

УДК 629.039.58

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

Шифр специальности ВАК: 2.8.6

Определение показателя конвективной устойчивости воздуха в стволах при нулевом режиме вентиляции рудника

А.В. Шалимов[✉], Д.С. Кормщиков, М.Д. Попов

Горный институт УрО РАН, Россия, г. Пермь

[✉]shalimovav@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью прогнозирования конвективного движения воздуха в шахтных стволах в аварийных режимах вентиляции рудников, связанных с прекращением их принудительного проветривания. Возникновение протяжённых конвективных вихрей в стволах интенсифицирует процессы переноса тепла и дыма в случае пожара, а также уменьшает величину естественной тяги, слабо проветриваемой рудник после отключения вентилятора. Знание условий возникновения тепловой конвекции в стволах позволяет точнее планировать мероприятия по борьбе с рудничными пожарами. *Цель:* разработка методики оценки конвективной устойчивости воздуха применительно к условиям шахтных стволов. *Объекты:* шахтные стволы. *Методы:* аналитическое и численное моделирование процессов возникновения и развития конвекции в шахтном стволе; сравнительный анализ способов оценки конвективной устойчивости неравномерно нагретой среды в поле силы тяжести. *Результаты.* Проанализированы способы оценки конвективной устойчивости воздуха в зависимости от значения вертикального градиента температуры. Показано, что аналитические методы оценки в приближениях сжимаемой жидкости в гидродинамике, идеального газа в метеорологии или по знаку вертикального градиента плотности дают результаты, значительно различающиеся количественно. С целью выявления наиболее адекватного способа оценки применительно к рудничным условиям проведено численное моделирование конвективного движения воздуха в стволе при разных значениях его вертикального температурного градиента. Расчётным путём установлено, что неподвижный воздух в стволе при подогреве снизу оказывается ещё более устойчивым, чем следует из самой оптимистичной оценки, и критический температурный градиент воздуха при этом почти в 5 раз превышает адиабатический. Очевидной причиной полученного результата является стабилизирующее действие сил вязкости, многократно возрастающее в теснённых условиях шахтных стволов и не дающее развиваться конвекции, которая в свободной атмосфере возникает при значительно меньших конвективных силах. На основании полученных результатов сделан вывод, что метеорологический критерий оценки конвективной устойчивости воздуха применительно к условиям шахтных стволов не приемлем, т. к. является чрезмерно жёстким. Конвекция возникает при вертикальном градиенте температуры ~46 градусов/км, что возможно либо при поступлении в ствол холодного наружного воздуха, либо при наличии в стволе источников тепла, подогревающих воздух сильнее, чем теплообмен с окружающим породным массивом.

Ключевые слова: конвективная устойчивость, турбулентность, тепловая депрессия, адиабатический градиент, приближение Буссинеска, число Рэлея, число Шварцшильда, коэффициент адиабаты

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 124020500030-7).

Для цитирования: Шалимов А.В., Кормщиков Д.С., Попов М.Д. Определение показателя конвективной устойчивости воздуха в стволах при нулевом режиме вентиляции рудника // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

UDC 629.039.58

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

Determination of air convective stability index in shafts at zero ventilation mode of a mine

A.V. Shalimov✉, D.S. Kormshchikov, M.D. Popov

Mining Institute UB RAS, Perm, Russian Federation

✉shalimovav@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to predict air convective movement in mine shafts in emergency modes of mine ventilation associated with the cessation of their forced ventilation. The occurrence of extended convective vortices in the shafts intensifies heat and smoke transfer in the event of a fire, and reduces as well the amount of natural draught, which poorly ventilates the mine after the fan is turned off. Knowledge of the conditions for the occurrence of thermal convection in shafts will allow for more accurate planning of measures to combat mine fires. **Aim.** To develop a methodology for assessing the convective stability of air in relation to the conditions of mine shafts. **Objects.** Mine shafts. **Methods.** Analytical and numerical modeling of convection occurrence and development in the mine shaft; comparative analysis of methods for estimating the convective stability of an unevenly heated medium in the gravitational field. **Results.** The authors have analyzed the methods for estimating air convective stability depending on the value of the vertical temperature gradient. It is shown that analytical methods of estimation in approximations of a compressible fluid in hydrodynamics, an ideal gas in meteorology, or by the sign of a vertical density gradient give results that differ significantly quantitatively. In order to identify the most adequate method of assessment in relation to mine conditions, the authors carried out numerical simulation of the convective air movement in the shaft at different values of its vertical temperature gradient. By calculation, it was established that the still air in the shaft when heated from below turns out to be even more stable than follows from the most optimistic estimate – the critical temperature gradient of the air is almost 5 times higher than the adiabatic one. The obvious reason for the result obtained is the stabilizing effect of viscosity forces, which increases many times over in the cramped conditions of mine shafts, preventing the development of convection, which occurs in a free atmosphere with much lower convective forces. Based on the results obtained, it is concluded that the meteorological criterion for assessing the convective stability of air in relation to the conditions of mine shafts is not suitable, since it is excessively rigid. Convection occurs at a vertical temperature gradient of ~46 °C/km, which is possible either when cold outside air enters the shaft or when there are heat sources in the shaft that heat the air more than the heat exchange with the surrounding rock mass.

Keywords: convective resistance, turbulence, heat depression, adiabatic gradient, the Bussinesque approach, Rayleigh number, Schwarzschild number, adiabatic coefficients

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project No. 124020500030-7).

For citation: Shalimov A.V., Kormshchikov D.S., Popov M.D. Determination of air convective stability index in shafts at zero ventilation mode of a mine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

Введение

Нулевой режим вентиляции применяется в негазовых шахтах, как правило, в аварийных ситуациях, связанных с возникновением рудничных пожаров [1]. После отключения вентилятора принудительное проветривание рудника прекращается, скорость распространения образующихся в очаге пожара газов по горным выработкам резко уменьшается, также снижается интенсивность горения из-за недостатка кислорода. После выключения источника тяги движение воздуха в руднике полностью не прекращается, т. к. остаются тепловые депрессии – общерудничная, являющаяся причиной возникновения естественной тяги [2–4], и локальные

депрессии, проявляющиеся в негоризонтальных выработках с источниками тепла [5]. Во втором случае возникают как конвективные рециркуляционные движения воздуха по замкнутым контурам различного масштаба [6], так и конвекция внутри отдельных выработок, в том числе и горизонтальных, когда потоки воздуха над почвой и кровлей выработки двигаются с разными скоростями, а иногда и в разных направлениях [7]. С учётом отмеченного прогноз эффективности использования нулевого режима вентиляции для локализации и прекращения пожара без оценки негативного воздействия этих конвективных процессов может быть слишком оптимистичным и не соответствовать ре-

альности [8]. Вклад тепловых депрессий в одномерное движение воздуха по выработкам хорошо изучен и не сложно рассчитывается математически [9], чего нельзя сказать о моделировании теплового расслоения воздушного потока по сечению выработка с образованием замкнутых конвективных вихрей. Особенно актуально такое моделирование в отношении шахтных стволов, как наиболее важных и масштабных по сечению и вертикальной протяжённости элементов рудничной вентиляционной сети, неоднородность температуры воздуха по глубине в которых обусловлена температурой наружного воздуха [10], геотермическим градиентом, гидростатическим разогревом воздуха от сжатия и спецификой теплообменных процессов [11]. В нулевом режиме вентиляции локальное движение воздушных потоков в стволах является плохо предсказуемым, поскольку сопряжено с решением задачи конвективной устойчивости столба неоднородно нагретого воздуха и определением конфигурации движения воздуха в случае потери его устойчивости [12].

Существует два общепринятых способа оценки конвективной устойчивости равновесия среды в поле силы тяжести. Первый из них «плотностной» говорит о том, что среда устойчива, если градиент плотности направлен вниз, и применяется для несжимаемых сред в приближении Буссинеска [13]. Второй способ, «температурный», формулируется для сжимаемых сред в приближении идеального газа. В соответствии с ним идеальный газ находится в устойчивом равновесии, если вертикальный градиент температуры не превышает по абсолютной величине адиабатический [14, 15]. «Плотностной» способ оценки используется для моделирования устойчивости невязких сред небольших бытовых масштабов, когда гидростатическим сжатием и вязкостью можно пренебречь. «Температурный» способ применяется в метеорологии, где перепады высот воздуха исчисляются сотнями метров и километрами [16, 17]. Казалось бы, что для моделирования устойчивости воздуха в вертикальных шахтных стволах, глубина которых составляет несколько сот метров, показателем устойчивости должен являться адиабатический градиент. Однако выбор этот не очевиден, поскольку в отличие от метеорологии, в которой воздушные массы не имеют границ [18], воздух в стволе ограничен вертикальной цилиндрической полостью, протяжённость которой значительно больше поперечного размера. Не исключено, что в таких стеснённых условиях конвективная устойчивость воздуха может оказаться значительно выше, чем в случае отсутствия границ, т. к. возникновение протяжённых по глубине ствола конвективных вихрей сопряжено с большим трением и дополнительными тратами энергии на поддержание такого движения.

Анализ способов математического моделирования конвективной устойчивости среды с вертикальным градиентом температуры

Прежде всего необходимо выяснить, насколько количественно различаются «плотностной» и «температурный» способы оценки конвективной устойчивости воздуха, т. к. при незначительном различии в выборе одного из них будет отсутствовать практический смысл. Для их оценочного сравнения можно использовать приближение идеального газа, уравнение состояния которого на любом уровне $z > 0$, м, от 0 до H , м, по глубине ствола H имеет вид:

$$\frac{P(z)}{T(z)\rho(z)} = \frac{R}{\mu}, \quad (1)$$

где $P(z)$, $T(z)$, $\rho(z)$ и μ – давление, Па, температура, К, плотность, кг/м³, и молярная масса воздуха, кг/моль; $R=8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Если оценку конвективной устойчивости столба воздуха проводить по вертикальному градиенту плотности, то критическим показателем будет нулевой градиент, т. е. $\rho(z)=\text{const} \equiv \rho_0$. При неизменном значении плотности давление воздуха будет расти с глубиной линейно

$$P(z) = P_0 + \rho_0 g z, \quad (2)$$

где $P_0=P(0)$ – давление воздуха на поверхности, Па; $g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения. Подстановка $\rho(z)=\rho_0$ и (2) в (1) даёт значение вертикального градиента температуры воздуха $T_{\rho=\text{const}}(z)$ при его неизменной плотности

$$\frac{dT_{\rho=\text{const}}(z)}{dz} = \frac{\mu}{R} g. \quad (3)$$

Адиабатический градиент температуры T_{ad} равен [15]

$$\frac{dT_{ad}(z)}{dz} = \frac{\mu}{C_p} g, \quad (4)$$

с учётом формулы Майера $C_p - C_v = R$ и коэффициента адиабаты $k = C_p / C_v$ соотношение (3) и (4) имеет вид

$$\frac{dT_{\rho=\text{const}}(z)}{dz} \bigg/ \frac{dT_{ad}(z)}{dz} = \frac{k}{k-1}, \quad (5)$$

где C_p и C_v – молярные теплоёмкости воздуха при постоянных значениях давления (p) и объёма (v), Дж/(моль·К). Получается, что для воздуха с $k=1,4$ соответствующий одинаковой плотности воздуха градиент температуры в 3,5 раза превышает адиабатический градиент. Таким образом, доказано, что

анализируемые показатели количественно не близки друг к другу и адиабатический градиент является значительно более жёстким ограничением конвективной устойчивости равновесия, чем неизменная плотность воздуха.

В работе [15] проведено теоретическое исследование устойчивости вязкой сжимаемой теплопроводной среды в параметрической плоскости «число Рэлея – заданный вертикальный градиент температуры». Установлено, что ниже некоторого значения градиента неустойчивость не возникает ни при каких числах Рэлея, и эта область параметров названа областью абсолютной конвективной устойчивости. Роль критерия устойчивости в данном случае играет так называемое число Шварцшильда K , представляющее собой отношение адиабатического градиента температуры воздуха к заданному dT/dz , К/м:

$$K = \frac{dT_{ad}}{dz} / \frac{dT}{dz}. \quad (6)$$

Исследование проведено в широкой области параметров с непостоянными по z градиентами с использованием уравнений состояния, как в приближении идеального газа, так и для газа Ван-дер-Ваальса. На основании полученных результатов автор [15] пришёл к выводу, что абсолютная конвективная устойчивость среды в случае постоянства её теплофизических свойств и вертикального температурного градиента характеризуется именно критерием Шварцшильда (6): при $K > 1$ среда устойчива, при $K < 1$ – нет. Справедливость этого вывода сомнений не вызывает, тем более что он совпадает с критерием конвективной устойчивости воздуха в метеорологии. Однако следует учитывать, что потеря устойчивости воздуха в стеснённых условиях не обязательно приводит к возникновению его крупномасштабных вертикальных перемещений, как это происходит в атмосфере над поверхностью. В отличие от свободных конвективных вихрей в атмосфере, для образования узких протяжённых вихрей в шахтном стволе требуется дополнительная энергия на преодоление избыточного трения от стеснения. В противном случае само такое течение будет являться неустойчивым и станет распадаться на множество отдельных вихрей с размерами порядка диаметра ствола. В смысле практической значимости подобный сценарий вторичного движения воздуха после потери устойчивости равновесия ничем не отличается от первоначального равновесия, т. к. в реальности всегда есть мелкомасштабные движения воздуха, вызванные не идеальностью процессов и наличием случайных факторов. Поэтому применительно к шахтным условиям можно сказать с уверенностью, что практический интерес представляют не теоретические показатели

потери конвективной устойчивости равновесия столба воздуха с образованием мелкомасштабных циркуляций воздуха в сечении на разных уровнях, а показатель возникновения протяжённых по глубине ствола конвективных вихрей, которые многократно интенсифицируют перенос воздушных масс, тепла и газов по стволу.

В работе [11] были проведены исследования конвективной устойчивости воздуха в стволах к малым длинноволновым возмущениям в приближении Буссинеска, т. е. в пренебрежении его сжимаемостью под действием собственного веса. Рост именно этих возмущений означает развитие крупномасштабной внутриветровой конвекции, в то время как рост малых возмущений равновесия произвольного вида может вести сначала лишь к возникновению мелкомасштабной конвективной турбулентности среды [19] без возникновения перемещения и перемешивания воздушного потока по всей глубине ствола. Далее сжимаемость воздуха была учтена внесением модельной поправки к коэффициенту объёмного расширения воздуха β , K^{-1} в адиабатическом приближении

$$\beta \rightarrow \beta - \frac{g\mu}{kR\bar{T}(dT_{ad}(z)/dz)},$$

в результате чего зависимость для критического градиента температуры $dT_{cr}(z)/dz$, К/м, приняла вид

$$\frac{dT_{cr}(z)}{dz} = \frac{\pi^4 \eta \chi}{g\beta D^4} + \frac{g\mu}{k\beta R\bar{T}}, \quad (7)$$

где D – поперечный размер ствола, м; $\bar{T}$ – средняя температура воздуха, К; η и χ – кинематическая вязкость и температуропроводность воздуха, m^2/s . Под η и χ следует понимать коэффициенты, характеризующие турбулентное движение воздуха, поскольку моделируется показатель устойчивости не в отношении возникновения турбулентности, а в отношении последующего перехода мелкомасштабных конвективных вихрей в протяжённое по глубине конвективное движение воздуха.

Подстановка характерных значений параметров ($\eta=0,05 \text{ м}^2/\text{с}$, $\chi=0,08 \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta=3,7 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $D=5 \text{ м}$, $\bar{T}=300 \text{ К}$, $\mu=0,029 \text{ кг/моль}$) в выражение (7) даёт величину критического градиента ~ 4 градусов на 100 м глубины. Из соотношений (3)–(5) следует, что показатели, основанные на адиабатическом и плотностном градиентах, дают критические градиенты 1 и 3,5 градуса на 100 м, соответственно. Таким образом, результаты простой аналитической оценки устойчивости воздуха в шахтном стволе к протяжённым по глубине конвективным вихрям указывают в большей степени на плотностной, нежели на адиабатический критерий.

Результаты численного моделирования конвективного движения воздуха в шахтных стволах

Для выяснения того, каким показателем следует руководствоваться при определении устойчивости воздуха в условиях шахтных стволов, в программном комплексе SolidWorks было проведено численное моделирование возникающего конвективного движения воздуха в стволе при разных значениях начального вертикального температурного градиента (рис. 1). Ствол задавался вертикальной цилиндрической полостью в земле глубиной 400 м и диаметром 10 м с твёрдыми адиабатическими границами. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что крупномасштабная конвекция начинается приблизительно с числа $K=0,215$, что почти в 5 раз меньше метеорологического показателя конвективной устойчивости $K=1$ и даже в 1,3 раза меньше показателя устойчивости для несжимаемой среды, соответствующего постоянству по глубине её плотности. Такая высокая конвективная устойчивость воздуха в стволе обусловлена, очевидно, большой разницей между вертикаль-

ми и горизонтальными размерами ствола, что значительно увеличивает потери энергии на трение при образовании протяжённых воздушных вихрей, тем самым отодвигая порог их возникновения.

Чтобы убедиться в справедливости данного вывода, аналогичное моделирование с теми же условиями было проведено для воздушной полости в 10 раз большего диаметра. И действительно, интенсивное конвективное перемешивание начинается уже значительно раньше, со значения числа Шварцшильда всего лишь в 2 раза меньше метеорологического (рис. 2). Характерно то, что конвекция в этом случае возникает при положительном градиенте плотности воздуха с её увеличением с глубиной, в то время как для стеснённых условий ствола это происходит тогда, когда плотность воздуха растёт с высотой. Этот результат подтверждает предположение о большой разнице порогов возникновения конвективной устойчивости воздуха в стеснённых условиях шахтных стволов и в условиях свободной атмосферы.

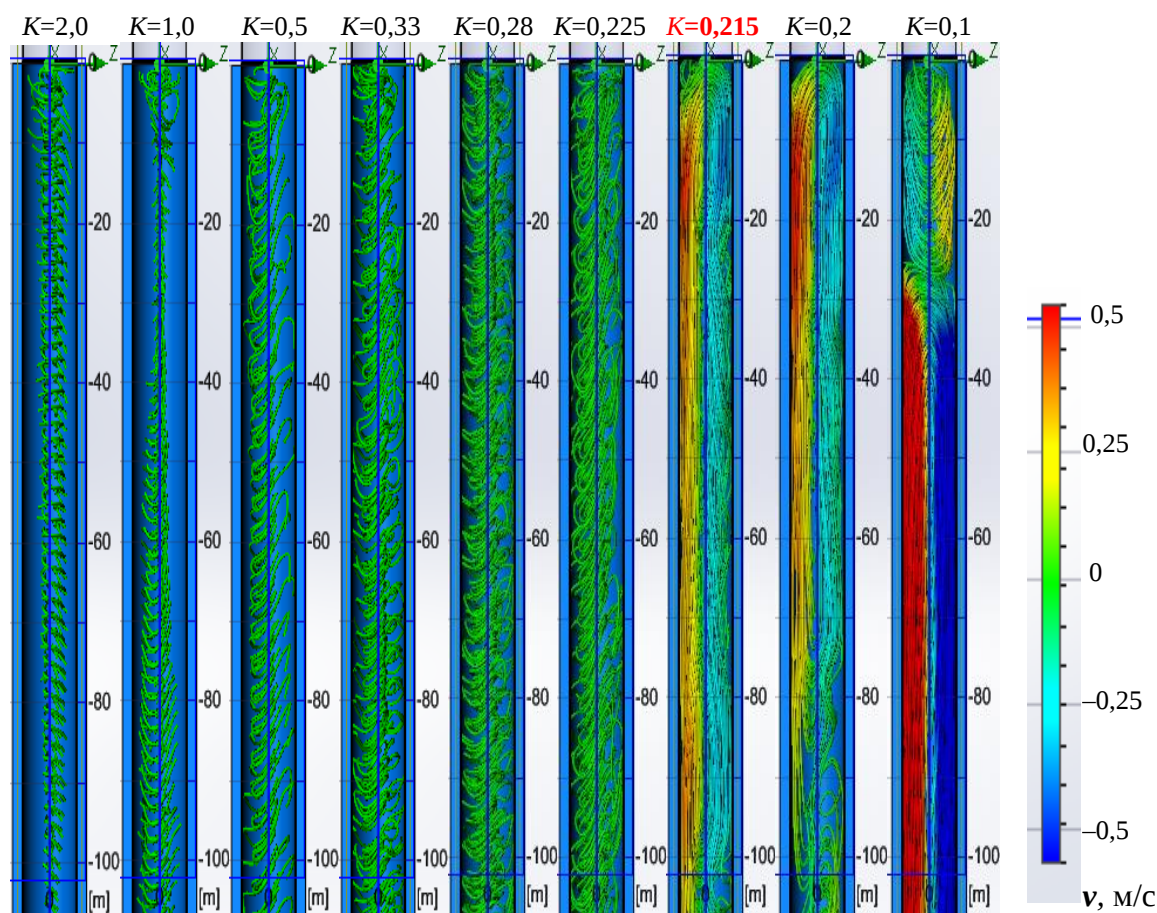


Рис. 1. Траектории конвективного движения воздуха при разных значениях K ($D=10$ м)

Fig. 1. Trajectories of convective air movement at different values of K ($D=10$ m)

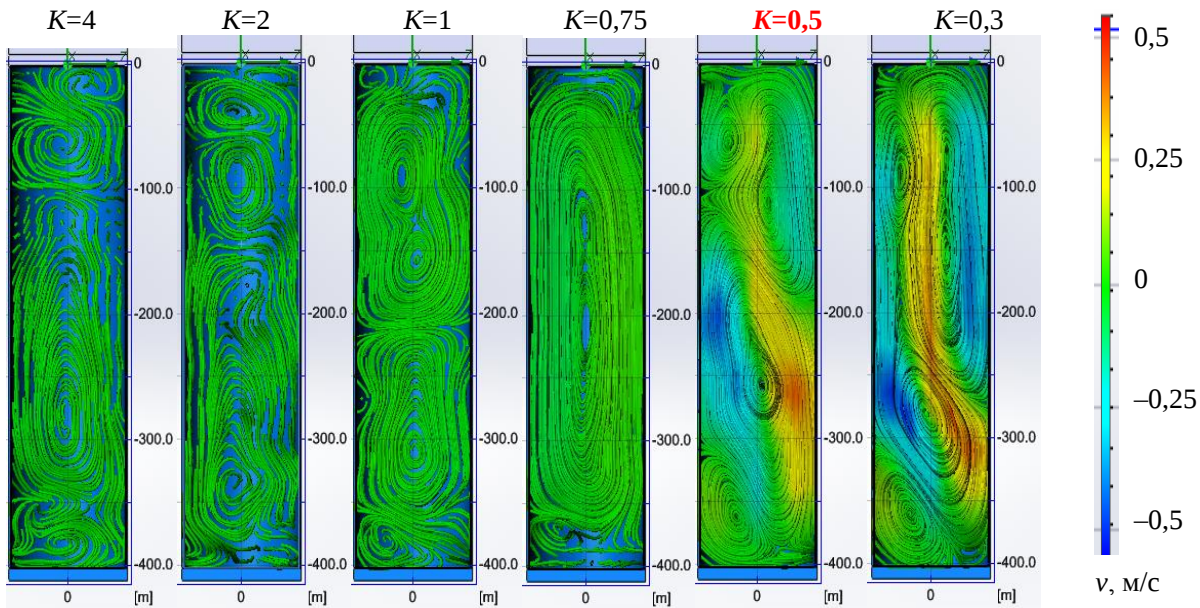


Рис. 2. Траектории конвективного движения воздуха в полости при разных значениях K ($D=100$ м)
Fig. 2. Trajectories of convective air movement in the cavity at different values of K ($D=100$ m)

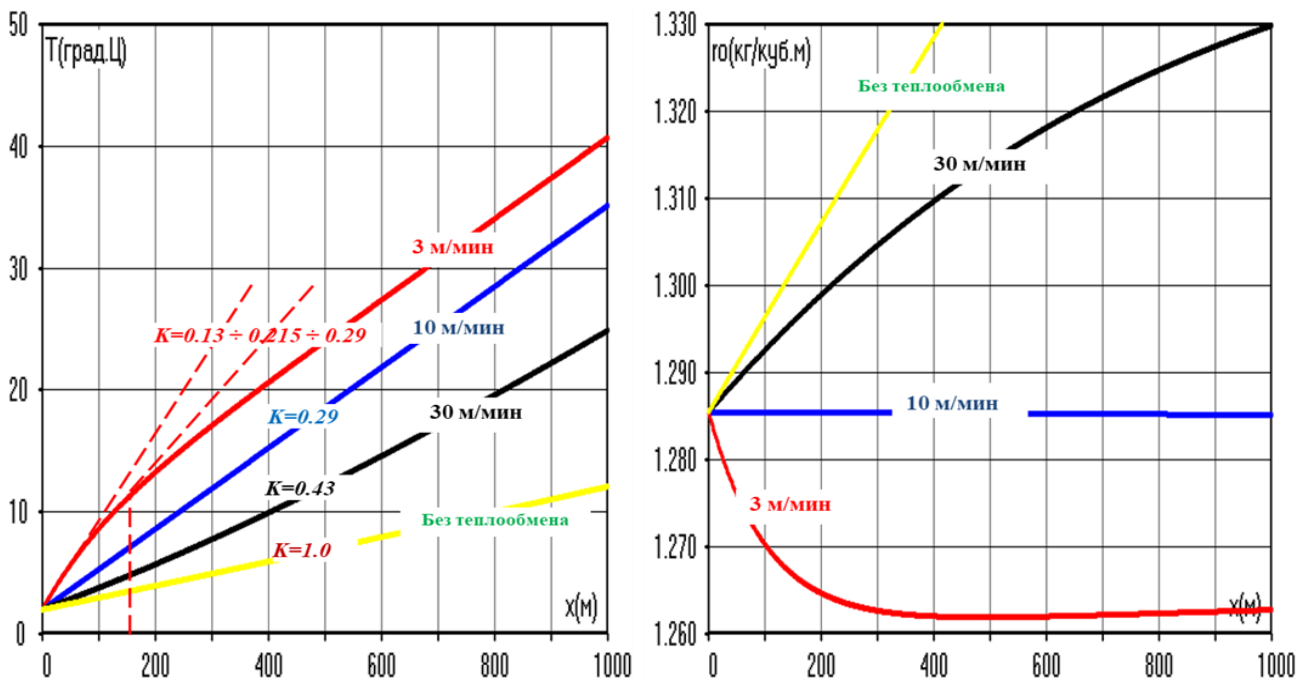


Рис. 3. Расчётные значения температуры и плотности воздуха по глубине воздухоподводящего ствола в зависимости от скорости движения воздуха (начальная температура воздуха $+2^\circ\text{C}$, среднегодовая температура местности $+10^\circ\text{C}$, геотермическая ступень 30 м)
Fig. 3. Calculated values of air temperature and density in the depth of the air supply shaft, depending on air velocity (initial air temperature $+2^\circ\text{C}$, average annual temperature of the area $+10^\circ\text{C}$, geothermal stage 30 m)

Для визуализации полученных результатов был произведён численный расчёт изменения температуры и плотности воздуха при его одномерном движении по стволу за счёт естественной тяги без приближения идеального газа и адиабатичности (рис. 3). Вертикальный градиент температуры воздуха варьи-

ровался скоростью его движения – чем больше скорость, тем короче тепловой контакт воздуха с крепью ствола, и тем меньше он нагревается [20]. Температура крепи ствола задавалась геотермическим градиентом без учёта растепления крепи и окружающего породного массива в процессе эксплуатации рудника,

что соответствует оценке порога наступления конвективной устойчивости по максимуму. Метеорологическому значению критерия устойчивости $K=1$ соответствует график $T(z)$ жёлтого цвета без теплообмена с максимальным градиентом плотности. Чёрным цветом выделен график, при котором плотность воздуха также возрастает с глубиной, но не так сильно, как в отсутствие теплообмена с крепью. Соответствующий постоянной плотности профиль $T(z)$ отмечен на рисунке синим цветом. Распределение температуры воздуха по глубине ствола, выделенное красным цветом, наиболее соответствующее гидродинамическому способу расчёта с учётом сжимаемости, даёт отрицательный градиент плотности до 400-метровой глубины, далее плотность практически постоянна. Таким образом, последний вариант с наименьшей скоростью движения воздуха является наиболее реалистичным применительно к шахтным условиям, т. к. более всего соответствует результатам численного моделирования. Для расчётного набора параметров можно сделать вывод, что градиенты температуры и плотности воздуха непостоянны и уменьшаются с глубиной, интенсивное конвективное перемешивание при $K < 0,215$ возникнет до глубины порядка 150 м, и глубже, при $K > 0,215$, его не будет.

Заключение

По результатам проведённых исследований конвективной устойчивости воздуха в шахтных

стволах в режиме нулевой вентиляции можно сделать следующие выводы:

- принятый в метеорологии критерий оценки конвективной устойчивости воздуха по адиабатическому градиенту температуры применительно к условиям шахтных стволов является чрезмерно жёстким;
- в нулевом режиме вентиляции рудника основным стабилизирующим фактором, препятствующем развитию конвекции в стволах, является вязкость воздуха;
- интенсивное конвективное движение воздуха по всей глубине ствола начинается при вертикальном температурном градиенте ~ 46 °C/km, что почти в 5 раз превышает адиабатический;
- поскольку величина геотермического градиента в поверхностном слое Земли составляет в среднем ~ 30 °C/km, в отсутствие источников выделения тепла или поступления в ствол не подогретого зимнего воздуха интенсивная крупномасштабная конвекция воздуха в стволах возникнуть не будет;
- при значениях числа Шварцшильда больше критического $K=0,215$ тепловое движение воздуха в стволе представляет собой локализованные по глубине вихри малой интенсивности, которые не переносят тепло и газовые примеси в вертикальном направлении и в среднем не отличаются от неподвижного состояния столба воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов С.Н., Жадан В.М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. – М.: Недра, 1973. – 152 с.
2. Казаков Б.П., Шалимов А.В. О возможности проветривания рудника естественной тягой после отключения главной вентиляционной установки // Горный журнал. Известия вузов. – 2013. – № 2. – С. 59–56.
3. McPherson M.J. Subsurface ventilation and environmental engineering. – Berlin: Springer, 1993. – 905 p.
4. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways // Int. J. Min. Geol. Eng. – 1986. – № 4. – Р. 165–196.
5. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, М.А. Семин, Е.Л. Гришин, Н.А. Трушкова // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 105–109.
6. Кобылкин С.С., Хубиева В.М. Учет локальной естественной тяги при обеспечении аэрологической безопасности на горных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 60–65.
7. Оценка параметров пожара в горизонтальной горной выработке на основе аналитического моделирования процесса адвекции тепла / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, Е.Л. Гришин, Д.С. Кормициков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. – С. 179–185.
8. Tien J.C. Practical mine ventilation engineering. – Chicago: Intertec Publ., 1999. – 460 p.
9. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81–85.
10. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions / R. Fair, J.H. Laar, K. Nell, D. Nell, E.H. Mathews // South African Journal of Industrial Engineering November. – 2021. – Vol. 32. – № 3. – Р. 42–51.
11. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Устойчивость конвективного проветривания рудника после отключения вентилятора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 4. – С. 122–130.
12. Lohse D., Xia K.Q. Small-scale properties of turbulent Rayleigh–Bénard convection // Ann. Rev. Fluid Mech. – 2010. – № 42. – Р. 335–364.
13. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 392 с.
14. Динамическая метеорология / под ред. Д.Л. Лайхмана. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 607 с.
15. Рамазанов М.М. О критериях абсолютной конвективной устойчивости сжимаемой жидкости и газа // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2014. – № 5. – С. 27–37.
16. Salby M.L. Fundamentals of atmospheric physics. – San Diego, United States: Elsevier Science, Academic Press, 1996. – 627 p.

17. Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Pogliani L. On the barometric formula inside the Earth // *J. Math. Chem.* – 2010. – Vol. 47. – P. 990–1004.
18. Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Ч. 1: стационарные решения для температуры // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки.* – 2022. – № 3 (215). – С. 79–90.
19. Falkovich G. *Fluid mechanics: A short course for physicists.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 167 p.
20. Колесов Е.В., Казаков Б.П., Семин М.А. Моделирование теплообмена между крепью шахтного ствола и проходящим по стволу воздухом в условиях смешанной конвекции // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2021. – № 5. – С. 160–171.

Информация об авторах

Андрей Владимирович Шалимов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. shalimovav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6675-9093>

Денис Сергеевич Кормщик, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. dkormshchikov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0115-3749>

Максим Дмитриевич Попов, инженер, Горный институт УрО РАН, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. maxpan09@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-6388-608X>

Поступила в редакцию: 17.05.2024

Поступила после рецензирования: 13.06.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Osipov S.N., Zhadan V.M. *Ventilation of mines in case of underground fires.* Moscow, Nedra Publ., 1973. 152 p. (In Russ.)
2. Kazakov B. P., Shalimov A.V. On possibility of ventilation of the mine by natural draft after disconnecting the main ventilation unit. *Gorny zhurnal. Izvestiya VUZov*, 2013, no. 2, pp. 59–56. (In Russ.)
3. McPherson M.J. *Subsurface ventilation and environmental engineering.* Berlin, Springer, 1993. 905 p.
4. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways. *Int. J. Min. Geol. Eng.*, 1986, no. 4, pp. 165–196.
5. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Syomin M.A., Grishin E.L., Trushkova N.A. Convective stratification of air flows along the section of mine workings, its role in the formation of fire thermal depressions and its effect on the stability of ventilation. *Gorny zhurnal*, 2014, no. 12, pp. 105–109. (In Russ.)
6. Kobylkin S.S., Khubieva V.M. Consideration of local natural thrust in ensuring aerological safety at mining enterprises. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2021, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.)
7. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L., Kormshchikov D.S. Estimation of fire-related parameters in tunnels from analytical modeling of warm advection. *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 1040–1045. (In Russ.)
8. Tien J.C. *Practical mine ventilation engineering.* Chicago, Intertec Publ., 1999. 460 p.
9. Levin L.Yu., Paleev D.Yu., Semin M.A. Calculation of the stability of air flows in the workings of mine ventilation networks by the factor of thermal depression. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*, 2020, no. 1, pp. 81–85. (In Russ.)
10. Fair R., Laar J.H., Nell K., Nell D., Mathews E.H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering November*, 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42–51.
11. Kazakov B.P., Shalimov A.V. Stability of convective ventilation after fan switching-off in mines. *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 626–633. (In Russ.)
12. Lohse D., Xia K.Q. Small-scale properties of turbulent Rayleigh–Bénard convection. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2010, no. 42, pp. 335–364.
13. Gershuni G.Z., Zhuhovickiy E.M. Convective stability of an incompressible fluid. Moscow, Nauka Publ., 1972. 392 p. (In Russ.)
14. *Dynamic meteorology.* Ed. by D.L. Laichtman. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 607 p. (In Russ.)
15. Ramazanov M.M. On the criteria of absolute convective stability of a compressible liquid and gas. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2014, no. 5, pp. 27–37. (In Russ.)
16. Salby M.L. *Fundamentals of atmospheric physics.* San Diego, United States: Elsevier Science, Academic Press, 1996. 627 p.
17. Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Pogliani L. On the barometric formula inside the Earth. *J. Math. Chem.*, 2010, vol. 47, pp. 990–1004.
18. Radionov A.A. Mathematical model of the equilibrium of a column of a compressible atmosphere. Part 1: Stationary solutions for temperature. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki*, 2022, no. 3 (215), pp. 79–90. (In Russ.)
19. Falkovich G. *Fluid mechanics, a short course for physicists.* Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 167 p.
20. Kolesov E.V., Kazakov B.P., Semin M.A. Modeling air flow-lining heat transfer in the conditions of mixed convection in a mine shaft. *Journal of Mining Science*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 852–862. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey V. Shalimov, Dr. Sc., Leading Researcher, Mining Institute UB RAS, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. shalimovav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6675-9093>

Denis S. Kormshchikov, Cand. Sc., Senior Researcher, Mining Institute UB RAS, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. dkormshchikov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0115-3749>

Maxim D. Popov, Engineer, Mining Institute UB RAS, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. maxpan09@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-6388-608X>

Received: 17.05.2024

Revised: 13.06.2024

Accepted: 19.03.2025