

УМЕНЬШЕНИЕ ЭФФЕКТА ВОДЯНОЙ ПРОБКИ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТВОЛАХ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГОЙ И ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ РУДНИКА

Е.В. Колесов¹, М.А. Семин¹

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

Аннотация: Представлены результаты разработки способа управления капельной влагой и параметрами системы вентиляции рудника для минимизации эффекта водяной пробки, или бланкет-эффекта, в вентиляционных стволах рудников. Описаны результаты моделирования нестационарных процессов формирования бланкет-эффекта и рассчитаны характерные времена накопления капельной влаги в стволе в зависимости от скорости исходящего воздушного потока, места расположения источника водопритоков и его интенсивности. На примере одного из медно-никелевых рудников сделана количественная оценка смещения рабочей точки главной вентиляторной установки в результате дополнительного аэродинамического сопротивления, создаваемого капельной влагой в стволе. Показано, что для уменьшения влияния бланкет-эффекта на систему вентиляции рудника следует предусмотреть мероприятия, направленные на уменьшение количества капельной влаги, попадающей в ствол. Определены возможные способы управления производительностью главной вентиляторной установки, направленные на минимизацию эффекта водяной пробки в стволе. Выбор конкретного способа зависит от максимальной мощности вентилятора и фактической величины водопритоков в ствол. Показано, что если у вентилятора есть резерв для перехода в зону повышенных расходов, то для минимизации бланкет-эффекта необходимо увеличить частоту вращения рабочего колеса для перехода рабочей точки в положение правее от зоны влияния бланкет-эффекта; если у вентилятора нет резерва для преодоления потенциального барьера водяной пробки, и при этом за барьером вентилятор может устойчиво работать в области высоких расходов, следует временно снизить частоту вращения рабочего колеса для сброса влаги в зумпф и после этого вернуться к прежней частоте, что позволит обойти не успевший сформироваться потенциальный барьер водяной пробки. Промоделировано изменение рабочей точки вентилятора при применении разработанных способов.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, вентиляционный ствол, капеж, капельная влага, водяная пробка, моделирование, управление вентиляцией, главная вентиляторная установка.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90076, а также при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122030100425-6).

Для цитирования: Колесов Е. В., Семин М. А. Уменьшение эффекта водяной пробки в вентиляционных стволах за счет управления капельной влагой и параметрами системы вентиляции рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 62–78. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_62.

Abatement of the effect of slug in ventilation shafts by means of condensed moisture control and ventilation system management in mines

E.V. Kolesov¹, M.A. Semin¹

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

Abstract: The article presents the developed method to control condensed moisture and ventilation system parameters in mines to minimize the slug or the blanket-effect in ventilation shafts. The model results on nonsteady processes of the blanket-effect formation are described, and the characteristic times of condensed moisture accumulation in a shaft depending on the return air flow velocity, location of a water production source and its intensity are calculated. In terms of a copper–nickel mine, the quantitative evaluation is performed for the shift of the main fan set point under the incremental air drag generated by condensed moisture in the shaft. It is shown that abatement of the blanket effect on the mine ventilation system should include activities targeted at reduction in condensed moisture accumulation in the shaft. The practicable methods of the main fan performance management with a view to minimizing the slug effect in the shaft are identified. The choice of a particular method depends on the maximal fan capacity and on the actual values of water inflows in the shaft. It is said that if a fan has a reserve to operate at an increased capacity, then the blanket effect minimization involves an increase in rotation frequency of the impeller to shift the set point of the fan rightwards the influence zone of the blanket effect. If a fan has no reserves to overcome a potential slug barrier, while beyond the barrier the fan is capable to operate stably at a very high air delivery, it is advised to reduce temporarily the rotation frequency of the impeller in order to discharge moisture to a sink hole and, then, to recover the previous frequency, which can eliminate potential formation of a slug. The shift of the fan set point is modeled for each method application.

Key words: mine ventilation, ventilation shaft, water drip, condensed moisture, slug, modeling, ventilation management, main fan.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Federation for Basic Research, Project No. 19-35-90076, and by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, R&D Project Registration No. 122030100425-6.

For citation: Kolesov E. V., Semin M. A. Abatement of the effect of slug in ventilation shafts by means of condensed moisture control and ventilation system management in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(5):62-78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_62.

Введение

Вентиляционные стволы являются важными элементами систем вентиляции подземных рудников. Безаварийная эксплуатация вентиляционных стволов важна для бесперебойного обеспечения всех рабочих зон рудников требуемым количеством свежего воздуха [1 – 3]. В ряде практических ситуаций в воздушном

пространстве вентиляционных стволов рудников может появляться и скапливаться капельная влага. В отечественных источниках данное явление чаще именуется капежом [4, 5] или эффектом водяной пробки [6], а в зарубежных — бланкет-эффектом [7, 8].

Выделяется как минимум две причины этого явления:

- конденсация влаги из поднимающегося вверх по стволу воздуха, имеющего 100%-ю относительную влажность;
- водопритоки в ствол из закрепного пространства через негерметичные участки крепи.

Чрезмерное скопление капельной влаги в стволе создает дополнительное аэродинамическое сопротивление и затрудняет проветривание рудника, а в некоторых случаях может привести к возникновению существенной тяги, приводящей к увеличению депрессии главной вентиляторной установки вплоть до ее перехода в режим неустойчивой работы. В литературе описан ряд практических примеров возникновения таких аварийных ситуаций, вызванных скоплением капельной влаги в вентиляционных стволах [7, 9] и вентиляционных восстающих [8]. Большинство авторов сходятся на том, что диапазон неблагоприятных скоростей воздушного потока, приводящих к появлению бланкет-эффекта, составляет 7,5 – 12,5 м/с [10, 11]. При этом, как отмечается в [12], данный диапазон скоростей получен эмпирически и не интерпретировался с точки зрения теории.

Теоретические исследования условий возникновения водяных пробок и их аэродинамического влияния на сопротивление вентиляционной сети рудников начали проводиться только в последнее время [6, 12 – 14]. В работе [13] представлены результаты трехмерного численного моделирования накопления влаги вследствие конденсации из поднимающегося воздушного потока в вентиляционном стволе в рамках расследования причин выхода из строя главной вентиляторной установки в одной из шахт ЮАР. Для отдельного практического случая теоретически подтверждено, что при скорости воздушной струи 10,1 м/с происходит накопление влаги, а при скоростях выше 12,5 м/с вся влага выносятся из ствола. В [12] дано первое мате-

матическое описание бланкет-эффекта, предложена одномерная математическая модель движения водяных капель в вентиляционном стволе, сделана оценка перепада давления в зависимости от скорости воздуха в стволе и водопритоков из закрепного пространства. В работе сделаны некоторые упрощения, такие как одинаковый максимальный диаметр капель и расположение источника водопритоков только в устье ствола. Исследование [12] было продолжено и развито в работе [6], где была учтена дополнительная депрессия, вызванная водопритоками с учетом их источника. В модифицированной модели учитывалось разнонаправленное движение капель в зависимости от их размера, но полученное значение наиболее неблагоприятной скорости воздушного потока около 3 м/с оказалась значительно ниже известного из практики неблагоприятного диапазона скоростей 7,5 – 12,5 м/с.

Дальнейшая теоретическая проработка была выполнена в работе [14]. В ней были получены аналитические зависимости перепада давления, вызванного весом скопившейся в стволе капельной влаги, от скорости выходящего воздушного потока и высоты залегания источника грунтовых вод. Анализ впервые проводился с учетом фракционного состава капельной влаги. Предложены общие мероприятия по снижению влияния бланкет-эффекта в случае притока грунтовых вод через негерметичную крепь ствола. Тем не менее, в этой работе не затрагивался вопрос управления параметрами системы вентиляции рудника с целью минимизации веса капельной влаги и создаваемого им добавочного аэродинамического сопротивления. Вместе с тем данный вопрос является важным, так как в некоторых практических случаях предложенные ранее мероприятия по минимизации водопритоков в ствол могут оказаться нереализуемы или неэффективны.

Настоящая работа направлена на разработку способа управления параметрами системы вентиляции рудника на предмет минимизации эффекта водяной пробки. Решение данного вопроса требует знания характерных времен накопления капельной влаги в стволах, их соотношения с характерными временами установления воздухораспределения в вентиляционных стволах подземных рудников. Поэтому на первом этапе исследования проводится моделирование нестационарных процессов формирования бланкет-эффекта. Далее на примере одного из медно-никелевых рудников проводится оценка смещения рабочей точки главной вентиляционной установки (ГВУ) по фактору водяной пробки, а полученные данные моделирования используются для определения стратегии изменения параметров работы ГВУ с целью минимизации бланкет-эффекта. Результаты, представленные в данной работе, будут полезны как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации рудников, в которых прогнозируется или существует опасность возникновения бланкет-эффекта в вентиляционных стволах [15 – 17].

Расчет времени формирования водяной пробки

Аналитические зависимости избыточного перепада давления в вентиляционном стволе вследствие влияния эффекта водяной пробки от скорости исходящего потока воздуха с учетом дисперсного состава капельной влаги, представленные в [14], рассчитаны для предельного случая стационарного влагопереноса, т.е. когда общий вынос влаги из ствола (через нижнюю и верхнюю границы) становится равен выделению влаги вследствие конденсации или интенсивности водопритоков в ствол. Однако в начальный период после включения ГВУ процесс формирования водяной пробки в стволе имеет нестационарный характер.

Избыточный перепад давления в стволе вследствие эффекта водяной пробки $\Delta P(t)$, Па, равен весу всех капель, находящихся в данный момент в стволе, отнесенному к площади сечения ствола S , м²:

$$\Delta P(t) = \frac{M(t)g}{S}, \quad (1)$$

где $M(t)$ — масса капельной влаги в стволе, кг, в момент t , с.

В случае формирования бланкет-эффекта за счет конденсации влаги из исходящей воздушной струи рассчитывается следующим образом:

$$M(t) = \int_0^t \left(Q \rho_a \Delta d - \frac{\pi \rho_w S}{6 \cdot 10^9} \left(\int_0^{D_1(t')} (V_a - V_k(D)) n(D) D^3 dD + \int_{D_2(t')}^{D_{\max}} (V_k(D) - V_a) n(D) D^3 dD \right) \right) dt' \quad (2)$$

где $D_1(t')$ и $D_2(t')$ — диаметры капель, достигших верхней и нижней границы ствола соответственно; $D_{\max} \approx 6$ мм — максимальный диаметр капель воды, больше которого капля будет распадаться под действием воздушного потока [18]; V_a — скорость воздушного потока в стволе, м/с; $V_k(D)$ — конечная скорость движения капли, или скорость витания капли, м/с [11]; D_k — критический диаметр капель, соответствующий конечной скорости капель, мм; ρ_w — плотность воды, кг/м³; ρ_a — плотность воздуха, кг/м³; Δd — изменение влагосодержания воздушной струи при подъеме по стволу с момента ее насыщения, кг/кг; $n(D)$ — функция распределения капель по диаметрам, м⁻³мм⁻¹ [19]; Q — расход воздуха в стволе, м³/с.

Формула (2) отражает следующую динамику накопления капельной влаги в стволе. В некоторый начальный период в воздушном пространстве ствола будет происходить накопление капель всех диаметров вследствие конденсации — до тех пор, пока самые легкие капли не достигнут верхней границы ствола или самые тяжелые капли не достигнут нижней границы. В этот начальный период $D_1(t') = 0$, а $D_2(t') = D_{\max}$. После этого мелкие капли все больших диаметров будут покидать ствол через верхнюю границу до тех пор, пока $D_1(t') < D_k$; а крупные капли все меньших диаметров будут покидать ствол через нижнюю границу, пока $D_2(t') > D_k$. Через некоторое время количество капель всех размеров, конденсирующихся в стволе, сравняется с количеством капель, покидающих ствол.

Время, затрачиваемое мелкими легкими каплями на преодоление пути от отметки h , на которой начинается процесс конденсации влаги, отсчитываемой от поверхности, до верхней границы ствола:

$$t_1(D) = \frac{h}{V_a - V_k(D)}, \quad (3)$$

а время, затрачиваемое крупными тяжелыми каплями на преодоление пути от отметки, на которой начинается конденсация влаги, до нижней границы ствола:

$$t_2(D) = \frac{H - h}{V_k(D) - V_a}, \quad (4)$$

где H — глубина ствола, м.

Аналогично в случае формирования бланкет-эффекта за счет водопритокков из закрепного пространства рассчитывается следующим образом:

$$M(t) = \int_0^t \left(q - \frac{\pi \rho_w S}{6 \cdot 10^9} \left(\int_0^{D_1(t')} (V_a - V_k) n(D) D^3 dD + \int_{D_2(t')}^{D_{\max}} (V_k - V_a) n(D) D^3 dD \right) \right) dt' \quad (5)$$

где q — интенсивность водопритокков в ствол, кг/с.

Расчетные формулы (3), (5) справедливы также и для случая водопритокков из закрепного пространства, при этом в данном случае h — высота источника водопритокков.

Попадание в вентиляционный ствол грунтовых вод из закрепного пространства является более опасной ситуацией с точки зрения формирования водяной пробки по сравнению с конденсационным влаговыделением из исходящей воздушной струи [6, 12, 20], поэтому дальнейший анализ влияния капельной влаги на вентиляцию будет проводиться для условий водопритокков. На рис. 1 в качестве примера представлены графики временной динамики избыточного перепада давления в стволе вследствие бланкет-эффекта при интенсивности водопритокков 1,3 кг/с и 5 кг/с для случаев, когда источник водопритокков расположен вблизи сопряжения с вентиляционным каналом ($h/H = 0$), в средней части ствола ($h/H = 0,5$) и вблизи сопряжения с вентиляционным горизонтом ($h/H = 1$). В расчетах применялась функция распределения капель по размерам Розина-Раммлера $F(D) = 1 - \exp\left(-\frac{D}{\bar{D}}\right)^m$ [11].

Из рис. 1 следует, что скорость накопления капельной влаги в стволе существенно зависит от высоты расположения источника водопритокков, его интенсивности, а также от скорости воздушного потока в стволе. От соотношения этих параметров зависит итоговое время накопления влаги в стволе, при этом период

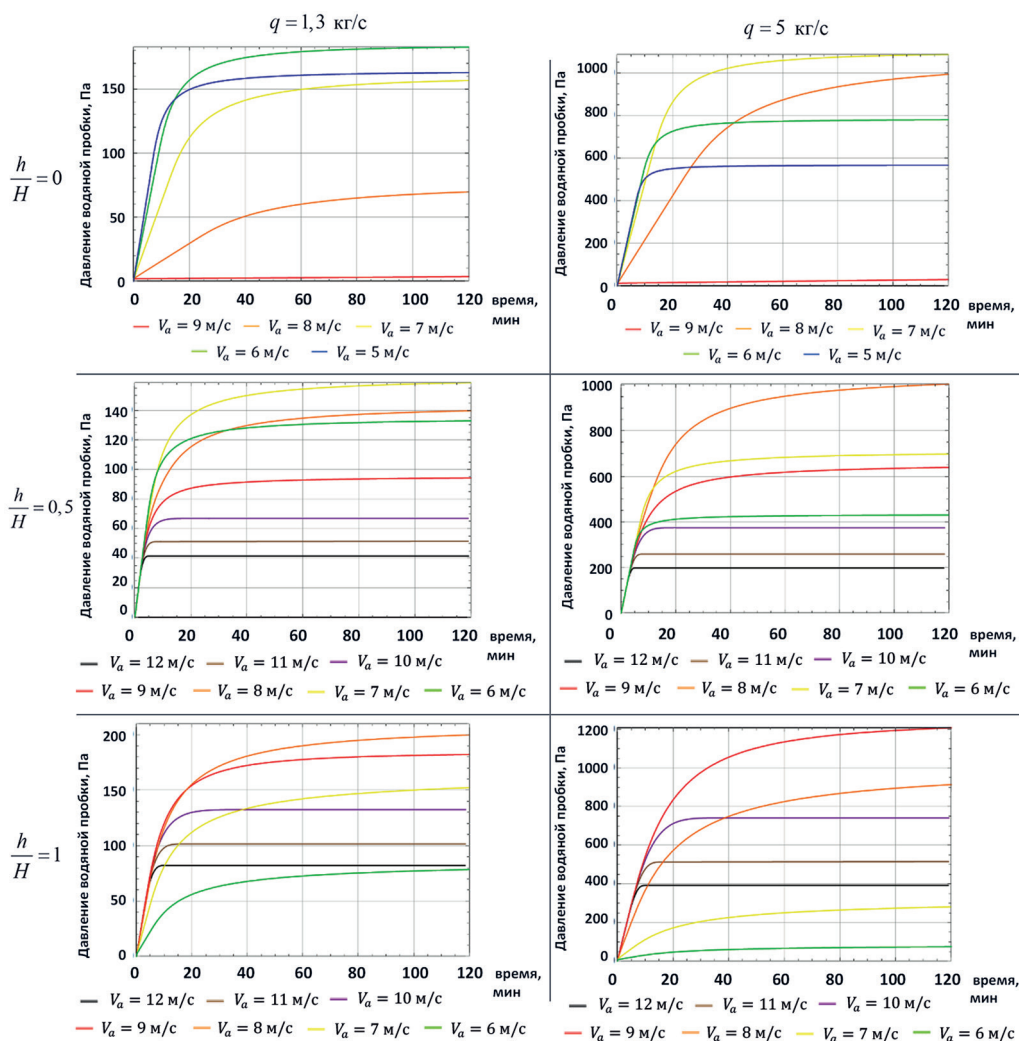


Рис. 1. Временная динамика перепада давления в стволе вследствие бланкет-эффекта

Fig. 1. Temporal dynamics of pressure drop in the upcast shaft due to the blanket-effect

выхода бланкет-эффекта на стационарное значение может составлять от нескольких минут до нескольких десятков минут.

Из рис. 1 видно, что во всех случаях избыточное давление водяной пробки достаточно быстро растет в некоторый начальный период формирования бланкет-эффекта вследствие накопления капель воды всех возможных размеров, а далее скорость прироста избыточного давления спадает в связи с тем, что часть

капель успевает покинуть пространство ствола через его верхнюю и нижнюю границу и суммарная масса капельной влаги в стволе стремится к стационарному значению. Таким образом, влияние бланкет-эффекта на работу ГВУ и вентиляцию рудника может быть существенным еще до достижения максимального избыточного давления водяной пробки. Определим время формирования бланкет-эффекта как время накопления 90% капельной влаги от максимально возмож-

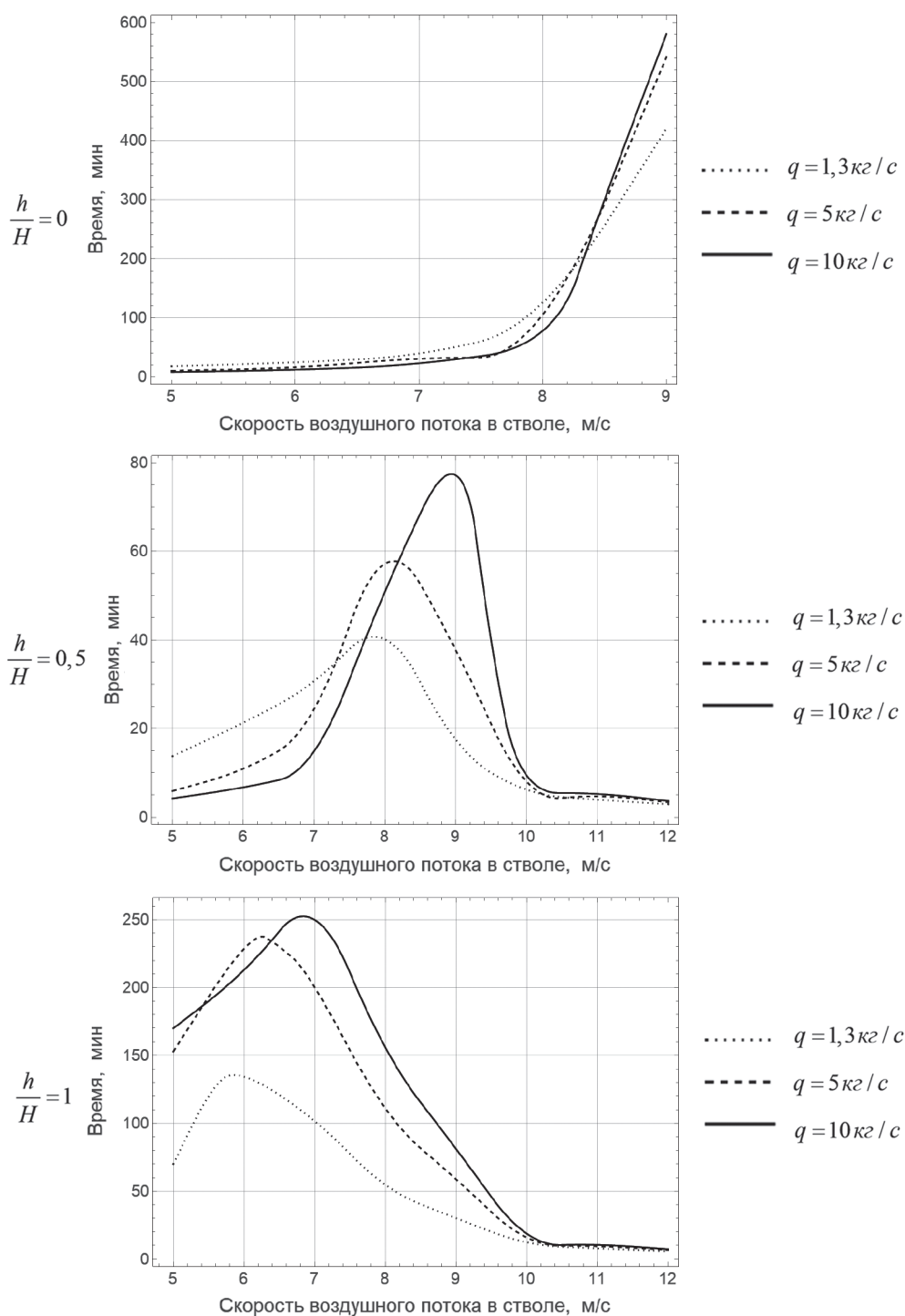


Рис. 2. Время формирования водяной пробки в стволе в зависимости от скорости воздушного потока
 Fig. 2. Time of water build-up in an upcast shaft depending on airflow velocity

**Исходные данные для расчета времени формирования
водяной пробки в вентиляционном стволе**
Initial data for calculating the time of water build-up in an upcast shaft

Глубина ствола, м	1600,6
Диаметр / сечение ствола в свету, м ²	6,5 м / 33,18
Абсолютная отметка устья ствола, м	+278,6
Угол наклона лопаток вентилятора, град.	0
Частота вращения рабочего колеса, об/мин	450
Фактическая производительность ГВУ, м ³ /с	642,2
Фактическая скорость воздуха в стволе, м/с	13,3
Фактический напор ГВУ, Па	2818
Фактические водопритокі в ствол	28 м ³ /ч = 7,8 кг/с
Абсолютная отметка подошвы наиболее водообильного водоносного горизонта, м	– 821

ной при данной скорости воздушного потока в стволе. На рис. 2 представлены графики времени формирования водяной пробки в стволе в зависимости от скорости воздушного потока при интенсивности водопритокі 1,3; 5 и 10 кг/с для случаев, когда источник водопритокі расположен в верхней ($h/H = 0$), средней ($h/H = 0,5$) и нижней ($h/H = 1$) частях ствола.

Из рис. 2 видно, что время формирования водяной пробки в стволе зависит от высоты источника водопритокі. При прочих равных условиях водяная пробка в стволе формируется быстрее, когда источник водопритокі расположен в средней части ствола. Это объясняется тем, что каплям всех размеров в среднем приходится преодолевать более короткий путь, прежде чем они покинут ствол.

В случае, когда источник водопритокі расположен в верхней части ствола ($h/H = 0$), время накопления увеличивается с ростом скорости воздушного потока в стволе, а при скоростях выше $V_{\max} = 9,26$ м/с капли всех размеров будут выноситься на поверхность, не попадая в ствол, и в этом случае формирование водяной пробки происходить не будет.

Произведем расчет избыточного перепада давления водяной пробки и времени ее формирования для условий вентиляционного ствола одного из медно-никелевых рудников, расположенного на севере Красноярского края. Главная вентиляционная установка (ГВУ) вентиляционного ствола оборудована двумя центробежными вентиляторами главного проветривания ВЦД-47 «Север» — основным и резервным. Регулирование производительности ГВУ осуществляется путем изменения частоты вращения рабочего колеса. Исходные данные для расчета представлены в таблице.

Интенсивность водопритокі R составляет:

$$R = 3600 \frac{q}{S} = 3600 \frac{7,8}{33,18} = 844 \text{ мм/ч.} \quad (6)$$

Отношение глубины водоносного горизонта к глубине ствола $h/H = 0,7$.

Избыточный перепад давления водяной пробки от скорости воздушного потока в вентиляционном стволе для принятых исходных данных согласно [14] представлен графически на рис. 3.

Избыточный перепад давления вследствие наличия капельной влаги в вентиляционном стволе за счет водопритокі

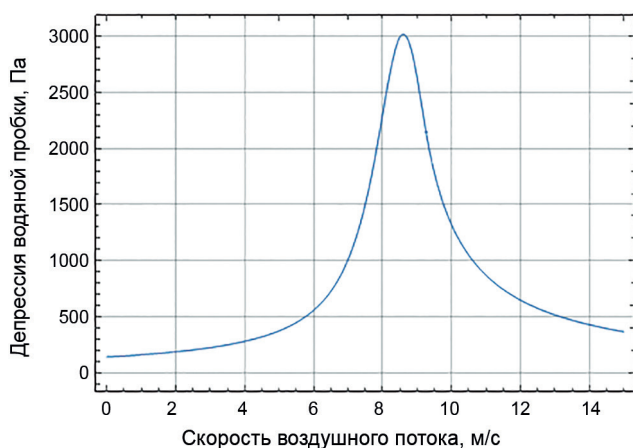


Рис. 3. Перепад давления водяной пробки от скорости воздушного потока в вентиляционном стволе
Fig. 3. Pressure drop due to water blanket-effect versus airflow velocity in the upcast shaft

при фактической скорости воздушного потока в стволе 13,3 м/с составляет 487 Па (17,3% от напора ГВУ). В исследуемом случае время накопления капельной влаги согласно (3) – (5) составляет 5 – 7 мин.

Оценка влияния водяной пробки на работу главной вентиляторной установки

Наличие в стволе водяной пробки приводит к тому, что ГВУ затрачивает часть депрессии ΔP на преодоление дополнительного аэродинамического сопротивления, вызванного капельной влагой.

Изменение рабочей точки ГВУ вследствие бланкет-эффекта существенно зависит от напорной характеристики ГВУ и ее рабочей точки в начальный момент. Для расчета изменения рабочей точки ГВУ применялся графический способ.

При отсутствии влаги в стволе рабочая точка ГВУ определяется пересечением кривых напорной характеристики вентилятора (при заданном угле поворота лопаток и частоте вращения рабочего колеса) и характеристики вентиляционной сети, рассчитываемой согласно уравнению Аткинсона (в гидравлике – Дарси-Вейсбаха) [21]:

$$H_0 = R_0 Q_0^2, \quad (7)$$

где H_0 – депрессия вентиляционной сети, Па; R_0 – аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети, Н·с²/м⁸; Q_0 – расход воздуха, поступающий в рудник, м³/с.

При наличии в стволе капельной влаги ее количество будет постепенно возрастать до момента установления стационарного влияния бланкет-эффекта, при этом будет увеличиваться общее аэродинамическое сопротивление сети и возрастать депрессия ГВУ до момента установления устойчивого равновесного состояния:

$$H_1 = R_1 Q_1^2 = (R_0 + R_b(Q_1)) Q_1^2, \quad (8)$$

где H_1 – депрессия вентиляционной сети с учетом влияния водяной пробки, Па; $R_b(Q_1)$ – аэродинамическое сопротивление водяной пробки, Н·с²/м⁸; Q_1 – расход воздуха, поступающий в рудник при наличии водяной пробки, м³/с.

На рис. 4 представлена характеристика вентиляционной сети с учетом и без учета влияния бланкет-эффекта, а также аэродинамические характеристики ГВУ ВЦД-47 «Север». Фактическая рабочая точка ГВУ соответствует положению 7.

Из рис. 4 видно, что аэродинамическая характеристика вентиляционной сети с учетом водяной пробки проявляет немонотонный характер, в связи с чем возможна ситуация неединственности решения при пересечении характеристики ГВУ ВЦД-47 «Север» при частотах вращения рабочего колеса около 375 об/мин. ГВУ в данном случае может устойчиво функционировать при рабочих точках 3 или 5, при этом точка 4 является точкой неустойчивого равновесия, и при малом изменении параметров работы ГВУ перейдет в точку 5. «Выбор» между устойчивыми рабочими точками 3 и 5 зависит от предыстории работы ГВУ. Если ГВУ стала работать при 375 об/мин сразу после включения, то в некоторый начальный момент она будет работать с рабочей точкой 8, при этом через некоторый период после накопления капельной влаги в стволе рабочая точка перейдет в положение 5. Если ГВУ до переключения на 375 об/мин работала достаточно долго при частоте вращения рабочего колеса менее 375 об/мин

(например, при 350 об/мин) и к моменту переключения в стволе накопилось достаточно большое количество капельной влаги, такое, что рабочая точка ГВУ соответствует точке 2, то при переходе к 375 об/мин рабочая точка ГВУ перейдет в устойчивое положение 3.

Максимально возможное значение депрессии водяной пробки составляет около 3000 Па при скорости воздушного потока в стволе 8,7 м/с (см. рис. 3), что составляет существенную часть напора ГВУ, поэтому критически важно для нормального функционирования системы вентиляции рудника управлять капельной влагой в вентиляционных стволах и параметрами системы вентиляции для минимизации влияния водяной пробки на проветривание рудника.

Управление капельной влагой и параметрами системы вентиляции

В ситуациях, когда появление капельной влаги в стволе за счет водопритоков может создать существенное дополни-

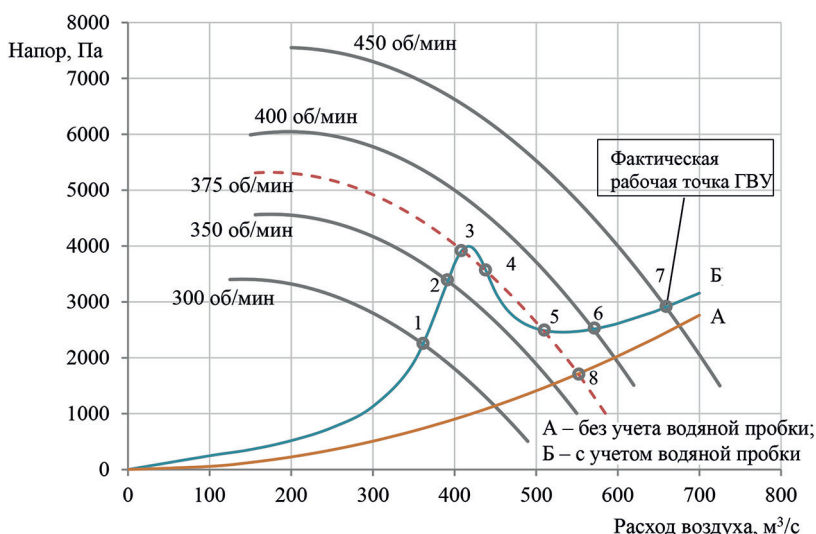


Рис. 4. Аэродинамические характеристики ГВУ ВЦД-47 «Север» при различных частотах вращения рабочего колеса; А и Б — характеристика вентиляционной сети

Fig. 4. Main fan performance curves of VCD-47 «North» at different rotational speeds of the impeller; A, B — mine ventilation network characteristic

тельное аэродинамическое сопротивление по критериям прироста сопротивления на величину более 10 % от проектного сопротивления ствола и близости рабочей точки ГВУ к зоне неустойчивой работы, для исключения возникновения бланкет-эффекта или существенного уменьшения его влияния на систему вентиляции рудника как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации рудника следует предусмотреть следующие мероприятия, направленные на уменьшение количества капельной влаги, попадающей в ствол.

1. Герметизация крепи ствола в местах водопритоков с целью исключения или уменьшения интенсивности попадания влаги в ствол.

2. Реализация системы водоулавливания в стволе в местах ожидаемых водопритоков ниже водоносных горизонтов. Подобные системы используются, как правило, при строительстве стволов, однако их применение актуально и в действующих вентиляционных стволах в условиях наличия водопритоков из закрепного пространства. В [5] представ-

лена принципиальная схема системы водоулавливания: у крепи ствола устанавливается водоулавливающий кольцевой желоб, в который собирается большая часть падающей по стволу воды. Из водоулавливающего желоба вода по шлангу стекает в перекачную насосную станцию. Водоулавливающие желоба делают из листовой стали толщиной 3–4 мм или из швеллера № 20–30. Ширина желоба 20–30 см, высота 20–25 см. При значительных водопритоках для увеличения площади улавливания воды к желобу прикрепляют козырек.

3. Реализация системы дренирования воды, сущность которой заключается в бурении шпуров в стенках ствола на уровне водоносных горизонтов и установке в них водоспускных или забивных фильтров [5]. Фильтры изготавливают из труб диаметром от 32 до 50 мм в зависимости от интенсивности водопритоков. Водозаборная часть фильтров перфорируется отверстиями, диаметр которых зависит от крупности зерен горных пород и дебита водоносного горизонта (обычно принимают равным 2–3

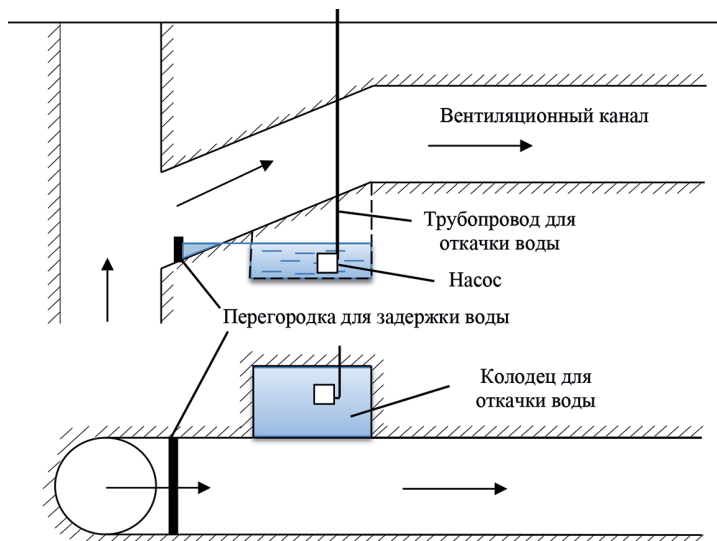
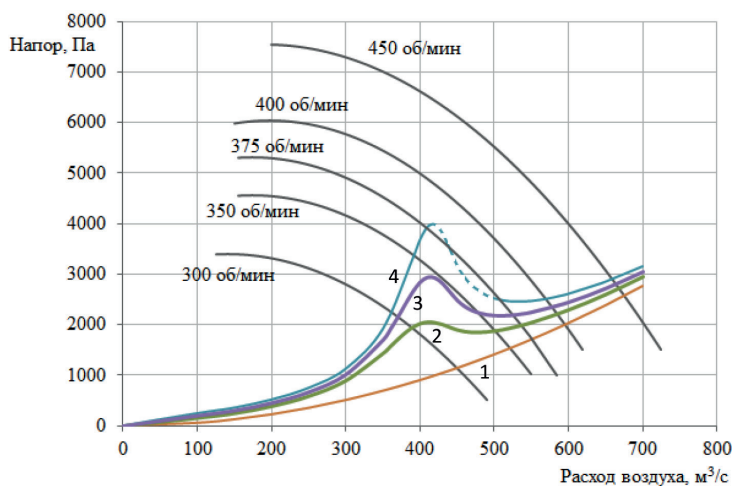


Рис. 5. Система водоулавливания и откачки воды из вентиляционного канала ГВУ
Fig. 5. Water catchment and pumping system from the main fan ventilation drift



1 – без учета влияния водяной пробки от водопритоков; 2 – с учетом водопритоков 3,9 кг/с (50%);
3 – с учетом водопритоков 5,9 кг/с (75%); 4 – с учетом водопритоков 7,8 кг/с (100%)

Рис. 6. Аэродинамические характеристики ГБУ ВЦД-47 «Север»; характеристика вентиляционной сети
Fig. 6. Main fan performance curves of VCD-47 «North»; mine ventilation network characteristic

диаметрам зерен пород). Дренажируемая с помощью фильтров вода перепускается по резиновым шлангам или металлическим трубам в водоулавливающие желоба или в перекачную насосную станцию.

4. Реализация системы водоулавливания и откачки воды в вентиляционном канале ствола с целью исключения повторного попадания влаги в воздушное пространство ствола. Для улавливания воды, попадающей в вентиляционный канал, рекомендуется на сопряжении со стволом соорудить непроницаемую перегородку и установить насос с автоматическим включением для откачки воды на поверхность. Схема расположения элементов системы водоулавливания и откачки воды из вентиляционного канала ГБУ представлена на рис. 5. Согласно [9], реализация подобной системы позволила существенно уменьшить влияние водяной пробки на работу ГБУ в вентиляционном стволе шахты № 19–20 треста «Советскуголь» и исключить периодический выход рабочей точки ГБУ в зону неустойчивой работы.

Применение данных мероприятий позволит «сгладить» характеристику вентиляционной сети. На рис. 6 в качестве примера приведены характеристики вентиляционной сети для случаев, когда с помощью реализованных выше мероприятий удалось снизить интенсивность водопритоков в ствол на 25% (кривая 3) и на 50% (кривая 2).

На рис. 7 представлен график максимальной депрессии водяной пробки в зависимости от процента снижения поступления воды в ствол для исследуемого случая.

Из графика видно, что для снижения влияния водяной пробки в стволе в два раза требуется сократить поступление влаги примерно на 35%.

В случае, когда применение мероприятий 1–4 неосуществимо или труднореализуемо, например, из-за неизвестности источника, распределенных водопритоков и пр., то снизить влияние бланкет-эффекта возможно с помощью перераспределения воздушных потоков, а также с помощью регулирования параметров ГБУ.

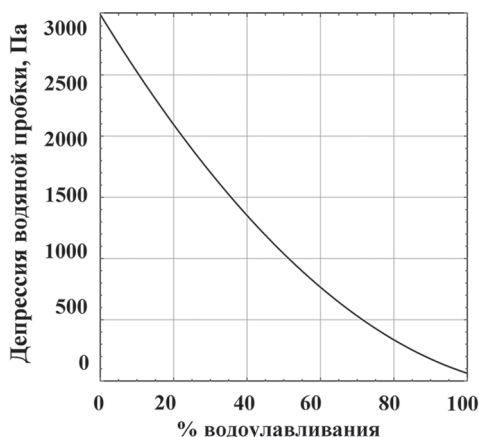


Рис. 7. Максимальная депрессия водяной пробки в зависимости от снижения поступления воды в ствол
 Fig. 7. Maximum water plug depression as a function of water catchment in the shaft

При наличии в руднике более одного вентиляционного ствола следует предусмотреть перераспределение исходящих воздушных потоков между ними таким образом, чтобы скорость движения воздуха в стволах лежала вне опасного диапазона наибольшего влияния бланкет-эффекта. Перераспределение воздушных потоков между стволами следует производить с учетом следующих требований:

- расход воздуха, подаваемого в рудник, должен быть не менее требуемого расхода, рассчитанного по соответствующим методикам, при этом максимальная скорость воздушного потока в стволах не должна превышать 15 м/с, согласно ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»;
- новое воздухораспределение не должно приводить к увеличению энергопотребления ГВУ.

Если проектом предусмотрена схема вентиляции рудника с одним вентиляционным стволом, то выбор диаметра ствола на стадии проектирования рудника следует производить, исходя из минимизации эффективного аэродинамического сопротивления ствола с учетом

влияния бланкет-эффекта. На стадии эксплуатации регулирование заключается в смещении рабочей точки ГВУ вправо (за счет изменения угла наклона лопаток вентилятора или увеличения частоты вращения рабочего колеса) — в область больших расходов воздуха, при этом регулирование следует производить так, чтобы не увеличилась суммарная потребляемая мощность ГВУ. Возможны несколько ситуаций, которые можно продемонстрировать на примере аэродинамических характеристик ГВУ ВЦД-47 «Север» (см. рис. 4).

1. В случае, когда ГВУ работает при частотах вращения рабочего колеса от 300 до 400 об/мин, рабочая точка (например, точка 2 при 350 об/мин) будет находиться в зоне существенного влияния водяной пробки, поэтому для минимизации бланкет-эффекта необходимо увеличить частоту вращения рабочего колеса для перехода рабочей точки в положение правее от зоны влияния бланкет-эффекта (например, точка 6 или 7 в зависимости от требуемого количества воздуха и КПД вентилятора).

2. Особого рассмотрения требует случай работы ГВУ с частотой вращения 375 об/мин.

В этой ситуации есть несколько точек пересечения характеристики ГВУ и эффективной характеристики вентиляционной сети, учитывающей наличие влаги в стволе. В начальный момент после включения ГВУ капельная влага в воздушном пространстве ствола присутствует в относительно малом количестве, и рабочая точка ГВУ соответствует точке 8 на рис. 4. Далее происходит нестационарный процесс накопления капельной влаги в стволе в течение нескольких десятков минут с постепенным выходом рабочей точки ГВУ в состояние 5 (см. рис. 4). Рабочая точка 4 не может быть реализована на практике, так как является точкой неустойчивого равновесия. Рабочая точка 3 может быть реализована в том случае, если ГВУ перед этим работала в режиме с рабочей точкой, лежащей левее точки 3 (например, с рабочей точкой 2 при 350 об/мин). В этом случае в стволе к моменту перехода с 350 об/мин к 375 об/мин накопилось достаточное количество капельной влаги для того, чтобы рабочая точка ГВУ перешла в состояние 3, а не 5. Для выхода из зоны влияния бланкет-эффекта аналогично предыдущему случаю необходимо увеличивать частоту вращения рабочего колеса.

3. В случае, если у ГВУ нет резерва, чтобы преодолеть потенциальный барьер водяной пробки (если ГВУ работает при максимальной частоте вращения рабочего колеса), и при этом за потенциальным барьером вентилятор может устойчиво работать в области высоких расходов, необходимо сначала снизить частоту вращения рабочего колеса и временно перейти в область сниженных расходов, чтобы сбросить большую часть капельной влаги в зумпф. После этого следует вновь перевести ГВУ в режим с максимальной частотой вращения рабочего колеса, что позволит выйти в область повышенных расходов, «пере-

скочив» не успевший сформироваться потенциальный барьер водяной пробки.

4. В случае, когда ГВУ не имеет резерва, чтобы преодолеть потенциальный барьер водяной пробки или работать в режиме повышенной производительности в области за потенциальным барьером, уменьшить влияние бланкет-эффекта возможно только с помощью мероприятий, направленных на уменьшение количества капельной влаги, попадающей в ствол.

Таким образом, выбор стратегии управления параметрами ГВУ для минимизации влияния бланкет-эффекта зависит как от резерва по мощности главной вентиляторной установки, так и от параметров водопритоков в ствол и нестационарности процесса накопления влаги.

Заключение

Основные результаты проведенного исследования представлены ниже.

- Накопление капельной влаги в вентиляционных стволах существенным образом влияет на работу главной вентиляторной установки и проветривание всего рудника, при этом процесс формирования и дальнейшей эволюции бланкет-эффекта зависит от механизма появления капельной влаги в воздушном пространстве ствола (конденсация из исходящего воздуха или водопритоки в ствол из закрепного пространства), поэтому в рудниках, в которых прогнозируется или существует опасность возникновения бланкет-эффекта в вентиляционных стволах, необходимо оценивать его вклад в увеличение аэродинамического сопротивления стволов и минимизировать его влияние с учетом механизма появления капельной влаги в стволе как на стадии проектирования рудника, так и на стадии эксплуатации.

- Рассчитано общее время формирования водяной пробки в вентиляционных стволах в зависимости от скорости воздушного потока в стволе, места

расположения источника водопритоков и его интенсивности.

- Сделана количественная оценка смещения рабочей точки главного вентилятора в результате дополнительного аэродинамического сопротивления, создаваемого капельной влагой в вентиляционном стволе. Определена зависимость этого смещения от места расположения источника водопритоков и его интенсивности.

- Определены возможные способы минимизации эффекта водяной пробки

в вентиляционном стволе, связанные с регулированием параметров работы ГВУ и учитывающие нестационарный характер накопления и выноса капельной влаги в стволе, при этом выбор конкретного способа зависит от максимальной мощности главной вентиляторной установки и фактической величины водопритоков в ствол. На примере одного из медно-никелевых рудников осуществлено моделирование изменения рабочей точки вентилятора при применении разработанных способов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Л. Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки рудников: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2010. — 44 с.
2. Пестрикова В. С., Тарасов В. В., Загвоздкин И. В. Жизненные циклы системы комплекса шахтных стволов на верхнекамском месторождении // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 3. — С. 213—221. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-207-215.
3. Князев Н. А., Кормщиков Д. С. Повышение безопасности эвакуации горнорабочих через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи в холодное время года на глубоком руднике // Горное эхо. — 2022. — № 3(88). — С. 74—80. DOI: 10.7242/echo.2022.3.12.
4. Денисенко Е. А. Влияние капежа в вертикальных шахтных стволах на проектирование плановых координат гравитационным способом // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — 2012. — № 38. — С. 60—69.
5. Картозия Б. А., Корчак А. В., Левицкий А. М., Лернер В. Г., Малышев Ю. Н., Рахманинов Ю. П., Резуненко В. И., Смирнов В. И., Федунец Б. И., Филимонов Б. А., Шуплик М. Н. Шахтное и подземное строительство: учебник. Т. 1. — М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. — 607 с.
6. Шалимов А. В., Казаков Б. П., Зайцев А. В. Аналитический подход к оценке эффекта водяной пробки в вентиляционных стволах шахт // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 6. — С. 39—48. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3234.
7. Lambrechts V. J. The value of water drainage in upcast mine shafts and fan drifts // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1956, March, pp. 307—324.
8. De Souza E. The mystery of the ventilation raises / Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. Golden, USA: Colorado School of Mines. 2017, pp. 135—145.
9. Блудов А. Е. Исследование влияния падающей воды в вентиляционных стволах на проветривание шахт // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. — 1969. — № 5(23). — С. 22—26.
10. McPherson M. J. Subsurface ventilation and Environmental engineering. Chapman & Hall, 2009, 824 p.
11. Brake D. J. Mine ventilation: a practitioner's manual. Brisbane, Australia, Mine Ventilation, 2012, 791 p.
12. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // Thermal Science and Engineering Progress. 2020, vol. 20, pp. 107—116. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100760.
13. Viljoen J., von Glehn F. H. Investigation of water build-up in vertical upcast shafts through CFD analysis / Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress. Springer, Singapore. — 2019, pp. 1003—1014. DOI: 10.1007/978-981-13-1420-9_86.

14. Kolesov E., Kazakov B., Shalimov A., Zaitsev A. Study of the water build-up effect formation in upcast shafts // *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 6, article 1288. DOI: 10.3390/math11061288.
15. Колесов Е. В., Семин М. А., Казаков Б. П., Князев Н. А. Совершенствование метода расчета коэффициента теплоотдачи шахтного вентиляционного ствола по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 3. — С. 57–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_57.
16. Казаков Б. П., Колесов Е. В., Накаряков Е. В., Исаевич А. Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 6. — С. 5–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5.
17. Nel A. J. H., Vosloo J. C., Mathews M. J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations // *Journal of Energy in Southern Africa*. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 22–32.
18. Ren W., Reuttsch J., Weigand B. Direct numerical simulation of water droplets in turbulent flow // *Fluids*. 2020, vol. 5, p. 158. DOI: 10.3390/fluids5030158.
19. Малышенко Ю. И., Роечко А. Н. Учет мелкокапельной фракции в функции распределения дождевых капель по размерам для терагерцового диапазона волн // *Радиофизика та електроніка*. — 2009. — Т. 14. — № 3. — С. 323–330.
20. Ptaszynski B., Łuczak R., Zyczkowski P., Kuczera Z. Thermodynamic processes of the air flowing through a ventilation shaft in underground mines // *Archives of Mining Sciences*. 2018, vol. 63, no. 1, pp. 149–163. DOI: 10.24425/118892.
21. Thakur P. Advanced mine ventilation. Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control. 1st ed., 2018, 528 p. DOI: 10.1016/C2014-0-04167-6. **ПІАБ**

REFERENCES

1. Levin L. Yu. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy resursosberegayushchikh sistem vozdukhopodgotovki rudnikov* [Theoretical and technological foundations of resource-saving air treatment systems for mines], Doctor's thesis, Perm, GI UrO RAN, 2010, 44 p.
2. Pestrikova V. S., Tarasov V. V., Zagvozdin I. V. Life cycles of the mine shaft complex system in verkhnekamskoye deposit. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, no. 3, pp. 213–221. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-207-215.
3. Knyazev N. A., Kormshnikov D. S. Improving the safety of miners evacuation through upcast shafts during the airflow reversal in the cold season at a deep mine. *Gornoe ekho*. 2022, no. 3(88), pp. 74–80. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.3.12.
4. Denisenko E. A. Influence of drop in vertical mine shafts on the design of planned coordinates by gravity method. *Scientific papers of Donetsk National Technical University*. 2012, no. 38, pp. 60–69. [In Russ].
5. Kartoziya B. A., Korchak A. V., Levitskiy A. M., Lerner V. G., Malyshev Yu. N., Rakhmaninov Yu. P., Rezunenkov V. I., Smirnov V. I., Fedunets B. I., Filimonov B. A., Shuplik M. N. *Shakhtnoe i podzemnoe stroitel'stvo: uchebnik*. T. 1 [Mine and underground construction: textbook, vol. 1], Moscow, Izd-vo Akademii gornykh nauk, 2001, 607 p.
6. Shalimov A. V., Kazakov B. P., Zaitsev A. V. Analytical approach to estimation of water build-up effect in mine ventilation shafts. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 6, pp. 39–48. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3234.
7. Lambrechts V. J. The value of water drainage in upcast mine shafts and fan drifts. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1956, March, pp. 307–324.
8. De Souza E. The mystery of the ventilation raises. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. Golden, USA: Colorado School of Mines. 2017, pp. 135–145.
9. Bludov A. E. Study of the influence of falling water in upcast shafts on the mine ventilation. *Tekhnika bezopasnosti, okhrana truda i gornospasatel'noe delo*. 1969, no. 5(23), pp. 22–26. [In Russ].
10. McPherson M. J. *Subsurface ventilation and Environmental engineering*. Chapman & Hall, 2009, 824 p.
11. Brake D. J. *Mine ventilation: a practitioner's manual*. Brisbane, Australia, Mine Ventilation, 2012, 791 p.

12. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020, vol. 20, pp. 107–116. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100760.
13. Viljoen J., von Glehn F. H. Investigation of water build-up in vertical upcast shafts through CFD analysis. *Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress*. Springer, Singapore. 2019, pp. 1003–1014. DOI: 10.1007/978-981-13-1420-9_86.
14. Kolesov E., Kazakov B., Shalimov A., Zaitsev A. Study of the water build-up effect formation in upcast shafts. *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 6, article 1288. DOI: 10.3390/math11061288.
15. Kolesov E. V., Semin M. A., Kazakov B. P., Knjazev N. A. Improvement of calculation method for heat transfer coefficient in air shaft based on experimental measurements in reversal ventilation mode. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 57–71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_57.
16. Kazakov B. P., Kolesov E. V., Nakariakov E. V., Isaevich A. G. Models and methods of aerogasdynamic calculations for ventilation networks in underground mines: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 6, pp. 5–33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5.
17. Nel A. J. H., Vosloo J. C., Mathews M. J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 22–32.
18. Ren W., Reutzsich J., Weigand B. Direct numerical simulation of water droplets in turbulent flow. *Fluids*. 2020, vol. 5, p. 158. DOI: 10.3390/fluids5030158.
19. Malysenko Yu. I., Roenko A. N. Taking into account of small droplets in rain drop size distribution function for terahertz waverange. *Radiofizika ta elektronika*. 2009, vol. 14, no. 3, pp. 323–330. [In Russ].
20. Ptaszynski B., Łuczak R., Zyczkowski P., Kuczera Z. Thermodynamic processes of the air flowing through a ventilation shaft in underground mines. *Archives of Mining Sciences*. 2018, vol. 63, no. 1, pp. 149–163. DOI: 10.24425/118892.
21. Thakur P. *Advanced mine ventilation. Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control*. 1st ed., 2018, 528 p. DOI: 10.1016/C2014-0-04167-6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колесов Евгений Викторович¹ — инженер,

e-mail: kolesovev@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-0755-7405,

Семин Михаил Александрович¹ — д-р техн. наук,

ученый секретарь, зав. лабораторией,

ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,

¹ Горный институт УрО РАН.

Для контактов: Колесов Е.В., e-mail: kolesovev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.V. Kolesov¹, Engineer,

e-mail: kolesovev@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-0755-7405,

M.A. Semin¹, Dr. Sci. (Eng.),

Academic Secretary, Head of Laboratory,

ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,

¹ Mining Institute of Ural Branch,

Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: E.V. Kolesov, e-mail: kolesovev@gmail.com.

Получена редакцией 12.10.2023; получена после рецензии 13.02.2024; принята к печати 10.04.2024.

Received by the editors 12.10.2023; received after the review 13.02.2024; accepted for printing 10.04.2024.

