

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

А.В. Шалимов, М.Д. Попов
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Проведён анализ факторов, определяющих потери депрессии на проветривание горных выработок. Показано, что аэродинамические сопротивления участков рудника подразделяются на три категории – линейные, лобовые и местные, обусловленные трением воздуха о стенки выработок, препятствиями на пути его движения и изгибами, сужением-расширением, слиянием-разделением воздушного потока в сопряжениях. Отмечено, что тепловые факторы фигурируют в вентиляционных расчётах исключительно в виде тепловых депрессий, эквивалентных источникам тяги в вертикальных и наклонных выработках с переменной температурой воздуха, в горизонтальных же выработках влияние источников выделения тепла на проветривание считается незначительным и в расчётах не учитывается. Сделана аналитическая оценка потерь энергии на проветривание выработки с источником выделения тепла по фактору увеличения скорости движения воздуха в результате его теплового расширения. Проведено численное моделирование движения воздуха в горизонтальной выработке с повышенной температурой пород за счёт действия заданного перепада давлений. На основании результатов аналитического и численного моделирования установлено, что увеличение аэродинамического сопротивления выработки с тепловыделением обусловлено двумя механизмами. Тепловое расширение воздуха с увеличением скорости его движения приводит к заметному росту падения депрессии при высоких перепадах температур, свойственных аварийным режимам проветривания, связанных с рудничными пожарами. Численно установлено также наличие резкого роста аэродинамического сопротивления выработки, более чем в 2 раза, в узком интервале низких перепадов температур, что связано с неустойчивостью границы раздела между двумя потоками воздуха разной скорости. По результатам проведённых исследований сделан вывод о необходимости учёта дополнительных потерь депрессии при проветривании выработок с источниками выделения тепла.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, коэффициент шероховатости, тепловая депрессия, конвекция, сдвиговое трение, диссипация энергии, вертикальная стратификация, устойчивость, приближение идеального газа.

Знание аэродинамических сопротивлений всех элементов вентиляционной сети рудника является необходимым условием для расчёта воздухораспределения с получением однозначных результатов. При подготовке расчётных данных эти сопротивления принято подразделять на три вида: сопротивление трения о стенки выработки; лобовые сопротивления различных препятствий на пути движения воздуха; местные сопротивления, вызванные изгибами и сужениями-расширениями выработки, а также слияниями-разделениями воздушных потоков в сопряжениях. Перечисленные факторы, определяющие величины потерь общешахтной депрессии на проветривание, подробно изучены и представлены в литературе по рудничной вентиляции в виде таблиц и эмпирических зависимостей, позволяющих вычислять аэродинамические сопротивления элементов различной геометрической конфигурации [1-5].

Тепловые факторы также оказывают влияние на распределение расходов воздуха по рудничной сети, тем более значительное, чем больший перепад температур имеет воздух в различных частях рудничного поля. Влияние это связывается исключительно с тепловыми депрессиями, возникающими в результате разных значений веса воздушных столбов в негоризонтальных выработках [6]. Поскольку сила тяжести направлена вниз, то при известном распределении плотностей воздуха все тепловые депрессии имеют определённые направления в независимости от направлений движения воздуха и моделируются эффективными источниками тяги. При разнице температур воздуха в стволах действует естественная тяга, которая может быть как положительной, так и отрицательной, в зависимости от совпадения или несовпадения с направлением проветрива-

ния главным вентилятором [7]. Локальные депрессии возникают в негоризонтальных выработках с выделением тепла в результате работы горного оборудования, окислительных процессов или горения. Следует заметить, что перепад температур воздуха по длине выработки приводит также к увеличению скорости его движения в результате теплового расширения, а также возникновению локальной конвекции внутри самой выработки, при которой более нагретый воздух поднимается вверх под кровлю, а менее нагретый опускается вниз на почву [8]. Процесс этот идёт также и в горизонтальных выработках, в которых тепловые депрессии не возникают [9]. Учитывая, что природа аэродинамического сопротивления заключается в диссипации энергии в результате сдвигового трения между движущимися слоями воздуха, разумно предположить, что тепловое расширение воздуха и локальная конвекция дают аналогичный эффект, и приводят к увеличению падения депрессии на выработке.

Для исключения влияния тепловых депрессий моделирование движения воздуха проводилось в горизонтальной выработке с заданным перепадом давлений. Нестационарный теплообмен нагреваемого по ходу движения воздуха с породным массивом в данном случае интереса не представляет, поэтому во избежание бессмысленного усложнения и трат вычислительных ресурсов источник выделения тепла задавался фиксированной температурой пород, т.е. граничным условием 1-го рода. Подобный способ моделирования реалистичен, например, для условий проветривания глубоких горизонтов с высокой температурой пород, нефтешахт с использованием горячего пара для разжижения нефти, а также горных выработок с выделением тепла в результате протекания окислительных процессов или эндогенных реакций горения в породном массиве. Чем выше температура массива при заданной температуре воздуха на входе в выработку, тем интенсивнее теплообмен, тем больший перепад температуры воздуха возникает между входящей и исходящей струями, и, значит, тем выше скорость движения воздуха в результате его теплового расширения.

Ожидаемым результатом являлось уменьшение массового расхода воздуха при увеличении температуры массива. Неочевидными представлялись количественные показатели для реальных значений перепадов температуры воздуха, соответствующих штатным и аварийным режимам проветривания. Тепловые изменения аэродинамических сопротивлений горных выработок предположительно могли оказаться как малыми, в пределах точности измерений, так и большими, оказывающими заметное влияние на воздухораспределение. В первом случае результат моделирования следовало бы считать отрицательным, т.е. это означало бы, что тепловые процессы на сопротивления выработок не влияют. Во втором случае вывод следовал бы обратный, и пренебрежение тепловым влиянием не депрессионного типа на воздухораспределение может привести к значительным ошибкам в вентиляционных расчётах.

Аналитическая оценка величины массового расхода воздуха в зависимости от горизонтального перепада его температур на входе и выходе из выработки может быть сделана в приближении идеального газа, в котором плотность газа меняется обратно пропорционально температуре [10]. Пусть на выработке длиной L , м при движении воздуха с объёмным расходом Q_0 , м³/с в условиях постоянной температуры T_0 , К происходит падение статического давления ΔP , Па. Аэродинамическое сопротивление выработки определяется в соответствии со следующей зависимостью

$$\Delta P = R_0 Q_0^2 = \frac{R_0}{\rho_0^2} Q_{m0}^2 = R_{m0} Q_{m0}^2, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность воздуха, кг/м³; Q_{m0} – массовый расход воздуха, кг/с; R_0 и R_{m0} – значения объёмного и массового аэродинамического сопротивления выработки, Па/(м³/с)² и

Па/(кг/с)². Индекс «0» означает принадлежность значений параметров к первому варианту с постоянной температурой воздуха $T_{a0}=T_0$, К. Если теперь в выработке есть источник выделения тепла, то по ходу движения x , м от 0 до L средняя по сечению температура воздуха $T_a(x)$, К будет возрастать от начальной T_{a0} до $T_{ak}>T_{a0}$, К, и (1) имеет вид

$$\Delta P = RQ_1^2 = \frac{R}{\rho_0^2} Q_m^2 = R_m Q_m^2, \quad (2)$$

где Q_1 – объёмный расход воздуха на входе в выработку, м³/с; Q_m – массовый расход воздуха, кг/с; R и R_m – значения объёмного и массового аэродинамического сопротивления выработки, Па/(м³/с)² и Па/(кг/с)². Отсутствие индекса «0» означает принадлежность значений параметров ко второму варианту с источником выделения тепла в выработке. Во втором варианте величина ΔP может быть определена также интегрально, суммированием падения давления на каждом участке выработки малой протяжённости с плотностью объёмного сопротивления на единицу длины выработки R_0/L

$$\Delta P = \frac{R_0}{L} \int_0^L Q^2(x) dx, \quad (3)$$

$Q(x)$ – объёмный расход воздуха по длине выработки от входа в выработку $x=0$ до выхода $x=L$, м³/с, $Q(0)=Q_1$. С учётом того, что в отсутствие утечек воздуха массовый расход Q_m не меняется по длине выработки, $Q(x)$ может быть выражен через него $Q(x)=Q_m/\rho(x)$, где $\rho(x) \leq \rho_0$ – переменная по длине средняя по сечению выработки плотность воздуха, кг/м³ ($\rho(0)=\rho_0$). После деления (2) на (3) в приближении идеального газа получается

$$\frac{R_m}{R_{m0}} = \int_0^L \frac{dx}{(\rho(x)/\rho_0)^2} = \int_0^L \frac{dx}{(T_{a0}/T_a(x))^2}. \quad (4)$$

Для проведения количественной оценки распределение температуры воздуха можно принять линейным по длине выработки $T_a(x) = T_{a0} + \frac{x}{L} \Delta T_a$, где $\Delta T_a = T_{ak} - T_{a0}$ – перепад температуры воздуха на входе и выходе из выработки, К, и после интегрирование (4) принимает вид

$$\frac{R_m}{R_{m0}} = 1 + \frac{\Delta T_a}{T_{a0}} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta T_a}{T_{a0}} \right)^2. \quad (5)$$

Очевидно, что зависимость (5) позволяет сделать оценку относительного увеличения массового аэродинамического сопротивления выработки только по фактору роста объёмного расхода воздуха по ходу его движения в результате теплового расширения. Для оценки вклада в R_m , связанного с образованием конвективных вихрей и вертикальной стратификации воздушного потока, требуется численное моделирование.

При проведении численного моделирования в программном комплексе Solidworks зависимости массового расхода воздуха Q_m , кг/с в горизонтальной горной выработке

круглого сечения от температуры породного массива T_m , °С были приняты следующие расчётные параметры: $L=70$ м, $D=4$ м – длина и диаметр выработки; $\Delta P=10$ Па – заданный перепад статических давлений, за счёт действия которого проветривается выработка; $T_{a0} = +20$ °С – температура воздуха на входе в выработку. Расчёт движения неоднородно нагретого воздуха по выработке в поле силы тяжести делался на основе двухпараметрической «к-ε» модели турбулентности. Перед расчётом была проведена калибровка модели подбором размера шероховатости стенок выработки k с целью подгонки её аэродинамического сопротивления к справочным данным для калийных рудников в случае отсутствия теплообменных процессов и возникающего в результате конвективного движения воздуха при $T_m=T_{a0}$. В соответствии с [1] величины аэродинамических сопротивлений горных выработок калийных рудников R , кг/м⁷ определяются по формуле

$$R = 0.098 \frac{kL}{S^{2.5}}, \quad (6)$$

где $S=(\pi D^2)/4$ – площадь сечения выработки, м²; k – коэффициент шероховатости, кг/м³, величина которого находится в пределах от 0,196 кг/м³ до 0,539 кг/м³ для разных типов выработок. В расчётную модель был заведён максимальный размер шероховатости, соответствующий по расчёту коэффициенту $k=0,428$ кг/м³. Более высокие значения k означают наличие препятствий, уменьшающих сечение выработки для прохода воздуха, например, $k=0,539$ кг/м³ соответствует выработке, оборудованной ленточным конвейером. Принятая величина k принципиального значения не имела, важно было лишь то, чтобы она оставалась постоянной в ходе расчёта с вариацией значений температуры массива.

В таблице приведены результаты численного моделирования зависимости массового расхода воздуха Q_m от разницы его температуры на входе и выходе из выработки $\Delta T=T_{a0}-T_a$, °С в результате теплообмена с породным массивом с варьируемым значением температуры T_m , где T_a – средняя по сечению температура воздуха на выходе из выработки, °С. В последнюю графу таблицы занесены результаты аналитического расчёта R_m/R_0 по формуле (5). Сравнительный анализ полученных результатов в табличном (таблица 1) и графическом видах (рис. 1) свидетельствует о том, что, как и предполагалось, в уменьшении массового расхода воздуха при нагреве участвуют два физических механизма – увеличение объёмного расхода воздуха в результате его теплового расширения и конвекция, приводящая к возникновению дополнительного сдвигового трения в результате вертикального расслоения воздушного потока по скорости.

Как следует из результатов численного моделирования, именно второй механизм даёт резкий рост величины аэродинамического сопротивления выработке, начиная с перепада температур ~10 градусов, и при 20 градусах возникает довольно высокий максимум, соответствующий увеличению массового расхода более, чем в 2 раза, затем до перепада в 50 градусов происходит снижение сопротивления. Далее сопротивление медленно растёт уже под действием первого механизма, что неплохо согласуется с результатами аналитического моделирования с ожидаемой разницей в том, что численный расчёт показывает нелинейность более высокой степени, чем аналитический в линейном приближении идеального газа.

Вариация значений перепада статического давления на выработке ΔP показала, что максимум R_m/R_{m0} сохраняется, имеет приблизительно одинаковую величину порядка 2,1÷2,3, перемещается в область более высоких температур при увеличении расхода, и в область более низких температур – при уменьшении (рис. 2).

Таблица 1

Результаты моделирования зависимости аэродинамического сопротивления горизонтальной горной выработки от разницы температур породного массива и воздуха (последняя строка – аналитическая оценка по формуле (5))

$T_m, \text{ }^\circ\text{C}$	20.0	45.0	57.5	63.8	70.0	76.3	82.5	95.0	120.0	170.0	220.0	270.0	320.0	420.0	720.0	1020.0	1320.0	1620.0
$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	0	6.4	9.5	11.1	13.0	15.0	16.9	20.1	26.3	34.3	45.7	54.3	62.2	78.9	123.6	162.4	199.7	224.6
$Q_m, \text{ кг/с}$	52.6	49.7	45.8	43.2	39.8	36.6	35.3	35.9	37.7	41.1	43.4	45.0	45.5	44.3	42.2	38.6	36.2	36.2
$R_m \cdot 10^{-3}, \text{ (кг}\cdot\text{м)}^{-1}$	3.61	4.05	4.77	5.36	6.31	7.47	8.03	7.76	7.04	5.92	5.31	4.94	4.83	4.90	5.10	5.62	6.71	7.63
R_m/R_{m0}	1	1.12	1.32	1.48	1.75	2.07	2.22	2.15	1.95	1.64	1.47	1.36	1.34	1.36	1.41	1.56	1.86	2.11
R_m/R_{m0}	1	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.09	1.12	1.16	1.20	1.23	1.29	1.48	1.66	1.84	1.96

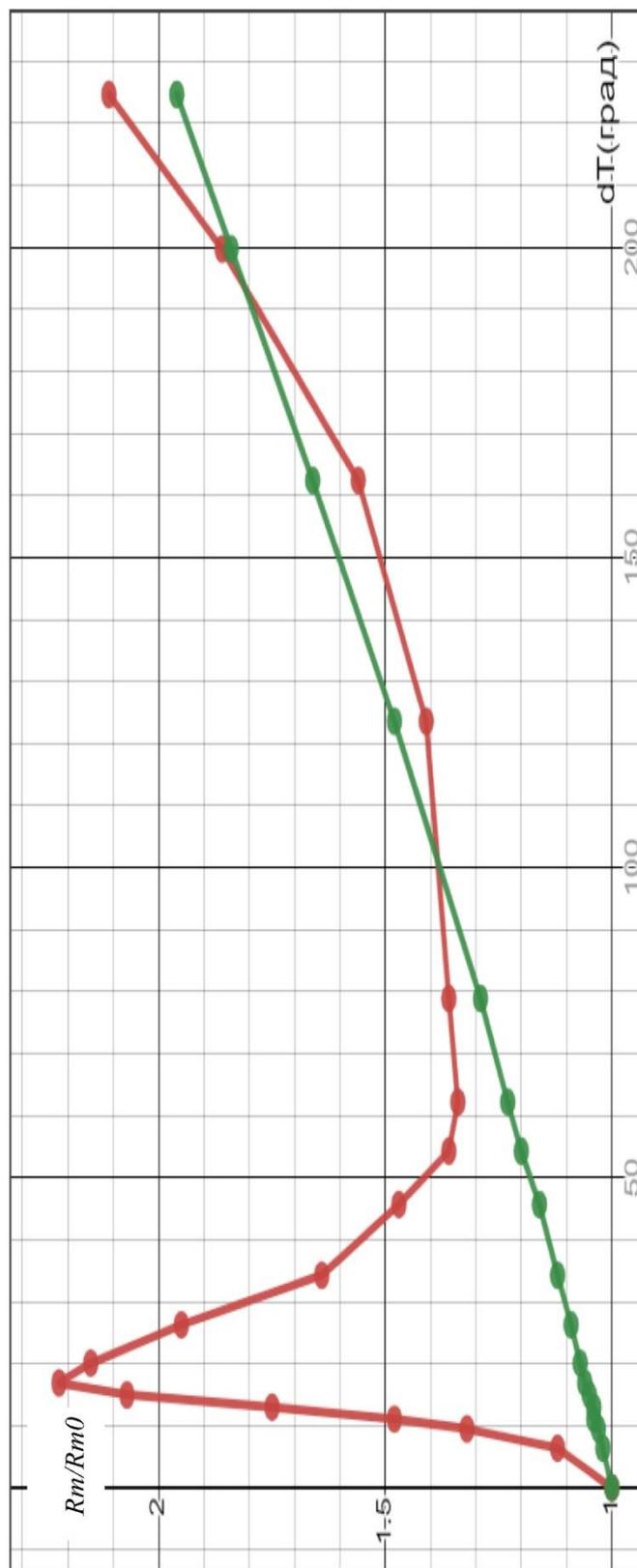


Рис. 1. Зависимость аэродинамического сопротивления горизонтальной горной выработки от разницы температур воздуха

Механизм возникновения этого максимума позволяет прояснить анализ распределения горизонтальной скорости воздуха по высоте в зависимости от перепада температур.

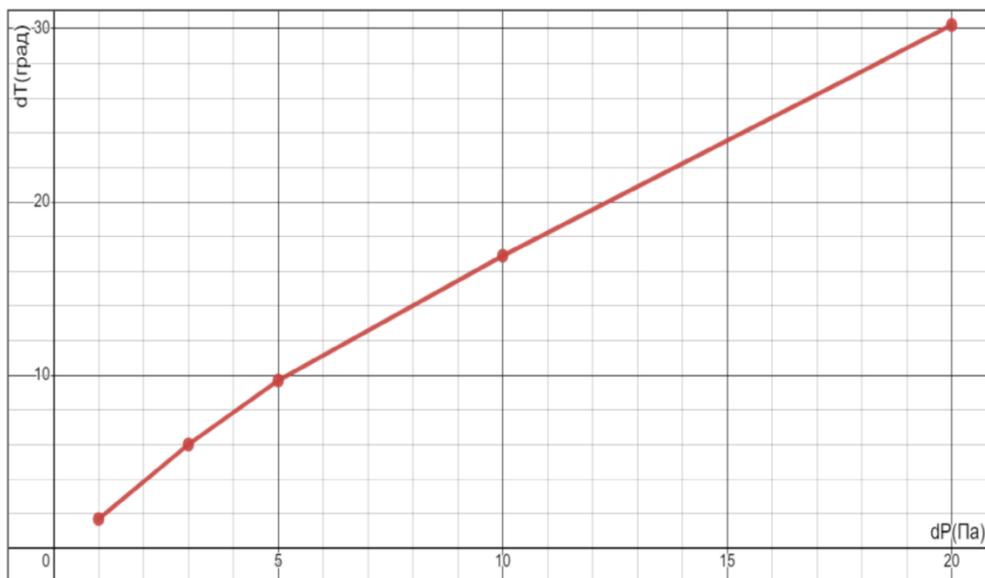


Рис. 2. Зависимость критического перепада температур ΔT , соответствующему максимуму $Rm/Rm0=2,1 \div 2,3$, от падения давления ΔP

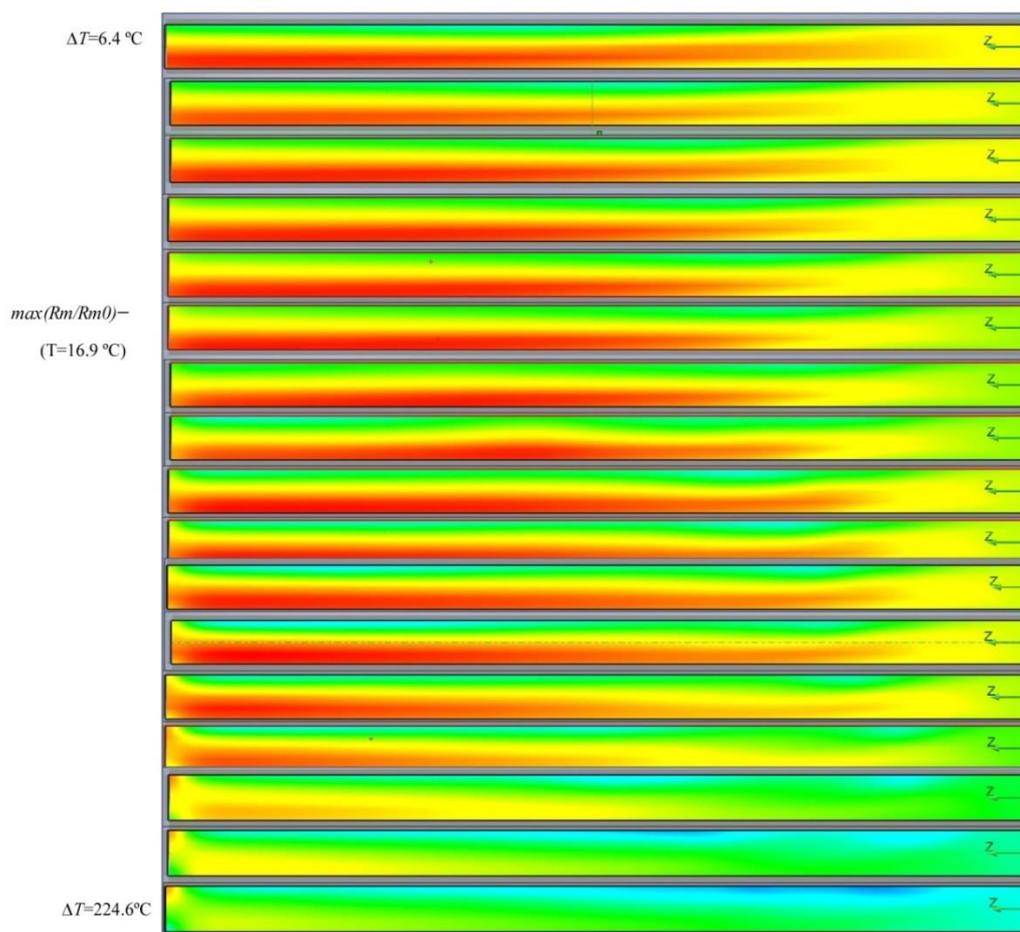


Рис. 3. Изменение распределения горизонтальной скорости движения воздуха по высоте выработки в зависимости от перепада температур ΔT (по возрастанию сверху вниз)

Из цветового представления результатов моделирования горизонтальной составляющей скорости движения воздуха по длине и сечению выработки следует (рис. 3), что вариант

максимального сопротивления соответствует максимальной толщине переходного слоя (жёлтый цвет) между быстрым потоком воздуха над почвой выработки и медленным, ослабленным адвекцией, потоком под кровлей. Каждый из вариантов расчёта на рис. 3 сверху-вниз соответствует столбцу таблицы 1 и точке на рис. 1, начиная со второй, в сторону увеличения горизонтального перепада температур воздуха ΔT по длине выработки от 6,4°C до 224,6°C.

Для наглядности ввиду большого перепада скоростей цветовой масштаб между вариантами не соблюден, что позволило судить о толщине переходной зоны между потоками воздуха разных скоростей над почвой и кровлей выработки. Поскольку диссипация энергии в результате сдвигового течения является причиной возникновения аэродинамического сопротивления, то толщина этой зоны определяет его величину. С увеличением перепада температур, начиная с нулевого, расслоение воздушного потока по высоте выработки начинает расти с ростом переходной зоны посередине. Однако растёт и устойчивость плотностной стратификации по высоте, и с некоторого момента широкая переходная зона перестаёт быть устойчивой и начинает истончаться, что приводит к последующему уменьшению потери энергии на трение между слоями и образованию максимума.

Выводы

По результатам проведённого моделирования зависимости аэродинамического сопротивления горизонтальной выработки от горизонтального перепада температуры воздуха можно сделать следующие выводы:

1. При возникновении рудничных аварий, связанных с пожарами и высокими температурами воздуха в горных выработках, их аэродинамические сопротивления возрастают. Оценка величины прироста может быть сделана по предложенной аналитической зависимости.

2. В штатных режимах проветривания выработок с источниками выделения тепла в узком температурном диапазоне возможно резкое увеличение аэродинамического сопротивления, более чем в 2 раза, что необходимо учитывать при расчётном прогнозе воздухораспределения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР: 122012000396-6)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение. – 1992. – 672 с.
2. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.: ил.
3. Харев А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. – М.: Углетехиздат – 1954. – 248 с.: ил.
4. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Расчет местных аэродинамических сопротивлений в моделях вентиляционных сетей шахт и рудников // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2018. – № 3. – С. 265-278.
5. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Стукалов В.А. Моделирование аэродинамических сопротивлений сопряжений горных выработок // Горн. журн. – 2009. – № 12. – С. 56-58.
6. Медведев Б.И. Тепловые основы вентиляции шахт при нормальных и аварийных режимах проветривания. – Киев, Донецк: Вища школа. – 1978. – 154 с.: ил.
7. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий: [учебник]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
8. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горн. журн. – 2014. – №12. – С. 105-109.
9. Шалимов А.В. Устойчивость адвективного движения воздуха в горизонтальных горных выработках с источниками выделения тепла // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 123-129. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.24.
10. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.