы вентиляции рудника.

Методология исследования и результаты моделирования

Для расчета воздухораспределения в вентиляционной сети рудника «Ок-

тябрьский» использовался аналитический комплекс «АэроСеть». Геометрическая модель рудника, а также аэродинамические сопротивления выработок (ветвей, графа вентиляционной сети) заданы на основании проектных данных и данных воздушно-депресссионной съемки. Расчет воздухораспределения производился в стационарном режиме, когда величины источников тяги фиксированы и постоянны по времени: заданные напоры, напорные характеристики (напоры как функции расходов). По известному воздухораспределению в модели рассчитывались энергозатраты на проветривание рудника в целом и скипового ствола СС-1 в частности.

Проведен анализ суммарных энергозатрат на проветривание рудника «Октябрьский» и относительной доли энергозатрат на проветривание шахтного ствола СС-1 при различных его геометрических и аэродинамических параметрах в 3 вариантах:

- при фиксированном расходе воздуха в стволе;
- при фиксированном диаметре ствола;
- при фиксированной скорости воздуха и переменных величинах коэффициента аэродинамического сопротивления и диаметра ствола.

Вариант 1. Анализ изменения относительных энергозатрат на проветривание ствола СС-1 при фиксированном расходе воздуха

Для решения задачи по определению зависимостей относительных энергозатрат от диаметров скипового ствола были приняты следующие условия:

1. Фиксированный расход воздуха в стволе СС-1: $Q = 287 \text{ м}^3/\text{с}$.
2. Глубина ствола: $H_{\text{ств}} = 1072 \text{ м}$.
3. Вариация диаметров ствола: $d_{\text{ств}} = 5 - 9 \text{ м}$ с шагом 0,5 м.
4. Коэффициент аэродинамического сопротивления ствола: $\alpha = 0,008 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$,

принят по результатам проведения воздушно-депресссионной съемки на руднике в 2020 г.

5. Суммарные энергозатраты на проветривание рудника «Октябрьский»: $\sum N_{\text{общ}} = 5438,93 \text{ кВт}$, приняты по результатам моделирования в аналитическом комплексе «АэроСеть». Суммарные энергозатраты складываются из энергозатрат на проветривание всех горных выработок, включая стволы СС-1, ВС-1, ВС-2, ВС-3, ВС-4.

Произведена серия численных расчетов, в которых в результате вариации диаметра ствола от 5 до 9 м скорость воздуха в стволе варьировалась в диапазоне от 14,6 до 4,5 м/с при условии поддержания постоянного расхода воздуха согласно п. 1. На основе исходных данных и выполненных расчетов рассчитаны относительные энергозатраты на проветривание ствола при изменении диаметра ствола и скорости воздуха в стволе. Величина относительных энергозатрат на проветривание ствола СС-1 рассчитывалась как отношение абсолютного значения энергозатрат на проветривание ствола СС-1 к общим энергозатратам на проветривание всего рудника:

$$\frac{N_{\text{СС-1}}}{\sum N_{\text{общ}}} = \frac{640 \cdot L \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot d^5} \cdot \frac{Q^3}{\sum N_{\text{общ}}}, \text{ д. ед.} \quad (1)$$

где $N_{\text{СС-1}}$ — энергозатраты на проветривание ствола СС-1, Вт; $\sum N_{\text{общ}}$ — суммарные энергозатраты на проветривание рудника «Октябрьский», Вт; L — длина ствола, м; α — коэффициент аэродинамического сопротивления, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; d — диаметр ствола, м; Q — расход воздуха в стволе СС-1, $\text{м}^3/\text{с}$.

Данные зависимости относительных энергозатрат представлены на рис. 1, 2.

Уменьшение диаметра и увеличение скорости воздуха в скиповом стволе закономерно приводит к росту относительных энергозатрат, как это видно из

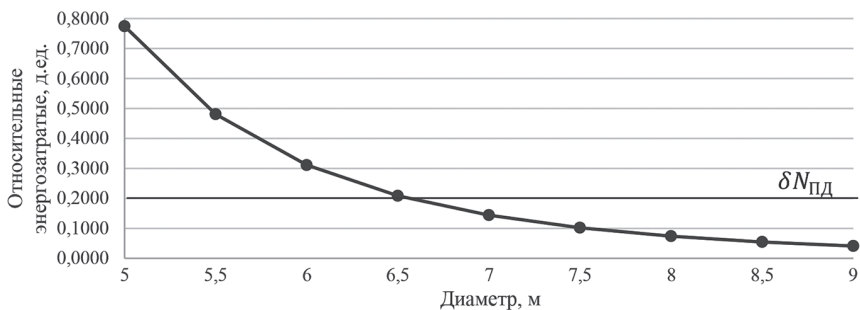


Рис. 1. Зависимость относительных энергозатрат от диаметров ствола
 Fig. 1. Energy consumption versus shaft diameter

рис. 1, 2. Важным моментом при анализе зависимости (1) при различных аэродинамических параметрах ствола с точки зрения энергоэффективности проветривания было задание условия предельно-допустимых относительных энергозатрат. Это условие может выражаться в виде определенной предельно-допустимой величины $\delta N_{пд}$ для относительных энергозатрат:

$$\frac{N_{CC-1}}{\sum N_{общ}} \leq \delta N_{пд} \quad (2)$$

В настоящем исследовании в качестве предельно-допустимой величины экспертно было принято значение 0,2 (т.е. не более 20% от всех энергозатрат на проветривание рудника должны приходиться на скиповый ствол). При таком выборе предельно-допустимой величины относительных энергозатрат следует, что минимальный диаметр ски-

пового ствола составляет приблизительно 6,5 м, а максимальная скорость воздуха в стволе — около 9 м/с. Это означает, что с точки зрения энергоэффективности проветривания рудника «Октябрьский» в целом не следует увеличивать скорость воздуха в нем до величин более 9 м/с. Следует заметить, что для других рудников величина предельно допустимой скорости воздуха в скиповом стволе по фактору энергоэффективности может отличаться.

Проведенный анализ величины диаметра скипового ствола важен с точки зрения проектирования новых скиповых стволов в схожих горнотехнических и аэрологических условиях в будущем. Для других рудников величина предельно допустимого диаметра ствола по фактору энергоэффективности также может отличаться. В случае скипового ствола СС-1 рудника «Октябрьский»

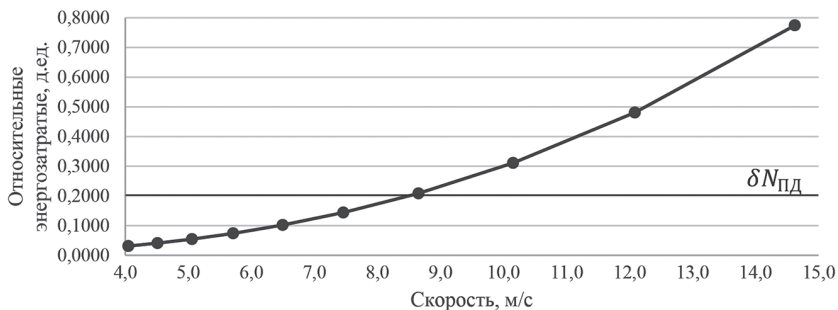


Рис. 2. Зависимость относительных энергозатрат от скоростей воздуха при фиксированном расходе $Q = 287 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 2. Energy consumption versus air velocity at fixed air flow rate $Q = 287 \text{ м}^3/\text{с}$

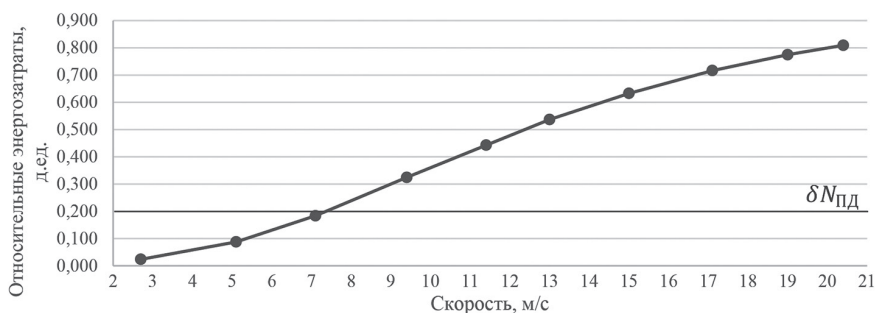


Рис. 3. Зависимость относительных энергозатрат от скоростей воздуха при различных модельных скоростях воздуха

Fig. 3. Energy consumption versus different model air velocities

фактическое значение диаметра составляет 6,5 м, что соответствует выбранному критерию (2), обеспечивая разумные энергозатраты на проветривание при минимальных капитальных затратах на строительство ствола.

Вариант 2. Анализ изменения относительных энергозатрат на проветривание ствола СС-1 при фиксированном диаметре

Произведено многовариантное численное моделирование воздухораспределения в руднике при скоростях движения воздуха в шахтном стволе СС-1 от 2,7 м/с до 20,4 м/с. Расчеты проводились в аналитическом комплексе «АэроСеть». Внешние утечки ствола СС-1 приняты 10%, диаметр ствола равен 6,5 м, коэффициент аэродинамического сопротивления ствола $0,008 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$. Получены модельные расходы воздуха в пределах от 89,6 до 677,3 м³/с, модельные депрессии главной вентиляторной установки в диапазоне от 0,71 до 16 кПа, модельные энергозатраты на проветривание стволов от 108,7 до 18 539,8 кВт и общие энергозатраты на проветривание рудника менялись в отличие от первого варианта в пределах от 4605,1 до 22 908 кВт. По результатам моделирования построен график зависимости относительных энергозатрат на проветривание скипового ствола СС-1 от раз-

личных скоростей движения воздуха, представленный на рис. 3.

На рис. 3 наблюдается прямая связь относительных энергозатрат с модельной скоростью воздуха в стволе, а также выявлено, что, как и ранее, скорости воздуха, превышающие 9 м/с, приводят к значительным энергозатратам, достигающим более 20% от энергозатрат на поддержание расходов во всех остальных горных выработках. При скоростях подачи воздуха выше 13 м/с количество требуемой энергии в единицу времени (53,7%) только на проветривание стволов больше, чем энергозатраты на поддержание расходов воздуха во всех остальных выработках вентиляционной сети. Депрессии, создаваемые главным вентилятором, составляют 11,5 кПа при скоростях движения воздуха в стволе выше 17,1 м/с, однако величина депрессии, которую может развить шахтный вентилятор, колеблется в пределах $0,5 \div 10,0 \text{ кПа}$ [14 – 16].

Вариант 3. Анализ изменения относительных энергозатрат на проветривание ствола СС-1 при фиксированной скорости воздуха и переменных величинах коэффициента аэродинамического сопротивления и диаметра ствола

Произведен анализ вариации коэффициентов аэродинамического сопро-

тивления и диаметров шахтных стволов, описанных в литературе [3, 17] применительно к медно-никелевым рудникам, по результатам которого для дальнейшего исследования были приняты максимальный и минимальный коэффициенты аэродинамического сопротивления α , равные 0,008 и 0,0016 Н·с²/м⁴, соответствующие гибкой армировке [18], максимальный и минимальный диаметры, равные 9 и 5 м. Рассчитаны энергозатраты на проветривание ствола на один погонный метр по формуле:

$$\frac{N}{L} = \frac{\alpha \cdot L \cdot \pi \cdot d \cdot v^3}{100}, \text{ кВт/м} \quad (3)$$

где N – энергозатраты на проветривание ствола СС-1, Вт; L – длина ствола, 1072 м; α – коэффициент аэродинамического сопротивления, Н·с²/м⁴; d – диаметр ствола, м; v – скорость воздуха в стволе СС-1, м/с.

Построены графики зависимости энергозатрат на проветривание погонного метра ствола от скорости движения воздуха в стволе при минимальном коэффициенте аэродинамического сопротивления и максимальном диаметре ствола, максимальном коэффициенте

аэродинамического сопротивления и минимальном диаметре ствола, при минимальном коэффициенте аэродинамического сопротивления и диаметре скипового ствола СС-1, равном 6,5 м, а также при фактических, проектных аэродинамических и геометрических параметрах скипового ствола СС-1 (см. рис. 4).

Из рис. 4 видно, что на величину энергозатрат значительно сильнее влияет вариация коэффициента аэродинамического сопротивления в допустимом диапазоне, чем вариация диаметров ствола в допустимых значениях. Это связано с тем, что допустимый диапазон коэффициентов аэродинамического сопротивления шире, чем допустимый диапазон диаметров ствола. При этом оба исследуемых параметра задачи влияют на погонные энергозатраты линейно, как это следует из формулы (3).

Рассматривая скорости движения воздуха в скиповом стволе от 11 м/с и выше при имеющихся аэродинамических и геометрических параметрах, видим, что энергозатраты на погонный метр составляют 2,42 кВт/м, при уменьшении коэффициента аэродинамического сопротивления до 0,0016 Н·с²/м⁴ (в 5 раз)

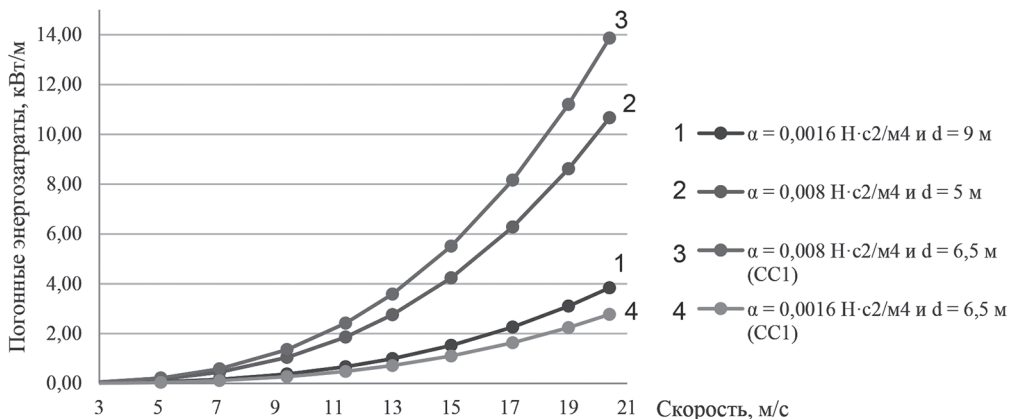


Рис. 4. Зависимость энергозатрат на проветривание погонного метра ствола СС-1 от скорости движения воздуха в стволе при различных коэффициентах аэродинамического сопротивления и диаметрах ствола
Fig. 4. Ventilation energy consumption per unit length of shaft SS-1 versus air velocity at different aerodynamic drag factors and shaft diameters

энергозатраты снижаются до величины около 0,48 кВт/м (также уменьшаются в 5 раз). Данная тенденция справедлива для любых скоростей воздуха, что следует из вида зависимости (3). Несмотря на это, минимизация погонных энергозатрат посредством уменьшения аэродинамического сопротивления является труднореализуемой с технической точки зрения процедурой, поскольку в этом случае требуется замена применяемого в стволе технологического оборудования, реконструкция крепи ствола.

Заключение

В результате проведенного теоретического анализа воздухораспределения в вентиляционной сети рудника «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильской никель» и исследования энергоэффективных параметров проветривания скиповых стволов (на примере ствола СС-1) сделаны следующие выводы:

- При анализе изменения геометрических параметров ствола, в частности,

диаметров, показано, что скиповые стволы с диаметром менее 6,5 м являются экономически неэффективными из-за больших относительных энергозатрат на проветривание (более 20% от энергозатрат на проветривание всего рудника).

- Из результатов моделирования следует, что скорости воздуха в скиповом стволе СС-1 выше 9 м/с нецелесообразны, поскольку при данных скоростях энергозатраты на проветривание стволов составляют более 20% от энергозатрат на поддержание требуемых расходов воздуха в остальных горных выработках.

- Теоретически, снижение коэффициента аэродинамического сопротивления является наиболее эффективным мероприятием повышения энергоэффективности проветривания скипового ствола при любых скоростях воздуха в стволе, однако на практике это чаще всего труднореализуемо с технической точки зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dziurzyński W., Krach A., Palka T.* Airflow sensitivity assessment based on underground mine ventilation systems modeling // *Energies*. 2017, vol. 10, no. 10, p. 1451. DOI: 10.3390/en10101451.

2. *Круглов Ю. В.* Моделирование систем оптимального управления воздухораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников: дисс. канд. техн. наук. — Пермь, 2006. — 170 с.

3. *Мальцев С. В.* Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: дисс. канд. техн. наук. — Пермь, 2020. — 148 с.

4. *Kempson W. J.* Designing energy-efficient mineshaft systems // *Essays Innovate*. 2014, no. 9, pp. 76–79.

5. *Семина М. А., Левин Л. Ю.* Теоретическое исследование теплообмена между воздушным потоком и крепью шахтного ствола при наличии тепловой конвекции // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 6. — С. 151–167. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-151-167.

6. *Мальцев С. В., Казаков Б. П., Исаевич А. Г., Семина М. А.* Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 2. — С. 46–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.

7. *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт*. — М.: Недра, 1975. — 238 с.

8. Kempson W. J., Webber-Youngman R. C. W., Meyer J. P. Optimizing shaft pressure losses through computational fluid dynamics modelling // *Applied Thermal Engineering*. 2015, vol. 90, pp. 1098 – 1108.

9. Рубель А. А. Исследование аэродинамического сопротивления различных типов конструкций армировки ствола // *Геотехнічна механіка*. — 2017. — № 136. — С. 221 – 232.

10. Deen J. B. Field verification of shaft resistance equations / *Proceedings of the 5th US Mine Ventilation Symposium*. 1991, pp. 647 – 655.

11. Поспелов Д. А., Зайцев А. В., Семин М. А. Обоснование максимальной допустимой скорости воздуха в стволах по фактору аэродинамической нагрузки на технологическое оборудование // *Горное эхо*. — 2020. — № 1 (78). — С. 90 – 94.

12. McPherson M. J. An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts / *Fourth International Mine Ventilation Congress, Brisbane, Queensland*. 1988.

13. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. приказом Ростехнадзора от 11.12.2013 № 599, 2014. — 122 с.

14. Ивановский И. Г. Шахтные вентиляторы: Учебное пособие. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. — 196 с.

15. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff // *Applied Energy*. 2015, vol. 146, pp. 65–73.

16. De Souza E. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages // *Applied Thermal Engineering*. 2015, vol. 90, pp. 1092–1097.

17. Левит В. В., Боршевский С. В., Прокопов А. Ю. Основные направления совершенствования бурения шахтных стволов большого диаметра // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2012. — № 6. — С. 39–46.

18. Скочинский А. А., Ксенофонтова А. И., Харев А. А. и др. Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. — М.: Углетехиздат, 1953. — 363 с. **МИАБ**

REFERENCES

1. Dziurzyński W., Krach A., Palka T. Airflow sensitivity assessment based on underground mine ventilation systems modeling. *Energies*. 2017, vol. 10, no. 10, p. 1451. DOI: 10.3390/en10101451.

2. Kruglov Yu. V. *Modelirovanie sistem optimal'nogo upravleniya vozdukhoraspredeleniem v ventilyatsionnykh setyakh podzemnykh rudnikov* [Modeling of systems for optimal air distribution control in ventilation networks of underground mines], Candidate's thesis, Perm, 2006, 170 p.

3. Mal'tsev S. V. *Issledovanie i razrabotka sposobov opredeleniya aerodinamicheskikh parametrov slozhnykh ventilyatsionnykh sistem podzemnykh rudnikov* [Research and development of methods for determining the aerodynamic parameters of complex ventilation systems of underground mines], Candidate's thesis, Perm, 2020, 148 p.

4. Kempson W. J. Designing energy-efficient mineshaft systems. *Essays Innovate*. 2014, no. 9, pp. 76 – 79.

5. Semin M.A., Levin L. Yu. Theoretical research of heat exchange between air flow and shaft lining subject to convective heat transfer. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 151–167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-151-167.

6. Maltsev S. V., Kazakov B. P., Isaevich A. G., Semin M. A. Air exchange dynamics in the system of large cross-section blind roadways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 46–57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.

7. *Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyatsii ugol'nykh shakht* [Guidelines for the design of ventilation of coal mines], Moscow, Nedra, 1975, 238 p.

8. Kempson W. J., Webber-Youngman R. C. W., Meyer J. P. Optimizing shaft pressure losses through computational fluid dynamics modelling. *Applied Thermal Engineering*. 2015, vol. 90, pp. 1098 – 1108.

9. Rubel A. A. Research of aerodynamic resistance of various types of shaft reinforcement structures. *Geotechnical mechanics*. 2017, no. 136, pp. 221 – 232.

10. Deen J. B. Field verification of shaft resistance equations. *Proceedings of the 5th US Mine Ventilation Symposium*. 1991, pp. 647 – 655.

11. Pospelov D. A., Zaitsev A. V., Semin M. A. Substantiation of the maximum permissible air velocity in the shafts by the factor of aerodynamic load on technological equipment. *Gornoe ekho*. 2020, no. 1 (78), pp. 90 – 94. [In Russ].

12. McPherson M. J. An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts. *Fourth International Mine Ventilation Congress*, Brisbane, Queensland. 1988.

13. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh»*: utv. prikazom Rostekhnadzora ot 11.12.2013 no. 599 [Federal norms and rules in the field of industrial safety «Safety rules for mining and processing of solid minerals»: approved by order of Rostekhnadzor dated 11.12.2013 no. 599], 2014, 122 p. [In Russ].

14. Ivanovskiy I. G. *Shakhtnye ventilyatory*: Uchebnoe posobie [Mine fans. Educational aid], Vladivostok, Izd-vo DVG TU, 2003, 196 p.

15. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. *Applied Energy*. 2015, vol. 146, pp. 65–73.

16. De Souza E. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. *Applied Thermal Engineering*. 2015, vol. 90, pp. 1092–1097.

17. Levit B. V., Borshevskiy S. V., Prokopov A. Yu. The main directions of improving the drilling of mine shafts of large diameter. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 6, pp. 39 – 46. [In Russ].

18. Skochinskiy A. A., Ksenofontova A. I., Kharev A. A. *Aerodinamicheskoe soprotivleniye shakhtnykh stvolov i sposoby ego snizheniya* [Aerodynamic resistance of mine shafts and ways to reduce it], Moscow, Ugletekhizdat, 1953, 363 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Поспелов Дмитрий Андреевич¹ – младший научный сотрудник,
e-mail: dimapospelov7@gmail.com,

Зайцев Артем Вячеславович¹ – д-р техн. наук, зав. сектором,

Семин Михаил Александрович¹ – канд. техн. наук, научный сотрудник,

Мальцев Станислав Владимирович¹ – канд. техн. наук, инженер,

Мизонов Евгений Николаевич – заместитель директора

департамента горного производства ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»

по развитию горного производства, ПАО «ГМК «Норильский никель»,

¹ Горный институт УрО РАН.

Для контактов: Поспелов Д.А., e-mail: dimapospelov7@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.A. Pospelov¹, Junior Researcher, e-mail: dimapospelov7@gmail.com,

A.V. Zaitsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Sector,

M.A. Semin¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,

S.V. Maltsev¹, Cand. Sci. (Eng.), Engineer,

E.N. Mizonov, Deputy Director of Mining Department

at OJSC MMC Norilsk Nickel of developing mining operations,

OJSC MMC Norilsk Nickel, Moscow, Russia,

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia.

Corresponding author: D.A. Pospelov, e-mail: dimapospelov7@gmail.com.

Получена редакцией 02.12.2020; получена после рецензии 10.02.2021; принята к печати 10.08.2021.

Received by the editors 02.12.2020; received after the review 10.02.2021; accepted for printing 10.08.2021.