

УДК 622.4

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУДНИКОВ**

**С. В. Мальцев, М. А. Семин, Д. С. Кормщик**

*Горный институт УрО РАН,  
E-mail: stasmalcev32@gmail.com, ул. Сибирская, 78-А, 614007, г. Пермь, Россия*

Описаны экспериментальные исследования аэротермодинамических параметров воздуха, проведенные в шахтных стволах рудников Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель». В результате замеров абсолютного давления и температуры, а также расчета плотности воздуха в стволах КС-2, ГС и ВС-4 рудника «Октябрьский» установлен практически линейный характер зависимости абсолютного давления воздуха от глубины ствола и существенное отклонение от линейного вида зависимости температуры и плотности воздуха от глубины ствола вблизи его сопряжений с вентиляционными каналами и подземными горизонтами. Выполнена оценка длин участков, на которых происходит выравнивание параметров воздуха после сопряжений. Предложен новый метод определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов и рассчитаны сопротивления 28 стволов норильских рудников. Они использованы при разработке математических моделей вентиляционных сетей рудников и при проектировании проветривания новых участков рудников.

*Шахтные стволы, коэффициент аэродинамического сопротивления, рудничная вентиляция, моделирование воздухораспределения, трехмерное численное моделирование, границы участка ствола, физические процессы в стволах, экспериментально-аналитический способ*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200615

В настоящее время значительное развитие получила горнорудная промышленность: проектируются и строятся рудники (калийные, медно-никелевые), разрабатываются проекты вскрытия глубоких и сверхглубоких рудных залежей, внедряются новые технологические схемы для повышения эффективности и безопасности ведения всех производственных процессов. В связи с возникновением многочисленных аварийных ситуаций (возгорание в горных выработках, взрывы газа и пыли, отравления людей газами) задачи мониторинга состава рудничной атмосферы и прогнозирования воздухораспределения особенно актуальны. Решение данных задач невозможно без разработки корректных математических моделей рудничных вентиляционных сетей, качество которых зависит от точности определения аэродинамических сопротивлений всех горных выработок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-77-30008).

Основная часть потери давления в рудничной вентиляционной сети приходится на шахтные стволы. Повышение точности определения их аэродинамических сопротивлений при проектировании позволит избежать ошибок при размещении рабочих точек главных вентиляторных установок (ГВУ) и дальнейшей их покупке. Повышается точность оценки требуемых капитальных затрат при строительстве поверхностного комплекса ГВУ и при покупке вентиляторов.

Основные причины потери давления при движении воздушных потоков по стволам — шероховатость стенок и наличие разнообразных препятствий на пути движения воздуха. Задачей определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов занимались многие исследователи [1–4]. В [5–7] приводятся данные по экспериментальному измерению аэродинамического сопротивления стволов. В [1–7] исследования выполнены для стволов диаметром 5–7 м. На действующих рудниках ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”, ООО “ЕвроХим — Усольский калийный комбинат” и многих других горнодобывающих предприятиях диаметр пройденных стволов достигает 8 м, на новых проектируемых рудниках Норильска рассматривается диаметр стволов 10 м.

В связи с тем, что схемы армирования стволов активно совершенствуются [8, 9], увеличивается сечение стволов, разрабатывается новое современное высокоточное оборудование, старые методики расчета аэродинамических сопротивлений становятся малоэффективными и неточными [10]. Цель настоящей работы — проведение исследований по определению аэродинамических сопротивлений шахтных стволов произвольного типа и разработка методики расчета коэффициентов аэродинамического сопротивления.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

#### АЭРО- И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА В ШАХТНЫХ СТВОЛАХ

При турбулентном режиме течения воздуха аэродинамическое сопротивление горных выработок и шахтных стволов является константой, не зависящей от изменений объемного расхода воздуха [1, 6]. Однако аэродинамическое сопротивление подвержено временному изменению ввиду образующихся пылевых и коррозионных наростов на армировке и крепи ствола [11].

Традиционно сопротивление участка ствола определяется двумя способами — по проектным данным и данным воздушно-депресссионной съемки. Расчет проектного аэродинамического сопротивления осуществляется по формуле

$$\Delta R_{\text{пр}} = \frac{\alpha \Pi \Delta l}{S^3}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент аэродинамического сопротивления, кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi$  — периметр шахтного ствола, м;  $\Delta l$  — длина участка ствола, м;  $S$  — площадь поперечного сечения ствола, м<sup>2</sup>.

Коэффициент аэродинамического сопротивления  $\alpha$  принимается на основании данных, приведенных в справочных пособиях [1–3]. При этом коэффициенты, представленные в различных справочниках, существенно отличаются друг от друга (от 0.001 до 0.006 кг/м<sup>3</sup>). Кроме того, вся существующая справочная литература опубликована в 50–60-х гг. XX в.

В рамках второго способа расчета аэродинамического сопротивления ствола необходимо использование данных воздушно-депресссионной съемки: расхода воздуха и потери давления (депрессии) на исследуемом участке горной выработки. Депрессию определяют манометрическим или барометрическим способом. Манометрический способ более трудоемкий и длительный, осуществляется путем прокладки резиновых трубок по маршруту измерений. В связи с нестационарностью рудничной вентиляционной сети данный способ в современных условиях применяется редко.

При использовании барометрического способа измерения депрессии достаточно провести три замера абсолютного давления — в начале и в конце исследуемого участка ствола, а также на дневной поверхности для исключения влияния эффекта изменения атмосферного воздуха со временем. В рамках барометрического способа аэродинамическое сопротивление участка действующего ствола находится по формуле

$$\Delta R_{\text{ВДС}} = \frac{P_{\text{абс}(i-1)} - (P_{\text{абс}(i)} \pm \Delta P_{\text{атм}} - \rho_{\text{ср}} g \Delta l)}{\left( \sum_{j=1}^n v_j S_j \right)^2}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{абс}(i-1)}$  — абсолютное давление воздуха в начальной точке  $i-1$  измеряемого участка ствола, Па;  $P_{\text{абс}(i)}$  — абсолютное давление воздуха в конечной точке  $i$  измеряемого участка, Па;  $\pm \Delta P_{\text{атм}}$  — изменение атмосферного давления в промежуток времени между замерами абсолютного давления на границах участка ствола (знак “–” — атмосферное давление возросло, знак “+” — снизилось), Па;  $\rho_{\text{ср}}$  — средняя плотность воздуха на участке ствола, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Delta l$  — длина исследуемого участка ствола, м;  $v_j$  — скорость движения воздуха в  $j$ -й выработке, м/с;  $S_j$  — площадь поперечного сечения  $j$ -й выработки, м<sup>2</sup>;  $n$  — количество выработок, в которых проводятся измерения.

Существующие исследования не дают четкого ответа на вопрос о выборе точек, в которых проводятся измерения. Согласно [12], необходимо отступить от сопряжения “ствол – калориферный канал” 12–50 калибров ствола, что довольно существенно и порой превышает длину прямого участка ствола без сопряжений.

В (2) необходимо установить параметры  $P_{\text{абс}(i-1)}$ ,  $P_{\text{абс}(i)}$ ,  $\rho_{\text{ср}}$  и  $v$ . В связи с невозможностью определения скорости воздуха непосредственно в стволе, все измерения аэродинамических параметров воздуха проводят в горных выработках, сопрягающихся с ним. Отметим, что плотность воздуха является вычисляемым параметром с использованием других его термодинамических свойств. Она в большей степени зависит от давления и температуры воздуха [13]. Во влажных стволах необходимо учитывать зависимость плотности от относительной влажности воздуха.

В 2011–2019 гг. в Горном институте УрО РАН осуществлены обширные экспериментальные исследования аэродинамических параметров медно-никелевых рудников ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”, выявлены закономерности распределения давления и температуры воздуха по длине шахтных стволов. Натурные измерения термодинамических параметров (давление, температура) выполнены со смотровых площадок скипов и клетей по всему сечению ствола через 100 м на прямолинейном участке и через 20 м после сопряжения. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 1.

Замеренные абсолютные давления воздуха по длине нескольких шахтных стволов (воздухоподающих и вентиляционных) хорошо аппроксимируются линейной зависимостью (рис. 1а). Линейный характер изменения давления не нарушается при прохождении потоком сопряжений ствола с подземными горизонтами. Аналогичный вывод не может быть сделан для экспериментальных замеров температуры воздуха по глубине ствола. На рис. 1б видно, что замеренные значения температуры по глубине хорошо “ложатся” на прямую линию только в пределах основного прямолинейного участка ствола от вентиляционных (калориферных) каналов до сопряжения с первым подземным горизонтом. На участке стволов 0–100 м (область

аэродинамических возмущений потока от сопряжения стволов с калориферными и вентиляционными каналами) и 800–1100 м (область аэродинамических возмущений потока от сопряжения стволов с горизонтами) ярко выражена нелинейность и немонотонность графиков изменения температуры воздуха. Немонотонность изменения температуры с глубиной, наблюдаемая для всех стволов, связывается с тепловым влиянием водопритоков из рабочих горизонтов в ствол при проведении эксперимента.

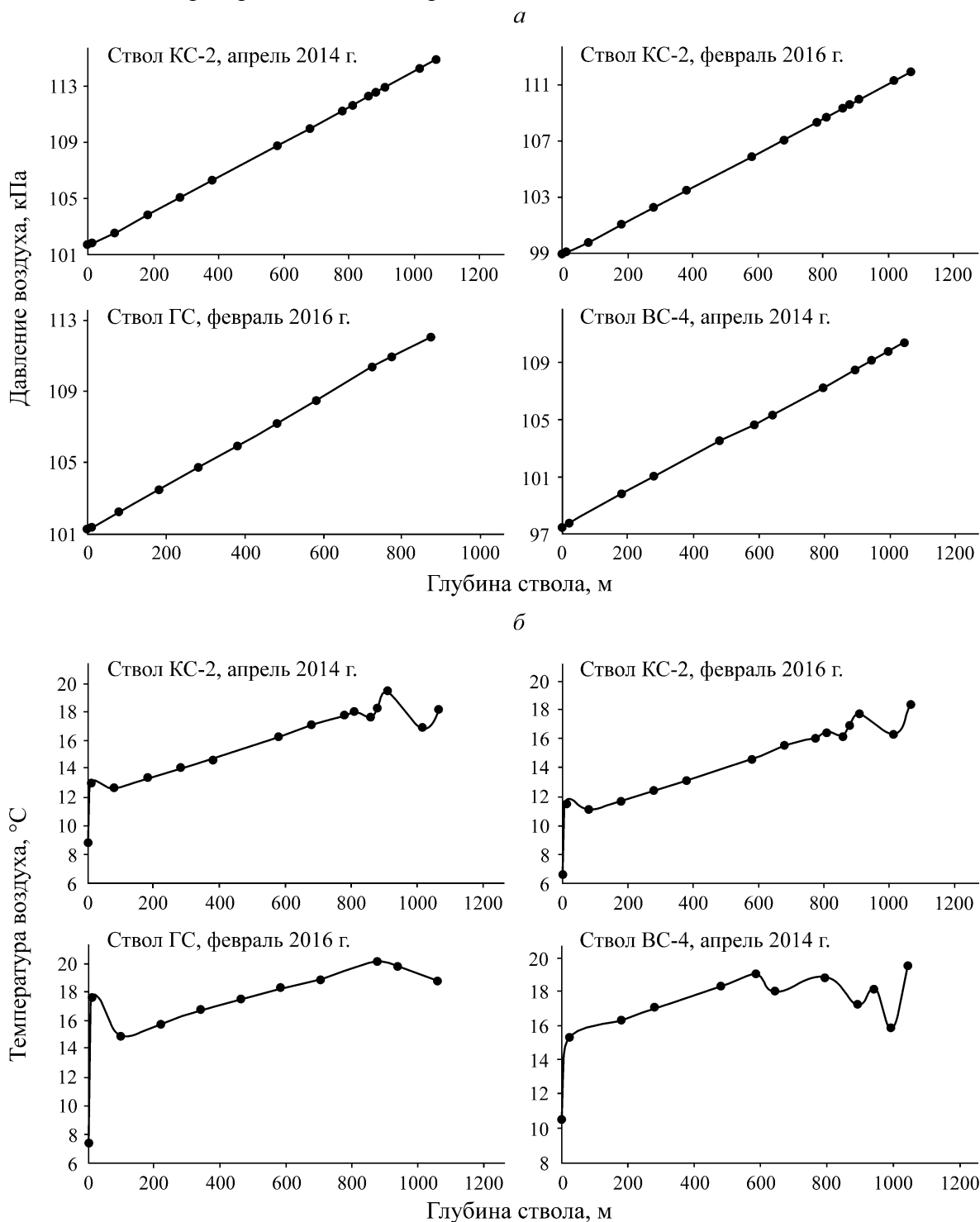


Рис. 1. Экспериментальные измерения абсолютного давления воздуха (а) и температуры воздуха (б) в стволах рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»

Выравнивание температуры воздуха после смешивания воздушных потоков происходит через 80–100 м (12–15 характерных диаметров ствола), выравнивание давления — на существенно меньшем отрезке ствола. Полученные экспериментальные результаты согласуются с описанным в [14] теоретическим анализом по определению границ участков для проведения измерений. Выявлено, что давление выравнивается через 40–50 м после смешивания воздушных потоков, температура воздушного потока устанавливается через 100 м.

#### ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТВОЛАХ

На следующем этапе исследования в аналитическом комплексе “АэроСеть” разработана аэротермодинамическая модель ствола КС-2 рудника “Октябрьский” (глубина модели участка ствола 1000 м, площадь поперечного сечения 50.24 м<sup>2</sup>, тип крепления — тубинги, бетон) с учетом различных физических процессов. В модели плотность воздуха изменяется под действием следующих факторов: гравитационное сжатие воздуха; депрессионное разрежение, включая естественную тягу; изменение плотности воздуха в результате теплообмена с крепью ствола; гидростатический разогрев. Модель включает в себя уравнение баланса энергии и уравнение состояния, использованные в [15]:

$$\frac{4\hat{\alpha}\Delta x}{\rho H\nu}(T_m - T) = c_v\Delta T - \frac{P}{\rho}\Delta\rho,$$

$$\rho = \frac{29P - 0.11\eta[479 + (11.52 + 1.62T)^2]}{8314(T + 273)},$$

$$P = P_0 + \rho gx - rxQ^2.$$

Здесь  $\hat{\alpha}$  — коэффициент теплоотдачи через стенку ствола, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $H$  — поперечный размер выработки, м;  $T_m$  — температура массива на данной глубине, °С;  $c_v$  — объемная теплоемкость воздуха, Дж/(м<sup>3</sup>·°С);  $\Delta T$ ,  $\Delta\rho$  — изменения температуры и плотности малого объема воздуха при перемещении вниз на величину  $\Delta x$ ;  $\nu$  — скорость воздуха в стволе, м/с;  $\eta$  — относительная влажность воздуха, %;  $P_0$  — абсолютное давление на дневной поверхности, Па;  $x$  — вертикальная координата ствола, отсчитываемая вниз от дневной поверхности, м;  $r$  — погонное аэродинамическое сопротивление, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>9</sup>.

Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 2, где кривые соответствуют различному набору учитываемых физических процессов. Точками отмечены параметры воздуха, определенные на основании экспериментальных исследований на стволе КС-2 в феврале 2016 г. (температура воздуха у устья ствола 10 °С, абсолютное давление на поверхности 99.4 кПа, расход воздуха по стволу 286 м<sup>3</sup>/с, относительная влажность 20 %).

Теоретические кривые абсолютного давления, плотности и температуры воздуха по глубине ствола имеют близкий к линейному вид при любом наборе учитываемых физических процессов (рис. 2). Максимальное отклонение плотности, обусловленное нелинейностью графиков плотности воздуха на километровом участке ствола, составляет 0.014 кг/м<sup>3</sup>, т. е. ~8 % от общего изменения плотности на рассматриваемом участке, максимальное отклонение абсолютного давления — 980 Па (8 % от общего перепада давления), а максимальное отклонение температуры — 1.4 °С (16 % от общего перепада температуры). Отклонения температуры от прямой линии наиболее существенны для кривой 5 по причине дополнительного влияния теплообмена с крепью ствола.

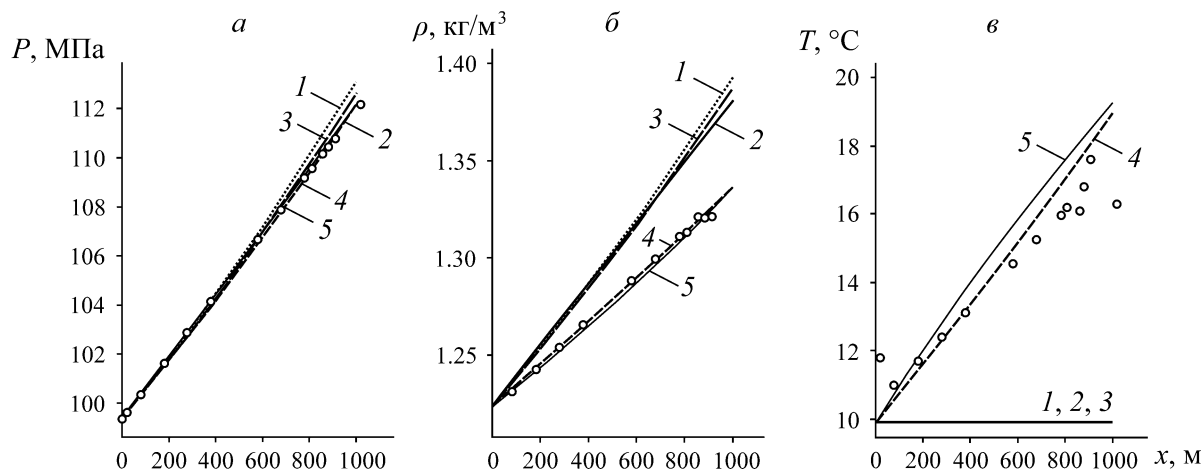


Рис. 2. Эпюры абсолютного давления (а), плотности (б) и температуры воздуха (в) по глубине ствола КС-2 с учетом следующих физических процессов: 1 —  $\rho = \text{const}$ ; 2 — гравитационного сжатия воздуха; 3 — гравитационного сжатия и депрессионного разрежения, включая естественную тягу; 4 — гравитационного сжатия, депрессионного разрежения и гидростатического разрежения и нагрева воздуха; 5 — всех вышеперечисленных факторов и теплообмена воздуха с крепью

Близость кривых абсолютного давления и плотности воздуха к прямым линиям связывается с тем, что основной вклад в изменение абсолютного давления и плотности воздуха с глубиной оказывают факторы, меняющиеся линейно по глубине ствола: рост давления и температуры вследствие веса вышележащего столба воздуха (равного  $\rho g x$  в расчете на  $1 \text{ м}^2$  сечения ствола), а также уменьшение давления за счет депрессионного разрежения (равного  $r x Q^2$ ).

На рис. 2а, б теоретические и экспериментальные значения давления и плотности находятся в хорошем соответствии друг с другом, на рис. 2в для температуры наблюдается рассогласование теоретических и экспериментальных данных — отклонения для отдельных высотных отметок ствола достигают  $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$  для прямых участков ствола и  $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$  для участков вблизи сопряжений. Такое рассогласование связывается с неучетом теплообмена с шахтными водами. Вблизи сопряжений ствола с каналами и горизонтами экспериментальные точки плотностей и температур воздуха отклоняются от линейной зависимости.

Экспериментальные кривые наиболее хорошо соотносятся с теоретическими кривыми 4, соответствующими случаю неучета теплообмена с крепью ствола. Это объясняется тем, что вследствие длительности процесса теплообмена шахтного воздуха с крепью ствола и окружающим породным массивом последние пришли в квазиравновесное тепловое состояние с воздухом, а тепловой поток от крепи к воздуху уменьшился за время эксплуатации ствола до значений, практически не влияющих на аэротермодинамические параметры воздуха [16].

Такие же исследования проведены и для других стволов рудника “Октябрьский”, в ходе которых получены аналогичные результаты, поэтому они не приводятся в настоящей статье.

#### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОГО ТИПА

Проведенный экспериментальный и теоретический анализ распределения аэротермодинамических параметров воздуха в различных стволах позволил предложить новый метод определения коэффициента аэродинамического сопротивления шахтных стволов по данным экспериментальных исследований. Он включает в себя следующие этапы.

1. *Определение границ участка ствола на основе трехмерного численного моделирования.* Здесь устанавливаются границы участка ствола, на котором необходимо проводить измерения. Разрабатывается трехмерная модель шахтного ствола от сопряжения “ствол – канал” или “ствол – горизонт” до ближайшей развилки (сопряжения). Модель отражает геометрию ствола (длина, площадь поперечного сечения), шероховатость от крепления (бетон, тубинги), тип армирования, наличие лестничного или трубного отделений. Граничными условиями на входе в модель задаются: расход воздуха, поступающего по стволу и через канал (горизонт); температура поступающих воздушных потоков. Далее, анализируя полученные результаты распределения давлений и температуры воздушных потоков, находятся граничные точки проведения измерений. Более подробно задача определения границ проведения измерений описана в [14].

2. *Планирование и проведение эксперимента.* Подготовка экспериментальных исследований включает в себя расчет требуемого количества измерений для измеряемых параметров, который выполняется путем решения обратной задачи математической статистики:

$$\frac{\sqrt{N_i - 1}}{t_p(N_i, p)} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\text{приб}}}$$

Здесь  $t_p(N_i, p)$  — коэффициент Стьюдента;  $p$  — требуемая надежность измерений;  $\varepsilon_i$  — погрешность измерений  $i$ -й физической величины;  $\varepsilon_{\text{приб}}$  — приборная погрешность измерения  $i$ -й физической величины [17]. В табл. 1 приведены результаты расчета количества измерений физических величин.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета требуемого числа измерений физических величин

Физическая величина	Погрешность прибора	Требуемая точность	Требуемая надежность измерений	Требуемое число измерений
Температура, °C	± 0.10	± 0.05	0.95	7
Относительная влажность, %	± 2	± 1		7
Длина/ширина, м	± 0.0015	± 0.01		3
Скорость, м/с	± 0.10	± 0.05		7

Выполнение измерений исследуемых аэро- и термодинамических параметров воздушного потока для расчета аэродинамического сопротивления стволов осуществляется в стволе (абсолютное давление, температура, относительная влажность) и в горных выработках, сопрягающихся с шахтным стволом (скорость воздуха, площадь поперечного сечения).

3. *Расчет коэффициента аэродинамического сопротивления исследуемых участков стволов.* Аэродинамическое сопротивление вычисляется по формулам (1) и (2). Приравнявая данные уравнения, можно выразить из них коэффициент аэродинамического сопротивления:

$$\alpha = \frac{[P_{\text{абс}(i-1)} - (P_{\text{абс}(i)} \pm \Delta P_{\text{атм}} - \rho_{\text{ср}} g \Delta l)] S^3}{\Pi \Delta l \left( \sum_{j=1}^n v_j S_j \right)^2} \tag{3}$$

Преимущества предложенного метода — обоснованное определение границ участка ствола на основе полученных данных экспериментальных исследований и трехмерного численного моделирования, а также обоснованная линейность зависимостей абсолютного давления и плотно-

сти воздуха от глубины ствола, позволяющая применять формулу (3), в которой используются значения абсолютных давлений, измеренных на границах участка ствола, а в качестве плотности берется средняя по участку ствола плотность, рассчитываемая как среднее арифметическое:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\rho_{i-1} + \rho_i}{2}.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод апробирован на практике. В качестве объекта исследований рассмотрены шахтные стволы рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Стволы отличаются по глубине, площади поперечного сечения, типу армирования, типу крепления, количеству подъемных сосудов. Экспериментальные измерения многократно проводились с 2011 по 2019 г. Рассчитанные коэффициенты аэродинамического сопротивления шахтных стволов представлены в табл. 2. Основное влияние на коэффициент аэродинамического сопротивления шахтных стволов оказывает количество подъемных сосудов, а также тип крепления и вид армирования. В [1 – 6] представлены стволы меньшего диаметра (4 – 6 м) и по оснащению не похожие на стволы Норильских рудников, в связи с этим сравнение коэффициентов аэродинамического сопротивления не проводилось.

ТАБЛИЦА 2. Классификация шахтных стволов Норильских рудников и экспериментальные значения коэффициентов аэродинамического сопротивления

Ствол	Вид армирования	Тип крепления	Количество подъемных сосудов, шт.	Коэффициент аэродинамического сопротивления, Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>
СС, СС-1, СС-2, СС-3, ВС-9, ВПС	Гибкая	Бетон	4	0.048 ± 0.0120
КС, КС-1, КС-2, КС-3, ВЗС-1, ВЗС, ВСС, ПЗС, ЗЗС, ЮЗВС	Жесткая	Бетон	2	0.024 ± 0.0060
ГС, ВС-1, ВС-2, ВС-3, ВС-4, ВС-5, ВС-6, ВС-7, СВС	Гибкая	Бетон, тубинги	2	0.027 ± 0.0067
ЮВС, ВСС-1	Жесткая	Тубинги	2	0.030 ± 0.0075

## ВЫВОДЫ

Проведены обширные экспериментальные измерения аэротермодинамических параметров воздуха в условиях шахтных стволов рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Получены зависимости абсолютного давления, температуры и плотности воздуха по глубине ствола КС-2. Выполнен анализ закономерностей изменения параметров воздуха по глубине ствола по разработанной модели аэротермодинамических процессов, протекающих в стволе КС-2. Теоретически обоснован линейный вид зависимостей абсолютного давления, температуры и плотности воздуха от глубины ствола. Установлено, что для условий ствола КС-2, эксплуатируемого более 40 лет, фактор теплообмена воздуха с крепью ствола не влияет на параметры воздуха. Полученные результаты позволили предложить новый метод определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов Норильских рудников и рассчитать их. Вычисленные коэффициенты аэродинамического сопротивления использованы при разработке математических моделей вентиляционных сетей рудников и проектировании проветривания новых участков рудников.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скочинский А. А., Ксенофонтова А. И., Харев А. А., Идельчик И. Е.** Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. — М.; Л.: Углетехиздат, 1953. — 363 с.
2. **Аэродинамическое сопротивление** горных выработок и тоннелей метрополитена / Ф. А. Абрамов, В. А. Долинский, И. Е. Идельчик и др. — М.: Недра, 1964. — 187 с.
3. **Мохирев Н. Н., Радько В. В.** Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. — М.: Недра, 2007. — 327 с.
4. **Левин Л. Ю., Семин М. А.** Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 120–130.
5. **Kempson W. J., Webber-Youngman R. C. W., and Meyer J. P.** Optimizing shaft pressure losses through computational fluid dynamics modelling, J. of the African Institute of Min. and Metal., 2013, Vol. 113. — P. 931–939.
6. **McPherson M. J.** The resistance to airflow of mine shafts, Trans. 3<sup>rd</sup> US Mine Ventilation Symp. Penn, 1987. — P. 465–477.
7. **Prosser B. S. and Wallace K. G.** Practical values of friction factors, Proc. of the 8<sup>th</sup> US Mine Ventilation Symp., 1999. — P. 691–696.
8. **Пат. RU 182775 U1.** Расстрел армировки шахтного ствола с подвижным защитным козырьком / А. И. Копытов, Ю. А. Масаев, В. Ю. Масаев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО “КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева”, № 2018113234; заявл. 11.04.2018 // Оpubл. в БИ. — 2018. — № 25. — 4 с.
9. **Прокопов А. Ю.** Обоснование технологических и конструктивных решений по армированию глубоких вертикальных стволов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новочеркасск: Южно-Российский ГТУ, 2009. — 39 с.
10. **Мальцев С. В.** Исследование факторов, влияющих на измерение аэродинамического сопротивления стволов глубоких рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2014. — Вып. 12. — С. 269–271.
11. **Скопинцева О. В., Ушаков К. З.** Регулирование шахтных вентиляционных сетей по фактору аэродинамического старения горных выработок // ГИАБ. — 1997. — № 3. — С. 142–147.
12. **Харев А. А.** Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. — М.: Углетехиздат, 1954. — 248 с.
13. **Богословский В. Н.** Отопление и вентиляция. Ч. II. — М.: Стройиздат, 1976. — 512 с.
14. **Казаков Б. П., Мальцев С. В., Семин М. А.** Обоснование участков измерения аэродинамических параметров воздушного потока при определении аэродинамического сопротивления стволов // ГИАБ. — 2015. — № S7. — С. 69–75.
15. **Шалимов А. В., Кормщиков Д. С., Газизуллин Р. Р., Семин М. А.** Моделирование динамики тепловых депрессий и ее влияния на проветривание горных выработок // Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2014. — № 12. — С. 41–47.
16. **Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В.** Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 154–161.
17. **Джонсон Н., Лион Ф.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке (методы планирования эксперимента). — М.: Мир, 1981. — 448 с.

*Поступила в редакцию 21/VIII 2020*

*После доработки 02/IX 2020*

*Принята к публикации 03/XI 2020*