

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ШАХТНЫХ СТОЛОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

С.В. Мальцев^{1,2}, Л.Ю. Левин¹, М.А. Семин¹, С.А. Бублик¹

¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия, e-mail: st.v.maltsev@ya.ru

Аннотация: Шахтные столбы являются ключевыми участками вентиляционной сети рудника, поскольку наибольшая часть депрессии, развиваемой главной вентиляторной установкой (ГВУ), расходуется при движении воздуха по стволам. Таким образом, важной задачей является определение аэродинамических сопротивлений стволов при проектировании вентиляции подземного рудника. Актуальность данной задачи придает тот факт, что столбы служат весь срок отработки запасов в условиях границ шахтного поля, в некоторых случаях срок эксплуатации стволов увеличивается для разработки соседних участков. Существующие справочные источники и научные публикации свидетельствуют о том, что столбы являются объектами с индивидуальным набором параметров: крепления, армирования, лестничного и трубного отделений. При этом коэффициенты аэродинамического сопротивления в справочниках определены для стволов диаметром 5–7 м. В последнее время для отработки новых месторождений полезных ископаемых проектируют вскрытие стволами диаметром 8–10 м в свету. В связи с отсутствием справочных коэффициентов аэродинамического сопротивления для данных стволов предлагается применение подхода определения аэродинамических сопротивлений проектируемых стволов методами CFD-моделирования, включающими в себя сопоставление результатов численных расчетов и экспериментальных измерений. В рамках настоящего исследования на примере двух эксплуатируемых шахтных стволов показаны возможности прогноза аэродинамических сопротивлений в рамках методологии CFD-моделирования в программном комплексе «Ansys» с учетом детальной прорисовки тубинговой крепи и схемы армирования. По результатам численного моделирования получено, что отклонения численно рассчитанных коэффициентов аэродинамического сопротивления от экспериментально измеренных величин не превышают 8%, что укладывается в пределы погрешности измерительного оборудования. Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о достоверности методологического подхода разработки стационарных трехмерных математических моделей для определения коэффициента аэродинамического сопротивления проектируемых шахтных стволов.

Ключевые слова: рудник, шахтный ствол, типы крепления, типы армирования, трехмерная математическая модель, натурные измерения, верификация модели, коэффициент аэродинамического сопротивления.

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

Для цитирования: Мальцев С. В., Левин Л. Ю., Семин М. А., Бублик С. А. Верификация моделей шахтных стволов на основе экспериментальных измерений для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 71–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_71.

Verification of mine shaft models based on experimental measurements for calculation of drag coefficient

S.V. Maltsev^{1,2}, L.Y. Levin¹, M.A. Semin¹, S.A. Bublik¹

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

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: st.v.maltsev@ya.ru

Abstract: Mine shafts are the key points of mine ventilation networks as the most pressure generated by main mine fans is lost in air flow in the shafts. Thus, a critical mission is determination of drag coefficients in the shafts in the design of underground mine ventilation. The relevance of the problem is added up by the fact that shafts operate for the whole period of extraction of mineral reserves within the limits of a mine field, and sometimes the life of shafts is extended for the time of development of adjacent mine sites. The existing reference sources and scientific literature describe mine shafts as objects having individual sets of parameters: lining, reinforcement, stairways and pipeways. The drag coefficients are given in the guides for the shafts with a diameter of 5–7 m. Recently, for mining new mineral deposits, the projects assume access drilling of shafts with an inner diameter of 8–10 m. In view of the lack of reference data on the drag coefficients for such shafts, it is proposed to determine the drag coefficients for the project shafts using the CFD modeling methods including comparison of the numerical results and experimental measurements. In this research, the case study of two operating mine shafts demonstrates forecastability of the drag coefficients by the CFD modeling in ANSYS with the detailed layout of tubing support and reinforcement. The numerical modeling yields that the deviation of the drag coefficients from such calculations and experimental measurements is not higher than 8 %, which is within the limits of error of measurement equipment. So, the research findings allow a conclusion on reliability of the methodological approach of 3D stationary mathematical modeling for finding drag coefficients in project mine shafts.

Key words: mine, mine shaft, types of support, types of reinforcement, 3D mathematical model, full-scale measurements, model verification, drag coefficient.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under a state contract, Topic Registration No. 126012716039-2.

For citation: Maltsev S. V., Levin L. Y., Semin M. A., Bublik S. A. Verification of mine shaft models based on experimental measurements for calculation of drag coefficient. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):71-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_71.

Введение

В начале XXI в. горнодобывающие предприятия приняли новые вызовы при отработке месторождений. Одновременное увеличение мощностей добычи, глубины отработки полезных ископаемых и удаленности рабочих зон привело к возникновению новых проблем в рудничной вентиляции.

Давно известно, что стволы являются ключевыми участками вентиляционной сети рудника [1, 2]. Причиной этого является потеря основной части давления ГВУ [3] на преодоление их аэродинамического сопротивления. Особую актуальность данной задаче придает тот факт, что стволы служат весь срок отработки запасов в условиях границ шахт-

ного поля, в некоторых случаях срок эксплуатации стволов увеличивается для разработки соседних участков.

В связи с этим ошибка при определении аэродинамического сопротивления шахтного ствола может привести к неверно подобранному вентилятору главного проветривания, в дальнейшем это отразится на обеспечении потребителей требуемым количеством воздуха [4] и увеличении капитальных и эксплуатационных затрат на проветривание в течение всего срока отработки рудника.

Известно, что величина аэродинамического сопротивления шахтных стволов зависит от применяемого типа крепления, армирования, расстрелов, наличия лестничного и трубного отделений, а также кабельной продукции [5].

В существующей справочной литературе и научных публикациях коэффициенты аэродинамического сопротивления представлены для стволов диаметром 5–7 м. Изучением вопроса определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов занимались выдающиеся ученые, такие как А.А. Скочинский, А.И. Ксенофонтова, П.И. Мустель, К.З. Ушаков, Н.Н. Мохирев и другие [6–8].

В последнее время осуществляется проектирование и строительство шахтных стволов диаметром 8–10 м. В связи с этим возникает исследовательская задача по определению коэффициентов аэродинамического сопротивления для стволов данных типоразмеров.

В настоящее время для решения вентиляционных задач активно применяются методы численного моделирования, которые можно разделить на три группы: одномерные, двумерные и трехмерные. Использование одномерных моделей осуществляется для задач систем проветривания всего рудника [9, 10]. Двумерные модели используются исключительно для анализа движения возду-

ха в выработанном пространстве, где через поровое пространство воздух фильтруется, подчиняясь закону Дарси. Использование трехмерных моделей направлено на изучение физических процессов для наиболее значимых участков [11–13], где присутствует в значительной степени неравномерность воздушного потока.

В последние годы решение аэрологических задач осуществляется с использованием методов CFD-моделирования: проводится определение закономерностей тепломассопереноса в тупиковых забоях [14], выполняется моделирование местных и лобовых сопротивлений [15–17]. Использование CFD-методов подходит и для решения задачи по определению аэродинамических сопротивлений шахтных стволов. Вопрос использования CFD-методов для данной задачи рассматривался в некоторых отдельных работах [18–20], в то время как систематического изучения вопроса не проводилось.

В связи с этим целью настоящей работы является подтверждение достоверности численных методов для определения коэффициента аэродинамического сопротивления стволов произвольной топологии на основе результатов экспериментальных измерений. Исследование выполнено на примере двух эксплуатируемых шахтных стволов на калийных рудниках. Практическая значимость работы заключается в разработке методологии для определения величины коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов проектируемых рудников, а также дальнейшего их учета на сетевой модели рудника для определения параметров главной вентиляционной установки.

Методология исследования

В работе предлагается применение комплексной методологии исследований

для обоснования возможности использования численных методов для определения коэффициента аэродинамического сопротивления существующих шахтных стволов. Доказательство основывается на сопоставлении с результатами экспериментальных измерений.

Первая часть исследований основана на построении трехмерной модели ствола в программном комплексе Ansys Fluent, которая включает в себя крепление тубингами, жесткое армирование, наличие труб и кабелей. Далее выполняется моделирование, по результатам которого рассчитывается распределение давлений и скорости движения воздуха для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления.

Вторая часть исследований заключается в проведении натурных измерений и сопоставлении их с результатами моделирования. Все натурные измерения проводятся в условиях действующих шахтных стволов.

Разработка математической модели клетового ствола

В качестве исходных данных для разработки модели принимается участок шахтного ствола длиной 136 м и диаметром 8 м. Крепление ствола осуществляется чугунными тубингами разных типоразмеров. Каждое тубинговое кольцо

состоит из 15 тубингов. Распределение типов тубингов по глубине ствола представлено в табл. 1.

Ствол оснащен жесткой расстрельной армировкой с коробчатыми проводниками из угловой стали с размерами $200 \times 200 \times 16$ мм (ГОСТ 8509-72). Для расстрелов принят сварной коробчатый профиль из угольников с размерами $200 \times 125 \times 16$ мм (ГОСТ 8510-86). Шаг армирования клетового ствола 3,004 м. Подробная схема армирования ствола представлена на рис. 1.

Разработка базовой трехмерной модели шахтного ствола осуществляется в программном комплексе Ansys Fluent [12, 13]. Решение настоящей задачи осуществляется на базе системы усредненных по Рейнольдсу уравнений сохранения массы, импульса и энергии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij})_{eff}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 1

Распределение тубингов по глубине в клетевом стволе **Distribution of tubing by depth in a cage shaft**

Интервал (относительная отметка), м	Тип тубинга	Количество колец, шт.	Доля от общего количества, %
Кейлькранц	8.0-60-K-01	1	0,3
-23,8 ÷ -40,3	8.0-30-1.01	15	5,3
-40,3 ÷ -188,8	8.0-40-1.01	99	34,3
-188,8 ÷ -313,7	8.0-60-1.01	83	28,7
-313,7 ÷ -393,2	8.0-80-1.01	53	18,3
-393,2 ÷ -473,0	8.0-100-1.01	38	13,1
Итого		289	100

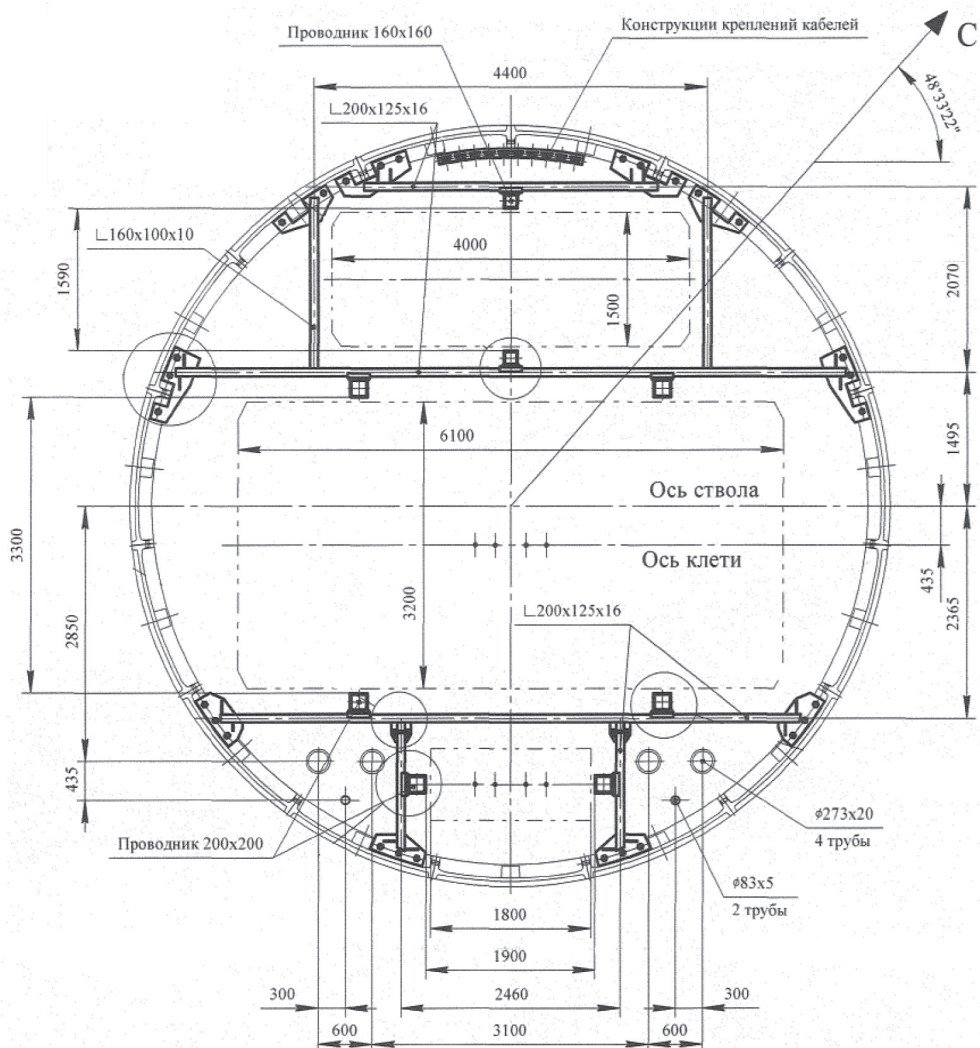


Рис. 1. Схема армирования клетового ствола
Fig. 1. Reinforcement scheme of the cage shaft

где $\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j}$ — тензор турбулентных напряжений Рейнольдса, Па; u_i — вектор осредненной по Рейнольдсу скорости воздуха, м/с; $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i u_i}{2}$ — удельная полная энергия воздуха, Дж/кг; h — удельная энтальпия, Дж/кг; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К); Pr_t — турбулентное число Прандтля; μ_t —

турбулентная динамическая вязкость, Па·с; $(\tau_{ij})_{eff}$ — эффективный тензор напряжений, определяемый следующим соотношением:

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right), \quad (4)$$

где $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ — эффективная динамическая вязкость, Па·с.

В работе использована модель турбулентности realizable $k-\epsilon$, в которой для

расчета турбулентной вязкости применяется формула Колмогорова–Прандтля:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

а уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \\ & - \frac{\rho C_{2\varepsilon} \varepsilon^2}{k + \sqrt{\varepsilon \nu}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

где $S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$; $G_k = \mu_t S^2$ — слагаемое, отвечающее за генерацию кинетической энергии турбулентности за счет градиентов средней скорости;

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\rho r_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \text{слагаемое, отвечающее за генерацию кинетической энергии турбулентности за счет плавучести;}$$

g_i — вектор ускорения силы тяжести; β — коэффициент линейного теплового расширения; $\sigma_k = 1,0$ и $\sigma_\varepsilon = 1,2$ — турбулентные числа Прандтля для k и ε соответственно; S_k и S_ε — источники членов для k и ε соответственно; $C_1 = \max[0,43; \eta/(\eta+5)]$, $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_2 = 1,9$ — константы модели; $\eta = S(k/\varepsilon)$; $C_{3\varepsilon} = \tanh|v/u|$; v, u — вертикальная и горизонтальная компоненты скорости основного потока;

$$C_\mu = \frac{1}{4,04 + \sqrt{6} \cos \varphi \frac{kU}{\varepsilon}}.$$

Для моделирования движения воздуха в стволе задавались следующие параметры: плотность воздуха — $1,225 \text{ кг/м}^3$; скорость воздуха на входе в расчетную область — 15 м/с ; на выходе из расчетной области — нулевое статическое давление.

Дискретизация расчетной области производилась методом контрольных объемов: внутри задавалась тетраэдрическая сетка, на стенках — призматический пограничный слой. Для определе-

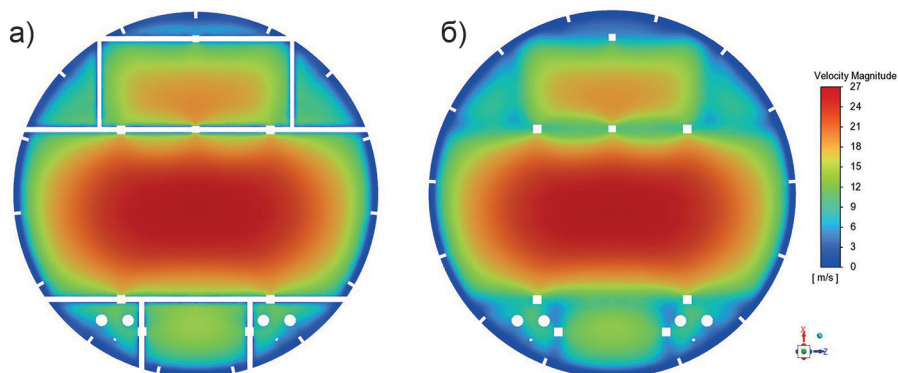


Рис. 2. Поле скорости воздуха в клетевом стволе диаметром 8 м: в сечении расстрелов (а); в сечении между расстрелами (б)

Fig. 2. Air velocity field in a cage shaft with a diameter of 8 m: in the cross-section of the shoots (a); in the cross-section between the shoots (b)

ния оптимального количества элементов расчетной сетки проводилось исследование сеточной сходимости на основании сравнения перепада давлений между входом в расчетную область и в точках на расстоянии $2,5 D$ (20 м); $3,8 D$ (30 м); $5,0 D$ (40 м); $6,3 D$ (50 м) от входа в расчетную область, где D — диаметр ствола в свету, и сравнения максимальной скорости воздуха в сечении ствола. Расчетная сетка состоит из 14,3 млн элементов (контрольных объемов).

Моделирование коэффициента аэродинамического сопротивления ствола

Следующим этапом методологии является моделирование движения воздуха в стволе для клетового ствола с учетом типа крепления, армирования (расстрелы и направляющие), а также трубопроводы и кабельная продукция.

На рис. 2 и 3 наглядно представлена неоднородность воздушного потока по сечению ствола. В центральной части скорость движения воздуха является максимальной и достигает 26,6 м/с, ближе к тубингам или в районе балок образуется область аэродинамической тени.

По результатам моделирования рассчитаны параметры аэродинамического

сопротивления: коэффициент аэродинамического сопротивления трения, приведенный коэффициент аэродинамического сопротивления, безразмерная шероховатость выработки клетового ствола с учетом крепления, армирования и трубопроводов.

Согласно распределению тубинговых колец по типам тубингов (см. табл. 1), величина проектного коэффициента аэродинамического сопротивления клетового ствола составляет $0,0295 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Верификация трехмерной численной модели клетового ствола

Для верификации трехмерных численных моделей аэродинамических процессов в клетовом стволе проведены экспериментальные исследования аэротермодинамических параметров воздуха. Измерения проводились в клетовом стволе на смотровой площадке клетки в период остановки. Продолжительность остановки составляла 10 мин для выравнивания потока воздуха. В каждой замерной станции проводились замеры температуры, влажности и абсолютного давления воздуха. Измерения расхода воздуха в стволе проведены косвенным способом путем измерения скорости воздуха в главных вентиляционных штраках.

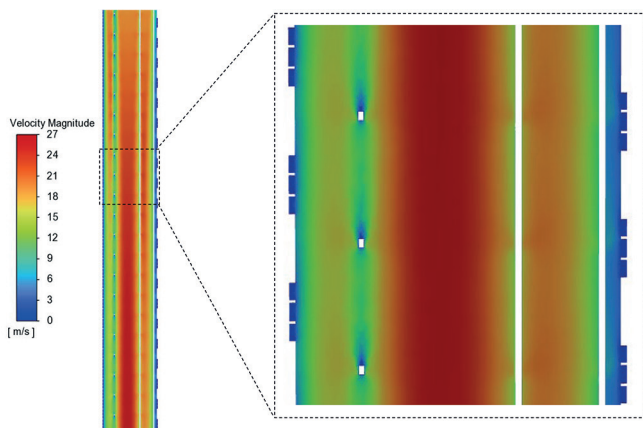


Рис. 3. Поле скорости воздуха в центральном продольном сечении клетового ствола диаметром 8 м
Fig. 3. Air velocity field in the central longitudinal section of a cage shaft with a diameter of 8 m

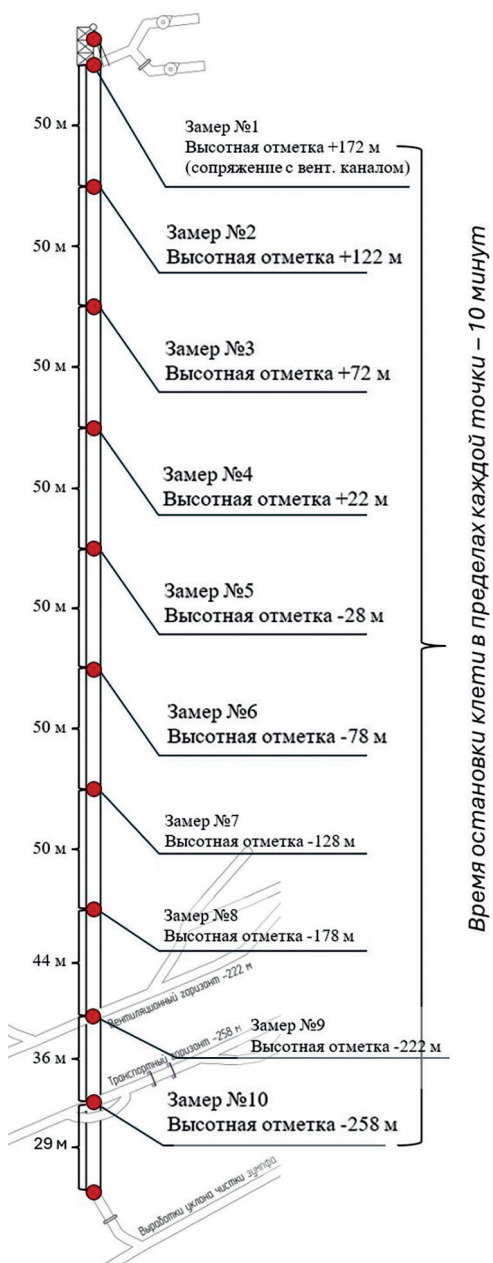


Рис. 4. Схематическое изображение мест проведения замеров в клетевом стволе
Fig. 4. Schematic representation of the measurement locations in the cage shaft

Экспериментальные измерения проводились с использованием следующих приборов: барометр DPI-740 (абсолют-

ная паспортная погрешность ± 15 Па); анемометр АПР-2 (абсолютная погрешность измерения $\pm (0,1 + 0,05 \cdot v)$ м/с); лазерный дальномер DISTOTM D2 (абсолютная паспортная погрешность $\pm 0,0015$ м); термовлагомер Fluke-971 (абсолютная паспортная погрешность измерения температуры $\pm 0,5$ °С; относительной влажности $\pm 2,5\%$).

По результатам измерений суммарное количество воздуха, перемещающегося по клетевому стволу, равно $379,1$ м³/с. Схематическое изображение мест проведения замеров в клетевом стволе указано на рис. 4.

Результаты натурных измерений параметров воздуха в клетевом стволе приведены в табл. 2.

В таблице красным цветом выделены участки ствола, на которых не рекомендуется использовать данные для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления по причине нелинейного распределения температур воздуха. Эти участки расположены вблизи сопряжений горизонта со стволом. Методика экспериментальных измерений, представленная в работе [1], заключается в использовании результатов экспериментальных измерений на прямолинейном участке ствола.

Определение аэродинамического сопротивления участка проектируемого ствола осуществляется по формуле

$$\Delta R = \frac{\alpha \cdot \Pi \cdot \Delta l}{S^3}, \quad (8)$$

где α — коэффициент аэродинамического сопротивления, Н·с²/м⁴; S — площадь поперечного сечения ствола, м²; Π — периметр ствола, м; Δl — длина исследуемого участка ствола, м.

Далее, путем преобразования формулы (8) получим итоговую зависимость определения экспериментального коэффициента аэродинамического сопротивления:

Таблица 2

Результаты натурных измерений параметров воздушного потока в клетевом стволе
Results of experimental measurements of air flow parameters in a cage shaft

№ замерной станции	Высотная отметка, м	Абсолютное давление, Па	Температура, °С	Относительная влажность, %	Плотность, кг/м³
1	172	96 728	+9,1	52	1,19
2	122	97 387	+9,6	58	1,20
3	72	98 028	+9,4	64	1,21
4	22	98 662	+9,7	70	1,21
5	-28	99 310	+10,0	70	1,22
6	-78	99 954	+10,3	71	1,23
7	-128	100 610	+10,7	72	1,23
8	-178	101 256	+11,2	73	1,24
9	-222	101 852	+12,2	72	1,24
10	-258	102 300	+14	74	1,24

$$\alpha_{\text{экспер}} = \frac{(P_{-178} - (P_{72} + \rho_{cp} \cdot g \cdot \Delta l)) \cdot S^3}{\Pi \cdot \Delta l \cdot \left(\sum_{j=1}^n (v_j \cdot S_j) \right)^2} \pm \delta_{\alpha} \quad (9)$$

где δ_{α} — относительная приборная погрешность при определении коэффициента аэродинамического сопротивления, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

В табл. 3 представлены рассчитанные коэффициенты аэродинамического сопротивления участков клетевых стволов.

Анализируя данные табл. 3, можно сделать вывод о незначительном расхождении экспериментального коэффи-

циента аэродинамического сопротивления и теоретического (проектного), рассчитанного на основании трехмерного численного моделирования. Увеличенное экспериментальное значение коэффициента α на участках «22 м ÷ -28 м» и «-78 м ÷ -128 м» может быть вызвано длительной эксплуатацией ствола и образованием пылевых наростов. При этом расхождение между средним значением и проектным составляет 8%.

Верификация трехмерной численной модели скипо-клетевого ствола

Аналогичные исследования были выполнены для скипо-клетевого ствола

Таблица 3

Коэффициент аэродинамического сопротивления участков клетевых стволов
The aerodynamic drag coefficient of the cage shaft sections

Участок ствола	$\alpha_{\text{экспер}}, \text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	$\alpha_{\text{экспер}} / \alpha_{\text{проект}}$	$\alpha_{\text{экспер}} \pm \delta_{\alpha}, \text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$
72 м ÷ 22 м	0,028	0,95	0,028 ± 0,007
22 м ÷ -28 м	0,0365	1,24	0,0365 ± 0,009
-28 м ÷ -78 м	0,03	1,02	0,03 ± 0,0075
-78 м ÷ -128 м	0,037	1,25	0,037 ± 0,009
-128 м ÷ -178 м	0,028	0,95	0,028 ± 0,007
Суммарное среднее значение	0,032	1,08	0,032 ± 0,008

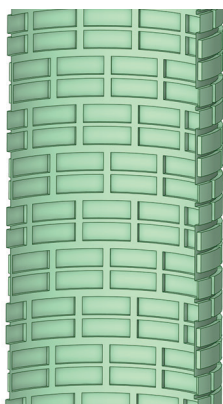


Рис. 5. Модельный участок скипо-клетевого ствола
Fig. 5. Model section of the skip-cage shaft

другого калийного рудника. Для проведения экспериментальных измерений использовалось то же оборудование и схожая методика измерений.

Ствол закреплен тубингами (рис. 5) и оснащен гибкой канатной арматурой, его диаметр составляет 7 м. Выбор данного ствола в качестве второго объекта исследования обусловлен тем, что для него имелись достоверные экспериментальные данные.

По результатам моделирования, величина проектного коэффициента аэродинамического сопротивления скипо-клетевого ствола составляет $0,00923 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Разработанная выше методика численного трехмерного моделирования применена для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления участка скипо-клетевого ствола. В табл. 4 представлены экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные коэффициенты аэродинамического сопротивления участков клетевых стволов.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о досто-

верности подхода определения коэффициента аэродинамического сопротивления проектируемых шахтных стволов методом CFD-моделирования.

Выводы

По результатам проведенных исследований обоснована методология расчета коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов произвольной топологии. Основные результаты исследования:

1. В работе верифицирован подход определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов на основе методологии численного трехмерного моделирования течения воздушных потоков с детальной прорисовкой геометрии крепления и армирования стволов.

2. Разработаны трехмерные математические модели действующих клетевых (диаметр 8 м) и скипо-клетевых (диаметр 7 м) стволов, на которых проведено математическое моделирование и вычислены коэффициенты аэродинамического сопротивления. Величина модельных коэффициентов составляет $0,0295$ и $0,00923 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ соответственно.

3. Проведены экспериментальные исследования на этих клетевом и скипо-клетевом стволах. По результатам проведенных измерений рассчитаны экспериментальные коэффициенты аэродинамического сопротивления стволов, их величина составляет $0,032$ и $0,0097 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ соответственно.

4. Метод трехмерного моделирования для определения коэффициента аэродинамического сопротивления шахтных стволов произвольной топологии вери-

Таблица 4

Коэффициент аэродинамического сопротивления участков скипо-клетевого ствола
Aerodynamic drag coefficient of sections of the skip-cage shaft

Участок ствола	$\alpha_{\text{экспер}}, \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	$\alpha_{\text{экспер}} / \alpha_{\text{проект}}$	$\alpha_{\text{экспер}} \pm \delta_{\alpha}, \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$
0 м ÷ 851,7 м	0,0097	1,05	$0,0097 \pm 0,0024$

фицирован на основе экспериментальных измерений. Расхождение между теоретическим и экспериментальным

коэффициентом для клетового и скипового клетового стволов не превышает 8 и 5% соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круглов Ю. В. Моделирование систем оптимального управления воздушораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2006. — 20 с.
2. Мальцев С. В., Семин М. А., Кормищиков Д. С. Метод определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов медно-никелевых рудников // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 170–178.
3. 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.
4. Шалимов А. В., Кормищиков 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.
5. Левин Л. Ю., Мальцев С. В., Семин М. А., Колесов Е. В. Расчет аэродинамического сопротивления проектируемых шахтных стволов с использованием методов вычислительной гидродинамики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 5. — С. 100–117. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_100.
6. Kempson W. J., Webber—Youngman R. C. W., Meyer J. P. Optimizing shaft pressure losses through computational fluid dynamics modelling // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013, vol. 113, no. 12, pp. 931–939. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.058.
7. He D., Wang X., Guo C., Li H., Zhang Y. Study on the influence of the cage lifting piston effect in main intake shafts on air flow in transportation lanes // Applied Sciences. 2023, vol. 13, article 1419. DOI: 10/3390/app13031419.
8. Мельник В. В., Федорова М. А., Мушин К. М., Буханик А. И., Малова С. А. Подземная геотехнология // Процессы подземных горных работ в магистральных транспортных выработках, стволах и на поверхности шахты. — М., Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. — 68 с.
9. Olkhovskiy D. V., Parshakov O. S., Bublik S. A. Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting // Mining Science and Technology (Russia). 2023, vol. 8, no. 1, pp. 47–58. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-86.
10. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Анализ аварийности и тенденции развития аэрологической безопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 12. — С. 135–149. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_135.
11. Liu M., Zhu C., Zhang H., Zheng W., You S., Campana P. E., Yan J. The environment and energy consumption of a subway tunnel by the influence of piston wind // Applied Energy. 2019, vol. 246, pp. 11–23.
12. Кобылкин С. С., Ушаков В. К., Кузнецов И. И. Анализ местных сопротивлений горных выработок на общешахтное аэродинамическое сопротивление // Горная промышленность. — 2024. — № 2. — С. 93–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-93-96.
13. He D., Wang X., Guo C., Li H., Liu J. The analysis of the factors influencing the operation of the piston wind in the case of the hybrid hoisting shaft and the simulation study of the operation effect // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024, vol. 149, article 105799.
14. Li Z., Li R., Xu Y., Xu Y. Study on the optimization and oxygen-enrichment effect of ventilation scheme in a blind heading of plateau mine // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022, vol. 19, no. 14, article 8717.
15. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Стукалов В. А. Моделирование аэродинамических сопротивлений сопряжений выработок // Горный журнал. — 2009. — № 12. — С. 56–58.
16. Кобылкин С. С., Кузнецов И. И., Федоров Д. А., Кобылкин А. С. Оценка влияния местных и лобовых аэродинамических сопротивлений на воздушораспределение в вентиляционной сети / Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: V конференция Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — С. 266–268.

17. Кузнецов И. И. Оценка влияния местных сопротивлений на общешахтное аэродинамическое сопротивление при реверсе // Безопасность жизнедеятельности. — 2024. — № 5. — С. 49–56.

18. Zhang H., Falk L., Allen C. An application of computational fluid dynamics to predict shock loss factors at raise junctions in underground mine ventilation systems // Mining, Metallurgy & Exploration. 2024, vol. 41, no. 3, pp. 1155–1170.

19. Huang H., Sun T., Zhang G., Li D., Wei H. Evaluation of a developed SST $k-\omega$ turbulence model for the prediction of turbulent slot jet impingement heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, vol. 139, pp. 700–712.

20. Duan Y., Zheng Q., Jiang B. Use of computational fluid dynamics to implement an aerodynamic inverse design method based on exact Riemann solution and moving wall boundary // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2020, vol. 14, no. 1, pp. 284–298. **VIAS**

REFERENCES

1. Kruglov Yu. V. *Modelirovanie sistem optimal'nogo upravleniya vozdukhoraspredeleniem v ventilyatsionnykh setyakh podzemnykh rudnikov* [Modeling of optimal air distribution control systems in ventilation networks of underground mines], Candidate's thesis, Perm, 2006, 20 p.

2. Maltsev S. V., Semin M. A., Kormshchikov D. S. Method for determining the aerodynamic drag coefficients of mine shafts of copper-nickel mines. *Journal of Mining Sciences*. 2020, no. 6, pp. 170–178. [In Russ].

3. Adrian M. V., Zaytsev 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].

4. Shalimov A. V., Kormshchikov D. S., Popov M. D. Determining the indicator of convective air stability in shafts under the zero-ventilation mode of a mine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025, vol. 336, no. 4, pp. 89–97. [In Russ].

5. Levin L. Y., Maltsev S. V., Semin M. A., Kolesov E. V. Aerodynamic drag design for project mine shafts using methods of computational fluid dynamics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 5, pp. 100–117. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_100.

6. Kempson W. J., Webber–Youngman R. C. W., Meyer J. P. Optimizing shaft pressure losses through computational fluid dynamics modelling. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013, vol. 113, no. 12, pp. 931–939. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.058.

7. He D., Wang X., Guo C., Li H., Zhang Y. Study on the influence of the cage lifting piston effect in main intake shafts on air flow in transportation lanes. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, article 1419. DOI: 10.3390/app13031419.

8. Mel'nik V. V., Fedorova M. A., Murin K. M., Bukhanik A. I., Malova S. A. *Podzemnaya geotekhnologiya. Protssy podzemnykh gornykh rabot v magistral'nykh transportnykh vyrabotkakh, stvolakh i na poverkhnosti shakhty* [Underground geotechnology. Processes of underground mining in main transport workings, shafts and on the surface of the mine], Moscow, Tula, Izd-vo TulGU, 2022, 68 p.

9. Olkhovskiy D. V., Parshakov O. S., Bublik S. A. Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 47–58. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-86.

10. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Analysis of accidents and development trends in aerological safety of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 12, pp. 135–149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_135.

11. Liu M., Zhu C., Zhang H., Zheng W., You S., Campana P. E., Yan J. The environment and energy consumption of a subway tunnel by the influence of piston wind. *Applied Energy*. 2019, vol. 246, pp. 11–23.

12. Kobylkin S. S., Ushakov V. K., Kuznetsov I. I. Analysis of local resistance of mine workings for general mine aerodynamic resistance. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 2, pp. 93–96. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-93-96.

13. He D., Wang X., Guo C., Li H., Liu J. The analysis of the factors influencing the operation of the piston wind in the cage of the hybrid hoisting shaft and the simulation study of the operation effect. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024, vol. 149, article 105799.

14. Li Z., Li R., Xu Y., Xu Y. Study on the optimization and oxygen-enrichment effect of ventilation scheme in a blind heading of plateau mine. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, no. 14, article 8717.

15. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Stukalov V. A. Modeling of aerodynamic resistance of mine workings intersections. *Gornyi Zhurnal*. 2009, no. 12, pp. 56–58. [In Russ].
16. Kobylkin S. S., Kuznetsov I. I., Fedorov D. A., Kobylkin A. S. Assessment of the influence of local and frontal aerodynamic resistance on air distribution in the ventilation network In Problems and prospects of complex development and preservation of the earth's bowels. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh nedr: V konferentsiya Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly akademika RAN K.N. Trubetskogo* [Proceedings of the V conference of the International Scientific School of Academician of the Russian Academy of Sciences K. N. Trubetskoy], Moscow, 2022, pp. 266–268. [In Russ].
17. Kuznetsov I. I. Assessment of the impact of local resistances on the mine-wide aerodynamic resistance during reversal. *Life Safety*. 2024, no. 5, pp. 49–56. [In Russ].
18. Zhang H., Falk L., Allen C. An application of computational fluid dynamics to predict shock loss factors at raise junctions in underground mine ventilation systems. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024, vol. 41, no. 3, pp. 1155–1170.
19. Huang H., Sun T., Zhang G., Li D., Wei H. Evaluation of a developed SST $k-\omega$ turbulence model for the prediction of turbulent slot jet impingement heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, vol. 139, pp. 700–712.
20. Duan Y., Zheng Q., Jiang B. Use of computational fluid dynamics to implement an aerodynamic inverse design method based on exact Riemann solution and moving wall boundary. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2020, vol. 14, no. 1, pp. 284–298.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мальцев Станислав Владимирович¹ — канд. техн. наук, заведующий сектором; доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: st.v.maltsev@ya.ru, ORCID ID: 0009-0002-9887-1455,
Левин Лев Юрьевич¹ — член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, заведующий отделом, e-mail: aerolog_lev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0767-9207,
Семин Михаил Александрович¹ — д-р техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: seminma@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,
Бублик Сергей Анатольевич¹ — младший научный сотрудник, e-mail: serega-bublik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2084-0002,
¹ Горный институт Уральского отделения РАН.
Для контактов: Мальцев С.В., e-mail: st.v.maltsev@ya.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.V. Maltsev¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector; Assistant Professor, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia, e-mail: st.v.maltsev@ya.ru, ORCID ID: 0009-0002-9887-1455,
L.Y. Levin¹, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department, e-mail: aerolog_lev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0767-9207,
M.A. Semin¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: seminma@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,
S.A. Bublik¹, Junior Researcher, e-mail: serega-bublik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2084-0002,
¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.
Corresponding author: S.V. Maltsev, e-mail: st.v.maltsev@ya.ru.

Получена редакцией 18.03.2026; получена после рецензии 28.04.2026; принята к печати 10.08.2026.
Received by the editors 18.03.2026; received after the review 28.04.2026; accepted for printing 10.08.2026.