ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(12):72-83
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.4 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_72

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ УЧЕТА СЖИМАЕМОСТИ ВОЗДУХА НА РАСЧЕТ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ

Е.А. Лядов[1], Д.А. Бородавкин[1,2], А.В. Зайцев[1,2]

[1] Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: E.Lyadov@yandex.ru
[2] Пермский национальный политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация: Традиционные методы расчета вентиляции рудников основаны на допущении о несжимаемости воздуха, однако с увеличением глубины разработки это допущение может приводить к значительным погрешностям в расчетах. Выполнен анализ факторов, влияющих на изменение плотности воздуха при его движении по горным выработкам. На основе проведенного анализа предложена математическая модель расчета воздухораспределения, учитывающая эффект сжимаемости в наклонных и вертикальных выработках. Проведена оценка степени влияния сжимаемости воздуха на результаты расчета воздухораспределения в глубоких рудниках, а также анализ эффектов, возникающих при изменении плотности воздуха в результате сжимаемости. Предложенная модель показала, что объемные расходы воздуха значительно изменяются при движении по наклонным и вертикальным горным выработкам, в результате чего значения расходов в рабочих зонах оказываются меньше прогнозируемых. Величина этой ошибки главным образом зависит от глубины ведения горных работ и геотермической ступени, а ее результатом является подбор неоптимальных параметров вентиляции и, как следствие, повышение риска для здоровья персонала из-за недостаточного проветривания. Практическая значимость результатов заключается в возможности повышения точности проектирования вентиляционных систем, что способствует оптимизации энергопотребления и повышению безопасности ведения горных работ.

Ключевые слова: вентиляционная сеть, проветривание рудника, расчет воздухораспределения, сжимаемость воздуха, плотность воздуха, глубокие рудники, главная вентиляторная установка, математическая модель.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 126012716039-2).

Для цитирования: *Лядов Е. А., Бородавкин Д. А., Зайцев А. В.* Оценка степени влияния учета сжимаемости воздуха на расчет воздухораспределения в вентиляционных сетях глубоких рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 12. – С. 72–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_72.

© Е.А. Лядов, Д.А. Бородавкин, А.В. Зайцев. 2026.

Assessment of the degree of influence of air compressibility consideration on air distribution calculations in ventilation networks of deep mines

E.A. Lyadov[1], D.A. Borodavkin[1,2], A.V. Zaitsev[1,2]

[1] Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: E.Lyadov@yandex.ru

[2] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract: Traditional mine ventilation calculation methods are based on the assumption of air incompressibility, however, with increasing mining depth, this assumption can lead to significant calculation errors. This paper analyzes the factors affecting the change in air density as it moves through mine workings. Based on the conducted analysis, a mathematical model for air distribution calculation is proposed, taking into account the compressibility effect in inclined and vertical workings. The influence of air compressibility on air distribution calculation results in deep mines is assessed, along with effects arising from air density changes due to compressibility. The proposed model demonstrated that volumetric airflow rates vary significantly during movement through inclined and vertical mine workings, resulting in actual flow rates in working zones being lower than predicted. The magnitude of this deviation depends primarily on the mining depth and the geothermal gradient, which leads to the choice of suboptimal ventilation parameters and, consequently, increases health risks for personnel due to insufficient ventilation. The practical significance of the results is the potential of improving the accuracy of ventilation system design, which contributes to optimizing energy consumption and enhancing the safety of mining operations.

Key words: ventilation network, mine ventilation, air distribution calculation, air compressibility, air density, deep mines, mine ventilation fan, mathematical model.

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state assignment (reg. number of R&D: 126012716039-2).

For citation: Lyadov E. A., Borodavkin D. A., Zaitsev A. V. Assessment of the degree of influence of air compressibility consideration on air distribution calculations in ventilation networks of deep mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(12):72-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_72.

Введение

Современные методы расчета стационарного воздухораспределения в выработках шахт и рудников в основном базируются на решении уравнений, основанных на первом и втором законах Кирхгофа.

Вентиляционная сеть рудника представляется в виде ориентированного графа $D = \{V, E\}$, где V — множество его вершин, а E — множество ребер. Ребра графа представляют собой упрощенные аэродинамические модели горных выработок, а вершины — их сопряжений. Ребрам графа присваиваются аэродинамические свойства соответствующих горных выработок: аэродинамическое сопротивление R, Н·с^2/м^8, объемный расход воздуха Q, м^3/с, напор источника тяги $P_{ист}$, Па. Вершинам графа присваиваются координаты $\{x, y, z\}$ в трехмерном декартовом пространстве, а также температура T, °С и давление P, Па (или приведенное давление h, Па).

Течение воздуха в сети обусловлено депрессией, создаваемой искусственным источником тяги (главной вентиляторной установкой) и естественной тягой. Режим течения воздуха принимается установившимся.

Уравнения баланса, с помощью которых производится стационарный расчет воздухораспределения в вентиляционной сети, имеют вид

$$\sum_{i \in A_j} Q_i I_{i,j} = 0, \qquad (1)$$

$$\sum_{i \in C_k} \left[R_i Q_i \left| Q_i \right| - P_{ucm_i} - \rho_i \left(T_i \right) g \Delta h_i \right] = 0 \qquad (2)$$

где i, j, k — индексы, нумерующие соответственно ребра, вершины и независимые контуры графа; I — матрица инцидентности графа; Δh_i — перепад высот ребра графа по вертикальной координате z, м.

Однако данный метод не учитывает сжимаемость воздуха при его движении по горным выработкам. Эффект сжимаемости воздуха в рудниках напрямую зависит от глубины ведения горных работ и возникает прежде всего вследствие гидростатического сжатия/расширения воздуха при его движении по наклонным и вертикальным выработкам, а также от нагрева воздуха вследствие теплообмена с породным массивом. В настоящее время условия добычи полезных ископаемых стремительно изменяются ввиду исчерпания природных запасов [1]. В частности, увеличивается глубина разработки, которая на некоторых полиметаллических рудниках уже превышает 2000 м. В связи с этим становится актуальным изучение факторов, влиянием которых ранее было справедливо пренебрегать при проектировании рудников меньшей глубины.

В работе И.И. Босикова и др. [2] показано, что внедрение новых подходов для оптимизации вентиляции шахт позволяет повысить как экономическую эффективность, так и безопасность ведения горных работ. В работе [3] исследуется влияние изменения барометрического давления на поверхности и в выработках на проветривание глубоких рудников, в схожем исследовании [4] дополнительно предложена формула для расчета депрессии в стволах с учетом сжимаемости воздуха. Влияние изменения давления на определение необходимого количества воздуха для проветривания рассмотрено в статье [5]. Более комплексный подход демонстрируется в работах [6, 7], где для проектирования вентиляции и изучения аэрогазотермодинамических процессов рекомендуется использовать трехмерное моделирование сети выработок. В работе Ю.А. Хохолова [8] разработана методика совместного решения задач воздухораспределения и температурного режима сети горных выработок. Необходимость учета физических параметров воздуха при моделировании рудничной вентиляции отражена в работе [9].

Проблема глубоких рудников раскрывается в работах [10, 11]: в первой анализируются подходы к снижению выбросов от ДВС и внедрению системы «вентиляции-по-требованию» на канадских рудниках, во второй приведен обзор параметров вентиляции и температурного режима на глубоких рудниках ЮАР. Комплексный обзор проблем, возникающих при увеличении глубины разработки, представлен в [12].

Отдельно стоит отметить исследования, посвященные моделированию вентиляции при аварийных ситуациях (пожарах), где изменения температурного режима и, как следствие, плотности воздуха являются ключевым фактором, влияющим на параметры проветривания. Данная проблема рассматривается в работах [13 — 19].

Для снижения трудоемкости и затрат времени на решение задач воздухора-

спределения в рудниках с разветвленной топологией широко используются программные вычислительные комплексы. В настоящее время на рынке представлены как отечественные: «АэроСеть», «Вентиляция 2.0», «Вентиляция шахт», так и зарубежные инструменты: VentPC, VUMA, VENTGRAPH, 3DVent. Несмотря на многообразие программных комплексов, в основе их алгоритмов лежат сетевые законы Кирхгофа, не учитывающие сжимаемость воздуха. Отдельно стоит отметить программу Ventsim (Австралия), которая учитывает изменение плотности воздуха в вентиляционной сети рудника. Таким образом, аспекты проветривания глубоких рудников рассматривались во многих исследованиях, однако оценка ошибки классического расчета воздухораспределения применительно к условиям больших глубин современных рудников не производилась.

Цель данного исследования заключается в комплексной оценке степени влияния сжимаемости воздуха на параметры проветривания глубоких рудников, а также на расчетные параметры главных вентиляторных установок (ГВУ). Результаты исследования позволят повысить точность расчетов воздухораспределения в сети горных выработок глубоких рудников, а также уточнить требуемые характеристики ГВУ для их подбора на этапе проектирования. Актуальность работы состоит в необходимости проектирования и поддержания безопасных, а также энергоэффективных режимов функционирования глубоких рудников, что становится возможным при повышении точности расчетов требуемых параметров.

Математическая модель расчета воздухораспределения с учетом сжимаемости воздуха

Для учета изменения объемного расхода воздуха из-за переменной плотности вдоль выработок требуется модифицировать методику расчета стационарного воздухораспределения, введя соответствующие поправочные коэффициенты. Поскольку аэродинамическое сопротивление выработки прямо пропорционально плотности воздуха [20], для учета сжимаемости предлагается введение следующей поправки:

$$R^* = \frac{\rho}{\rho_н} R, \qquad (3)$$

где $\rho_н$ — плотность воздуха, при которой было рассчитано сопротивление R.

При записи уравнений воздухораспределения удобнее перейти к массовым расходам Q^m, кг/с, которые независимо от плотности воздуха остаются постоянными при движении по выработкам. Таким образом, 1-й закон Кирхгофа примет следующий вид:

$$\sum_i Q_i^m I_{i,j} = 0. \qquad (4)$$

Закон падения давления на участке сети с учетом перехода к массовым расходам, а также поправки (3) на сопротивление примет вид

$$H = \frac{R \cdot Q^m \left| Q^m \right|}{\rho \cdot \rho_н}. \qquad (5)$$

Так как плотность воздуха зависит от глубины, приравняем депрессию к среднему интегральному значению при $\rho = \rho(z)$:

$$H = \frac{1}{z_n - z_k} \int_{z_k}^{z_n} \frac{R \cdot Q^m \left| Q^m \right|}{\rho(z) \cdot \rho_н} dz = \\ = \frac{R \cdot Q^m \left| Q^m \right|}{\left(z_n - z_k \right) \cdot \rho_н} \int_{z_k}^{z_n} \frac{dz}{\rho(z)} \qquad (6)$$

Аэродинамические характеристики ГВУ, предоставляемые производителями, справедливы для определенной плотности воздуха. Учитывая прямую пропорциональную зависимость напора от плот-

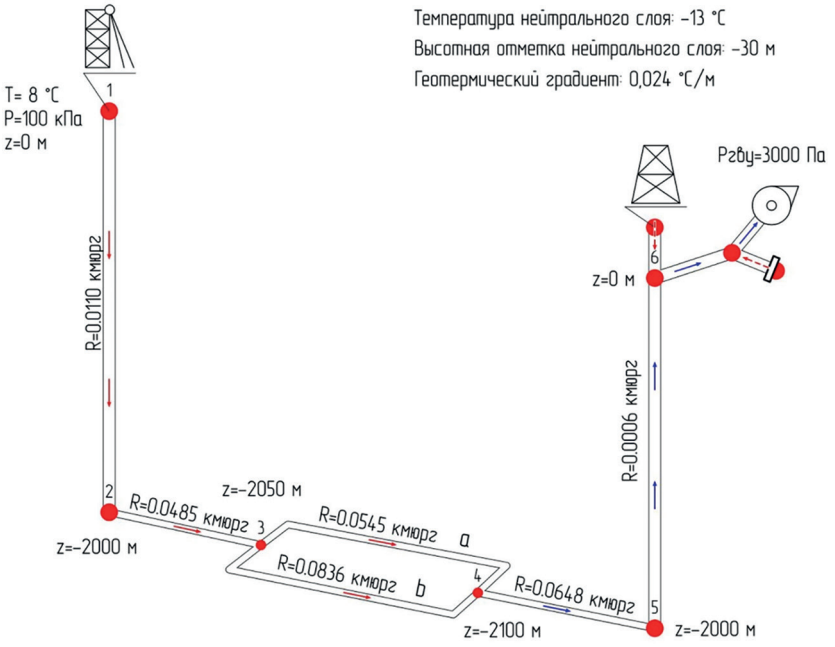


Рис. 1. Расчетная вентиляционная сеть
Fig. 1. Design ventilation network

ности [5], предлагается корректировать паспортную напорную характеристику с помощью коэффициента, учитывающего отношение фактической плотности воздуха на всасе ГВУ ($\rho_{ГВУ}$) к плотности, для которой была составлена характеристика ($\rho_{хар}$):

$$P^{*}_{ГВУ} = P_{ГВУ}\frac{\rho_{ГВУ}}{\rho_{хар}} \qquad (7)$$

Расчет воздухораспределения на примере эквивалентной вентиляционной сети

Для оценки влияния сжимаемости воздуха на распределение расходов по выработкам рассмотрим расчет воздухораспределения на примере эквивалентной вентиляционной сети, представленной на рис. 1. Здесь выработки «1-2» и «5-6» представляют собой воздухоподающий и вентиляционный стволы соответственно, выработки «2-3» и «4-5» — эквиваленты главных воздухоподающих и вентиляционных выработок, а выработки «3-a-4», «3-b-4» — эквиваленты подготовительных выработок.

Изменение плотности воздуха с глубиной происходит преимущественно в результате увеличения гидростатического давления и нагрева воздуха.

Зависимость давления от глубины $P(z)$ (Па) описывается выражением

$$P(z) = P_1 + \rho g\left(z_1 - z\right), \qquad (8)$$

где z — текущая высотная отметка, м.

Выразив функцию плотности из закона Менделеева–Клапейрона, представим давление в виде

$$P = \frac{P_1}{1 - \dfrac{gM\left(z_1 - z\right)}{RT}}. \qquad (9)$$

Таким образом, изменение плотности воздуха с глубиной описывается выражением

$$\rho = \frac{P_1 M}{RT - gM\left(z_1 - z\right)}, \qquad (10)$$

где P_1 — давление воздуха (Па) в точке с высотной отметкой z_1 (м); R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·кг); M — молярная масса воздуха, кг/моль; T — температура воздуха, К.

Согласно исследованиям, представленным в [21], горные выработки глубоких рудников можно дифференцировать по факторам формирования теплового режима. Основным фактором, оказывающим влияние на изменение температуры воздуха при движении по стволам, является его гидростатическое сжатие/расширение. При движении воздуха по главным воздухоподающим выработкам в роли главного фактора выступает теплообмен с массивом горных пород, температуру которого воздух принимает, проходя расстояние, на практике не превышающее 3 км. Теплообмен с массивом является также преобладающим фактором в подготовительных и вентиляционных выработках. В очистных и проходческих забоях из-за малых расходов воздуха существенное влияние на формирование теплового режима оказывают техногенные источники тепловыделения.

Влияние прочих факторов признано несущественным и не учитывается в представленной в рамках текущей работы модели. Расчет воздухораспределения проводится для полиметаллического рудника с глубиной ведения работ ≈2000 м и вертикальным градиентом температуры воздуха в стволах 1 °С/ 120 м.

Таким образом, изменение температуры воздуха в воздухоподающем стволе описывается выражением

$$T_{1-2} = T_1 + \frac{z_1 - z}{120}. \qquad (11)$$

В вентиляционном стволе — выражением

$$T_{5-6} = T_5 - \frac{z - z_5}{120}. \qquad (12)$$

В рамках работы принято, что температура воздуха при движении по главным воздухоподающим выработкам по экспоненциальному закону приближается к температуре массива на протяжении всего пути от воздухоподающего ствола до подготовительных выработок, где их значения выравниваются.

Температура воздуха в подготовительных и вентиляционных выработках описывается выражением

$$T_{ш} = T_{нс} + Г\cdot(z_{нс} - z) \qquad (13)$$

где $T_{нс}$ — температура пород нейтрального слоя, °С; $z_{нс}$ — высотная отметка нейтрального слоя, м; $Г$ — геотермический градиент, °С/м.

Таким образом, для расчета воздухораспределения в представленной на рис. 1 вентиляционной сети получена система из 10 уравнений с 10 неизвестными. Решение системы производилось численными методами при помощи математического пакета MathCad.

На примере эквивалентной сети исследованы:

1) распределение расходов воздуха с учетом сжимаемости и естественной тяги;

2) влияние теплого и холодного периодов на воздухораспределение;

3) характеристики работы ГВУ при ее поверхностном и подземном размещении.

Анализ результатов

На рис. 2 представлены графики изменения объемных расходов воздуха при его движении по пути 1-2-3-а-4-5-6, полученные в результате расчетов воздухораспределения в эквивалентной вентиляционной сети с учетом и без учета сжимаемости воздуха при наличии естественной тяги.

Проведенный анализ выявил существенное влияние сжимаемости воздуха на распределение объемных расходов в вентиляционной сети. В сравнении с моделью, где сжимаемость не учитывалась, получены следующие результаты.

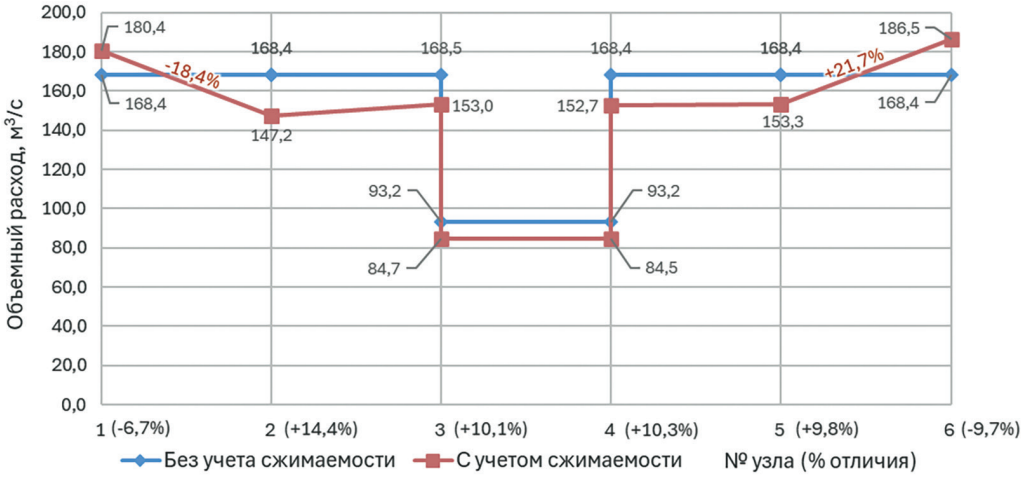


Рис. 2. Результаты расчетов воздухораспределения в эквивалентной вентиляционной сети
Fig. 2. Calculation results of air distribution in the equivalent ventilation network

1. Изменение расхода в стволах:

• при движении по воздухоподающему стволу «1-2» объемный расход воздуха уменьшается на 18,4%;

• при движении вверх по вентиляционному стволу «5-6» объемный расход воздуха увеличивается на 21,7%.

2. Контроль и прогнозирование параметров вентиляции:

• игнорирование эффекта сжимаемости воздуха при расчете воздухораспределения приведет к тому, что значения фактических расходов воздуха в выработках окажутся существенно ниже прогнозируемых, данный эффект необходимо учитывать при калибровке средств контроля расхода воздуха в выработках (особенно в главных капитальных выработках);

• расчет распределения для подготовительных выработок без учета сжимаемости на основе данных о расходе в вентиляционном стволе дает на 22,1% большие значения по сравнению с пред-

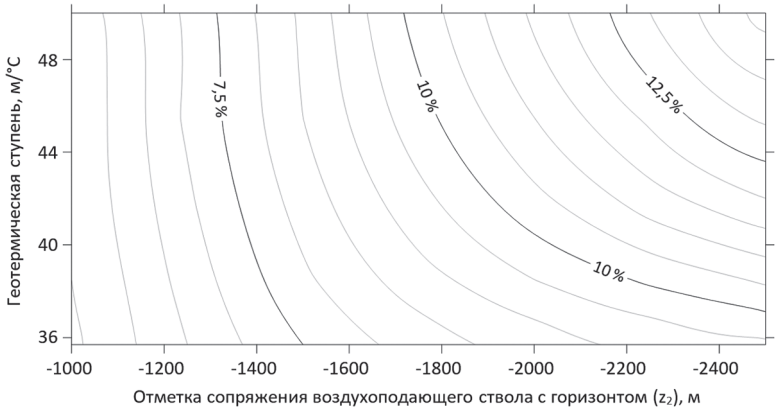


Рис. 3. Номограмма зависимости отклонения расчетных объемных расходов от глубины и геотермической ступени
Fig. 3. Nomogram showing the deviation of calculated volumetric flow rates as a function of depth and geothermal step

лагаемой уточненной моделью при расчете воздухораспределения на основании данных о напоре ГВУ, погрешность для тех же выработок составит 10,3%.

3. Влияние на оценку внешних утечек:

• величина внешних утечек, определяемая как разница замеров расходов в стволе и в подземной части, при игнорировании сжимаемости воздуха будет завышена относительно ее фактического значения. Например, при действительном коэффициенте утечек, равном 1,1, коэффициент внешних утечек без учета сжимаемости составит 1,26.

На рис. 3 приведена номограмма, отображающая величину относительного отклонения объемных расходов воздуха в подготовительных выработках при классическом расчете воздухораспределения и расчете распределения по предложенной модели, учитывающей сжимаемость воздуха, в зависимости от глубины (отметки узлов изменяются пропорционально текущим) и геотермической ступени — именно эти факторы оказывают основное влияние на величину ошибки.

Воздухораспределение в летний и зимний периоды года

Были рассмотрены изменения воздухораспределения, рассчитанного по предложенной модели (с учетом сжимаемости воздуха), в холодный и теплый периоды. Для холодного периода принята температура входящего в ствол воздуха +2 °С (в соответствии с п. 151 ФНиП ПБ «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»), для теплого периода — средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца г. Дудинка, составляет +18,5 °С в соответствии с СП 131.13330.2018 «Свод правил. Строительная климатология».

В результате расчета воздухораспределения по предложенной модели (с учетом сжимаемости воздуха и естественной тяги) выявлены значительные сезонные колебания массовых расходов воздуха. Различия между холодным и теплым периодами года достигают 28,6%. Анализ показывает, что в холодный период естественная тяга способствует проветриванию рудника, тогда как в теплый период ее действие препятствует проветриванию. Сравнение предложенной модели с классической (без учета сжимаемости) демонстрирует, что пренебрежение сжимаемостью приводит к существенным погрешностям, которые также варьируются в зависимости от сезона: наибольшие отклонения объемных расходов в подземных выработках характерны для теплого периода (до 11,3%), тогда как наибольшие отклонения расходов в стволах наблюдаются в холодный период года (до 17%).

Исследование изменения параметров работы ГВУ при ее подземном и поверхностном размещении

Рассмотрен еще один эффект, связанный с изменением напора ГВУ при ее поверхностном и подземном размещении.

Исходя из уравнения (2), для поддержания расходов в сети неизменными как при поверхностном, так и при подземном размещении ГВУ источник тяги должен создавать одинаковый напор. Напор вентиляторной установки прямо пропорционален плотности воздуха, с которым она работает [5]. В уравнение (7) введена поправка, учитывающая этот эффект. Таким образом, при размещении ГВУ в точку сети с большей плотностью воздуха частота ее оборотов должна быть снижена.

Энергия системы при размещении ГВУ в различных точках и сохранении постоянства расходов в сети также остается постоянной. Исходя из этого энер-

Полезная мощность ГВУ при расположении на поверхности и на глубине
Useful power of the mine ventilation fan located on the surface and at depth

Показатель	ГВУ на поверхности	Подземная ГВУ
Плотность воздуха на ГВУ ($\rho_{ГВУ}$), кг/м^3	1,200	1,460
Плотность воздуха, для которой была составлена характеристика ГВУ ($\rho_{хар}$), кг/м^3	1,225	
Расход воздуха на ГВУ ($Q^v_{ГВУ}$), м^3/с	186,52	153,33
Напор ($P^*_{ГВУ}$), Па	2939,29	2939,29
Полезная мощность (N), кВт	537,14	537,14

гопотребление вентиляторной установки не зависит от ее положения и плотности воздуха, с которым она работает, если поддерживать расходы в сети постоянными:

$$N = P^*_{ГВУ} \cdot \left(Q^V_{ГВУ}\right)^* = const, \quad (14)$$

где $P^*_{ГВУ}$ — напор ГВУ с поправкой на плотность воздуха, то есть фактический напор ГВУ. При сохранении постоянства расходов в сети при поверхностном и подземном размещении вентиляторной установки $P^*_{ГВУ} = const$. $Q^V_{ГВУ}$ — объемный расход воздуха, проходящего через ГВУ. Если рассмотреть расположение ГВУ на поверхности (I) и на глубине (II), то для сохранения постоянства расходов в сети должно выполняться условие

$$\left(Q^V_{ГВУ}\right)_I \cdot \rho_I = \left(Q^V_{ГВУ}\right)_{II} \cdot \rho_{II} \quad (15)$$

Для выполнения условия $N = const$, при расчете мощности величину $Q^V_{ГВУ}$ необходимо нормировать относительно плотности:

$$\left(Q^V_{ГВУ}\right)^* = Q^V_{ГВУ} \cdot \frac{\rho_{ГВУ}}{\rho_{хар}} \quad (16)$$

Сравнение результатов вычисления полезной мощности ГВУ при изменении ее расположения и сохранении постоянных расходов в сети на примере конкретных условий представлено в таблице.

Таким образом, по величине энергопотребления вариант с подземной ГВУ преимущества перед вариантом размещения ГВУ на поверхности не имеет. При учете изменения плотности воздуха расчет полезной мощности вентиляторной установки должен быть скорректирован в соответствии с формулами (14), (16). Также изменение плотности воздуха следует учитывать при подборе ВМП и определении параметров его работы в соответствии с формулами (6), (7), (14), (16).

Заключение

Пренебрежение сжимаемостью воздуха при расчете и проектировании вентиляции глубоких рудников чревато существенными погрешностями в определении ключевых параметров вентиляции — расхода и давления воздуха в ветвях сети. Эти ошибки, в свою очередь, создают риски для здоровья персонала из-за недостаточного проветривания и снижают эффективность работы вентиляторных установок вследствие их некорректного подбора.

Предложенная модель показывает, что объемные расходы при движении воздуха в рудниках значительной глубины существенно изменяются, что может приводить к ошибочным оценкам количества воздуха в руднике, а также величины внешних утечек. Для рассматриваемых условий отклонение объемных расходов в верхней и нижней точках воздухоподающего ствола составило 18,4%, для вентиляционного — 21,7%.

Результаты расчетов демонстрируют, что пренебрежение сжимаемостью

воздуха приводит к завышению значений объемных расходов в выработках более чем на 10% по сравнению с моделью, учитывающей данный фактор.

Расчет воздухораспределения с учетом эффекта сжимаемости воздуха и естественной тяги на примере эквивалентного рудника глубиной 2000 м показал, что процентные различия массовых расходов в ветвях между холодным и теплым периодами года достигают 28,6%. Наибольшие различия в количестве воздуха, рассчитанном предложенным и классическим методами, в выработках подземного комплекса наблюдаются в теплый период (до 11,3%), тогда как в стволах — в холодный период (до 17%).

Рассмотрен эффект изменения напора ГВУ при ее работе в среде различной плотности (при поверхностном и подземном размещении ГВУ). Сделан вывод о том, что эффективность работы вентиляторной установки не зависит от плотности воздуха в месте ее расположения, так как потребляемые мощности для обеспечения постоянных расходов в вентиляционной сети при различных ее положениях остаются одинаковыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ghorbani Y., Nwaila G. T., Zhang S. E., Bourdeau J. E., Canovas M., Arzua J., Nikadat N.* Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions // Resources Policy. 2023, vol. 80, no. 2, article 103222. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103222.

2. *Босиков И. И., Клюев Р. В., Ляшенко В. И.* Повышение безопасности и эффективности проветривания угольных шахт путем управления воздухораспределением // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 3. — С. 67—72. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-3-67-72.

3. *Wasilewski S.* Influence of barometric pressure changes on ventilation conditions in deep mines // Archives of Mining Sciences. 2014, vol. 59, no. 3, pp. 621—639. DOI: 10.2478/amsc-2014-0044.

4. *Адриан М. В., Зайцев А. В., Паршаков О. С.* Исследование влияния сжимаемости воздуха на депрессию глубоких шахтных стволов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2025. — № 2. — С. 116—124. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-116-124.

5. *Ольховский Д. В., Зайцев А. В., Уткин Н. Н., Дарбинян Т. П., Давыдов А. А.* О влиянии роста давления воздуха с глубиной на расчет требуемого количества воздуха в глубоких рудниках // Безопасность труда в промышленности. — 2023. — № 8. — С. 89—94. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-89-94.

6. *Кобылкин С. С.* Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М.: НИТУ «МИСиС», 2018. — 40 с.

7. *Trybala P., Rigon S., Remondino F., Banasiewicz A., Wroblewski A., Macek A., Kujawa P., Romanczukiewicz K., Redondo C., Espada F.* Optimizing mining ventilation using 3D tecnologies // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2024, vol. XLVIII-2-2024, pp. 427—434. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-427-2024.

8. *Хохолов Ю. А.* Расчет температуры и воздухораспределения в сети горных выработок рудника «Айхал» // Наука и образование. — 2005. — № 1. — С. 25—28.

9. *Zeyni E. E., Sereshki F., Kakaie R.* The complete model of wet air analysis in mine ventilation design (CMWAA method) // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2024, vol. 58-1, pp. 1—9. DOI: 10.22059/IJMGE.2023.357181.595048.

10. *Hardcastle S. G., Kocsis C. K.* The ventilation challenge // CIM Bulletin. 2004, vol. 97, no. 1080, pp. 51—57.

11. *Barcza M.* A review of the ventilation of some deep mines (Witwatersrand gold fields) // Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. 1952, vol. 52, pp. 168—186.

12. *Shakeri J., Ghorbani E., Taheri A.* A review of deep mining challenges, hazard mitigation, design approaches, and support methods // Underground Space. 2026, vol. 28, pp. 86—136. DOI: 10.1016/j.undsp.2025.10.011.

13. *Wei L., Yanqing L., Lang Z.* Model and numerical solution method the failure of air volume and air flow components in the ventilation network during the period of external fire // Coal Science and Technology. 2025, vol. 53, no. 5, pp. 196—212. DOI: 10.12438/cst.2024-0226.

14. *Карнаух Н. В.*, *Мавроди А. В.*, *Захлебин В. В.*, *Агарков А. В.* Компьютерное моделирование аварийных режимов проветривания шахты // Научный вестник НИИГД «Респиратор». — 2019. — № 2(56). — С. 37—46.

15. *Палеев Д. Ю.* Сложность практического расчета вентиляции шахт при пожарах // Горное эхо. — 2024. — № 2(95). — С. 75—80. DOI: 10.7242/echo.2024.2.14.

16. *Hao H., Jiang S., Wang K., Wu Z., Xi X.* Numerical simulation of smoke spread characteristics and emergency escape at different scales under the interaction of ventilation and thermal driving force in mine with complex ventilation network // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024, vol. 149, pp. 4603—4625. DOI: 10.1007/s10973-024-13024-8.

17. *Popov M. D.*, *Semin M. A.*, *Levin L. Yu.* Air distribution in inclined drifts with intense heat emission sources // Journal of Mining Science. 2024, vol. 60, no. 4, pp. 658—668. DOI: 10.1134/S1062739124040124.

18. *Levin L., Popov M., Semin M., Zhikharev S.* Experimental and numerical study of air flow reversal induced by fire in an inclined mine working // Applied Sciences. 2024, vol. 14, article 6840. DOI: 10.3390/app14156840.

19. *Левин Л. Ю.*, *Кузьминых Е. Г.*, *Жихарев С. Я.* Разработка методики измерения движения воздушных потоков в наклонных выработках при возникновении эффекта теплового запирания // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2025. — № 3. — С. 129—134.

20. *McPherson M. J.* Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, London, Chapman and Hall, 1993, 904 p.

21. *Зайцев А. В.* Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2013. — 19 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Ghorbani Y., Nwaila G. T., Zhang S. E., Bourdeau J. E., Canovas M., Arzua J., Nikadat N. Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions. *Resources Policy*. 2023, vol. 80, no. 2, article 103222. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103222.

2. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Lyashenko V. I. Safety and efficiency improvement of the coal mine ventilation through air distribution control. *Occupational Safety in Industry*. 2022, no. 3, pp. 67—72. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-3-67-72.

3. Wasilewski S. Influence of barometric pressure changes on ventilation conditions in deep mines. *Archives of Mining Sciences*. 2014, vol. 59, no. 3, pp. 621—639. DOI: 10.2478/amsc-2014-0044.

4. Adrian M. V., Zaitsev A. V., Parshakov O. S. The effect of air compressibility on deep mine shafts depression. *Minerals and Mining Engineering*. 2025, no. 2, pp. 116—124. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-116-124.

5. Olkhovsky D. V., Zaitsev A. V., Utkin N. N., Darbinyan T. P., Davydov A. A. On the effect of increasing air pressure with depth on the calculation of the required amount of air in the deep mines. *Occupational Safety in Industry*. 2023, no. 8, pp. 89—94. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-89-94.

6. Kobylkin S. S. *Metodologicheskie osnovy sistemnogo proektirovaniya ventilyatsii shakht* [Methodological foundations of system design of mine ventilation], Doctor's thesis, Moscow, 2018, 40 p.

7. Trybala P., Rigon S., Remondino F., Banasiewicz A., Wroblewski A., Macek A., Kujawa P., Romanczukiewicz K., Redondo C., Espada F. Optimizing mining ventilation using 3D tecnologies. *The International Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2024, vol. XLVIII-2-2024, pp. 427—434. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-427-2024.

8. Hoholov Yu. A. Calculation of temperature and air distribution in the mine workings network of the Aykhal mine. *Nauka i obrazovanie*. 2005, no. 1, pp. 25—28. [In Russ].

9. Zeyni E. E., Sereshki F., Kakaie R. The complete model of wet air analysis in mine ventilation design (CMWAA method). *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2024, vol. 58-1, pp. 1—9. DOI: 10.22059/IJMGE.2023.357181.595048.

10. Hardcastle S. G., Kocsis C. K. The ventilation challenge. *CIM Bulletin*. 2004, vol. 97, no. 1080, pp. 51—57.

11. Barcza M. A review of the ventilation of some deep mines (Witwatersrand gold fields). *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*. 1952, vol. 52, pp. 168—186.

12. Shakeri J., Ghorbani E., Taheri A. A review of deep mining challenges, hazard mitigation, design approaches, and support methods. *Underground Space*. 2026, vol. 28, pp. 86—136. DOI: 10.1016/j.undsp.2025.10.011.

13. Wei L., Yanqing L., Lang Z. Model and numerical solution method the failure of air volume and air flow components in the ventilation network during the period of external fire. *Coal Science and Technology*. 2025, vol. 53, no. 5, pp. 196—212. DOI: 10.12438/cst.2024-0226.

14. Karnaukh N. V., Mavrodi A. V., Zakhlebin V. V., Agarkov A. V. Computer modeling the emergency conditions of mine ventilation. *Nauchnyi vestnik NIIGD Respirator*. 2019, no. 2(56), pp. 37—46. [In Russ].

15. Paleyev D. Yu. Complexity of Practical Calculation of Mine Ventilation during Fires. *Gornoe echo*. 2024, no. 2(95), pp. 75—80. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2024.2.14.

16. Hao H., Jiang S., Wang K., Wu Z., Xi X. Numerical simulation of smoke spread characteristics and emergency escape at different scales under the interaction of ventilation and thermal driving force in mine with complex ventilation network. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024, vol. 149, pp. 4603—4625. DOI: 10.1007/s10973-024-13024-8.

17. Popov M. D., Semin M. A., Levin L. Yu. Air distribution in inclined drifts with intense heat emission sources. *Journal of Mining Science*. 2024, vol. 60, no. 4, pp. 658—668. DOI: 10.1134/S1062739124040124.

18. Levin L., Popov M., Semin M., Zhikharev S. Experimental and numerical study of air flow reversal induced by fire in an inclined mine working. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, article 6840. DOI: 10.3390/app14156840.

19. Levin L. Yu., Kuzminykh E. G., Zhikharev S. Y. Development of a method for measuring air flow movement in inclined workings when the effect of thermal blocking occurs. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2025, no. 3, pp. 129—134. [In Russ].

20. McPherson M. J. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*, London, Chapman and Hall, 1993, 904 p.

21. Zaytsev A. V. *Razrabotka sposobov normalizatsii mikroklimaticheskikh usloviy v gornykh vyrabotkakh glubokikh rudnikov* [Development of methods for normalizing microclimatic conditions in mine workings of deep mines], Candidate's thesis, Perm, 2013, 19 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лядов Егор Алексеевич[1] — техник, e-mail: E.Lyadov@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0001-7174-2621,
Бородавкин Дмитрий Алексеевич[1,2] — канд. техн. наук, научный сотрудник;
доцент, e-mail: borodavkin.dmitriy@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-3307-4295,
Зайцев Артем Вячеславович[1,2] — д-р. техн. наук, зав. лабораторией;
профессор, e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,
[1] Горный институт Уральского отделения РАН, лаборатория Развития горного производства,
[2] Пермский национальный политехнический университет.
Для контактов: Лядов Е.А., e-mail: E.Lyadov@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.A. Lyadov[1], Technician, e-mail: E.Lyadov@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0001-7174-2621,
D.A. Borodavkin[1,2], Cand. Sci. (Eng.), Researcher; Assistant Professor,
e-mail: borodavkin.dmitriy@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-3307-4295,
A.V. Zaitsev[1,2], Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory; Professor,
e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,
[1] Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia,
[2] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.
Corresponding author: E.A. Lyadov, e-mail: E.Lyadov@yandex.ru.

Получена редакцией 16.06.2026; получена после рецензии 21.07.2026; принята к печати 10.11.2026.
Received by the editors 16.06.2026; received after the review 21.07.2026; accepted for printing 10.11.2026.