

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ШАХТАХ И РУДНИКАХ

Л. Ю. Левин, М. А. Семин

*Горный институт УрО РАН, E-mail: aerolog_lev@mail.ru,
ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Проведена классификация местных сопротивлений на воздухораспределение в зависимости от зон их проявления в шахтах и рудниках. Выделено три группы сопротивлений: сопряжения шахтных стволов с горизонтами и вентиляционными каналами, сопряжения выработок рудничных горизонтов вентиляционных трубопроводов в тупиковых горных выработках. Сделана оценка относительного вклада каждой группы местных сопротивлений в общую депрессию рудничных вентиляционных сетей в зависимости от геометрических и аэродинамических параметров горных выработок. Предложены критерии, позволяющие оценить относительную долю каждой группы местных сопротивлений в общерудничной депрессии. Для каждой из них определены расчетные методы, которыми целесообразно пользоваться при количественном анализе воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях при изменении режимов проветривания.

Рудничная вентиляция, местные сопротивления, сопряжения горных выработок, потери давления, воздухораспределение, вентиляционный трубопровод

DOI: 10.15372/FTPRPI20190214

В рудничных вентиляционных сетях выделяют несколько видов аэродинамических сопротивлений: сопротивление трения о стенки выработок, местные и лобовые сопротивления. К сопротивлениям трения относятся сопротивления на прямых участках горных выработок, обусловленные вязкостным трением вблизи шероховатых стенок. К местным относятся сопротивления, приуроченные к локальным участкам вентиляционной сети, на которых происходит изменение внешних границ воздушного потока (деформация потока): места разделения и слияния потоков, расширения, сужения и повороты потоков [1]. Как отдельный вид выделяются лобовые сопротивления, связанные с обтеканием различных препятствий, находящихся в горных выработках [1, 2]. Например, препятствиями для движения воздуха в стволе могут быть клеть и скип, а в горизонтальных выработках — самоходное оборудование, вагонетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30008).

Вопрос учета местных сопротивлений при движении воздушного потока по системе горных выработок является достаточно узким в рудничной вентиляции. Он важен лишь для некоторых участков вентиляционной сети, где имеются высокие скорости движения воздушного потока и происходит поворот, смешивание или разделение потоков: вентиляционные каналы главной вентиляторной установки (ГВУ) и их сопряжения со стволами, сопряжение горизонтов со стволами [3–6]. В случае, если данные участки вентиляционной сети хорошо спроектированы (наличие скруглений острых кромок на сопряжениях выработок, низкие внешние утечки через надшахтные здания, плавное расширение или сжатие потока), местные сопротивления на них не будут превышать 10% от общешахтной депрессии. В противном случае, когда параметры вентиляционного канала ГВУ подобраны неправильно или же канал оказался засорен в процессе эксплуатации, местные сопротивления могут достигать 30–40 % от общешахтной депрессии. Так, после проведения работ по герметизации надшахтного здания вентиляционного ствола № 4 на руднике БКПРУ-4 ПАО “Уралкалий” потери давления на местных сопротивлениях сопряжения этого ствола с вентиляционным каналом ГВУ снизились с 830 до 170 Па и составили 9 % от общей депрессии рудника (1880 Па). Снижение потерь давления на местных сопротивлениях произошло ввиду того, что для поддержания того же расхода воздуха в руднике за счет герметизации потребовалась меньшая производительность ГВУ.

Существует класс рудников, для которых существенным является учет не только местных сопротивлений сопряжений стволов с вентиляционными каналами и горизонтами, но и местных сопротивлений на сопряжениях выработок главных направлений, панелей, блоков и пр. К этому классу относятся рудники с большим поперечным сечением горных выработок (100 м² и более). Исследования закономерностей распределения воздуха на таких рудниках с учетом местных сопротивлений представлены в [7, 8]. Также местные сопротивления могут оказаться существенным фактором в случае движения воздуха по выработкам различного поперечного сечения, например по вентиляционным восстающим. В [9] рассмотрена проблема снижения местных сопротивлений при движении воздуха по тракту “подсечной горизонт – вентиляционный восстающий – добычной горизонт – вентиляционный восстающий – вентиляционный горизонт”.

Учет местных сопротивлений сопряжений горных выработок в моделях вентиляционных сетей важен в первую очередь при расчете изменений в режимах проветривания шахт и рудников. При изменении распределения расходов воздуха в выработках рудничной вентиляционной сети местные сопротивления на сопряжениях изменяются, так как зависят от соотношений расходов воздуха в выработках, граничащих с сопряжением. При этом сопротивление трения на прямых участках выработок остается постоянным. В силу данной особенности, учет местных сопротивлений в виде дополнительных констант, включенных в сопротивление трения и рассчитанных для исходного режима проветривания, может приводить к значительным погрешностям при определении расходов воздуха в выработках.

Отдельный вопрос — исследование местных сопротивлений вентиляционных трубопроводов при проветривании тупиковых выработок [10–12]. Местные сопротивления трубопроводов сложной формы, содержащих повороты сечения и изменения площади поперечного сечения, могут оказаться ключевым фактором, определяющим аэродинамическое сопротивление всего трубопровода и подбор вентилятора местного проветривания (ВМП). При расчете проветривания тупиковых забоев инженеры и исследователи пренебрегают влиянием местных сопротивлений в трубопроводах, что приводит к снижению фактических расходов воздуха, подаваемых в забой, по сравнению с их расчетными значениями, и дефициту воздуха в тупиковых забоях.

Исходя из изложенного, можно провести следующую классификацию местных сопротивлений в рудничных вентиляционных сетях в зависимости от места их проявления:

- сопряжения шахтных стволов с горизонтами и вентиляционными каналами;
- сопряжения выработок рудничных горизонтов;
- вентиляционные трубопроводы в тупиковых горных выработках и камерах.

Первоочередный вопрос состоит в том, какие из перечисленных трех групп местных сопротивлений следует учитывать при расчете воздухораспределения в том или ином руднике? Для этого необходимо выполнить оценку вклада каждой отмеченной группы местных сопротивлений в общее падение давления в исследуемом вентиляционном контуре: руднике, горизонте или вентиляционном трубопроводе. Также необходимо оценить влияние каждой группы местных сопротивлений на расходы воздуха в горных выработках рудника.

ОЦЕНКА ВКЛАДА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Рассмотрим относительный вклад местных сопротивлений на всех сопряжениях выработок рудничных горизонтов. Частично этот вопрос решался в [13], где разработан критерий, равный отношению суммарного местного сопротивления R_m к общему сопротивлению R_c всего воздушного тракта:

$$K_1 = \frac{R_m}{R_c} = \frac{R_m}{R_l + R_m} = \frac{P_m}{P_l + P_m}. \quad (1)$$

Принимается, что общее сопротивлению R_c равно сумме сопротивления трения R_l и местного сопротивления R_m . Лобовые сопротивления для простоты здесь не рассматриваются. Критерий также может быть записан в терминах суммарных потерь давления P_m и P_l на местных сопротивлениях и сопротивлении трению о стенки выработок соответственно.

В качестве идеализированного участка вентиляционной сети исследовались два параллельных штрека (воздухоподающий и вентиляционный), имеющие аэродинамические связи, через которые происходит переток воздуха со свежей на исходящую струю в количестве, равном половине от дошедшего расхода воздуха (рис. 1). Сопротивления трения на аэродинамических связях подобраны так, чтобы удовлетворить данному условию деления потока в равных пропорциях. Длина каждого из двух параллельных штреков принималась равной $L/2$, сечения всех выработок — S , а периметр — Π . Коэффициент аэродинамического сопротивления выработок равен α . Суммарный объемный расход воздуха, проходящий через участок вентиляционной сети, равен Q , плотность воздуха — ρ .

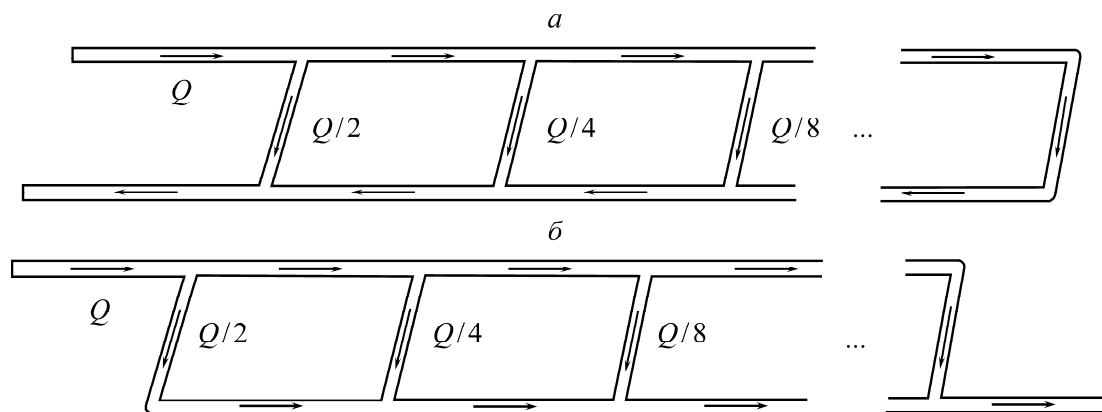


Рис. 1. Идеализированный участок рудничной вентиляционной сети: *a* — центральная схема проветривания; *б* — фланговая схема проветривания

Способ построения идеализированного участка вентиляционной сети не является единственным возможным. Для шахт с центральной схемой проветривания в качестве идеализированного участка может быть рассмотрена сеть на рис. 1а, а для шахт с фланговой схемой проветривания — сеть на рис. 1б. Также возможно усложнение геометрии аэродинамических связей, пропорций расходов воздуха у разделяющихся потоков на сопряжениях, однако в настоящей работе анализ проведен для упомянутого частного случая.

Просуммируем падения давления на сопротивления трения и на местных сопротивлениях по всей длине воздушного тракта. Для этого воспользуемся классической формулой для расчета аэродинамического сопротивления трения [1]:

$$R_l = \alpha \frac{\Pi L}{S^3}. \quad (2)$$

Для расчета местных сопротивлений использована формула

$$R_m = 4.1 \frac{\rho}{S^2}, \quad (3)$$

которая получена из более общей формулы расчета местных сопротивлений, предложенной в [14], посредством принятия допущений о прямом угле сопряжения выработок и равном распределении расходов между ответвлениями.

С учетом (2) и (3), критерий (1) можно записать в виде

$$K_1 = \frac{P_m}{P_l + P_m} = \frac{4.1 \frac{\rho}{S^2} Q^2}{\frac{\alpha \Pi L}{S^3} Q^2 + 4.1 \frac{\rho}{S^2} Q^2} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \Pi L}{4.1 \rho S}}. \quad (4)$$

Критерий (4) принимает значения от 0 до 1, что представляет собой долю местных сопротивлений по отношению к общему аэродинамическому сопротивлению рассматриваемого участка вентиляционной сети. На рис. 2 показаны изолинии критерия (4) в осях L и S для нескольких типовых вентиляционных сетей.

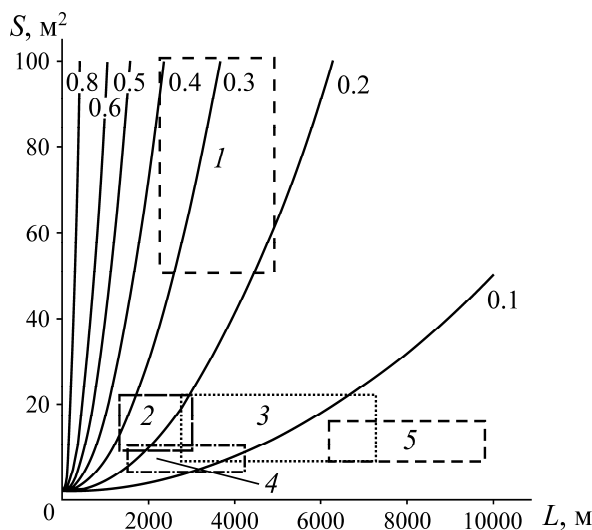


Рис. 2. Доля местных сопротивлений для разных типов рудников: 1 — гипсовые шахты ООО «Типс Кнауф Новомосковск»; 2 — алмазные рудники ПАО «АЛРОСА»; 3 — медно-никелевые рудники ПАО «ГМК «Норильский никель»; 4 — нефтяные шахты НШУ «Яреганефть»; 5 — калийные рудники ПАО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий»

Представлен случай выработок с круглым поперечным сечением ($\Pi = \sqrt{4\pi S}$) и коэффициентом аэродинамического сопротивления $\alpha = 0.007 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$. Плотность ρ принята равной $1.2 \text{ кг}/\text{м}^3$. Для некоторых шахт и рудников (гипсовые шахты ООО “Гипс Кнауф Новомосковск”, алмазные рудники ПАО “АЛРОСА” и частично медно-никелевые рудники ПАО “ГМК “Норильский никель”) доля местных сопротивлений велика и составляет более 20 % от общего падения давления на участке (рис. 2). При разработке математических моделей таких шахт и рудников следует проводить полный учет местных сопротивлений на всех сопряжениях горных выработок.

Рассмотрим относительный вклад местных сопротивлений сопряжения ствола с вентиляционным каналом ГВУ. Отметим, что непосредственно сопряжение ствола и вентиляционного канала не является единственным местом, где проявляются местные сопротивления. Падение давления происходит на местных сопротивлениях внутри самого канала: повороты потока, изменения поперечного сечения проточной области канала. Данные местные сопротивления не зависят от режима проветривания рудника, поэтому их влияние может быть корректно учтено посредством задания эквивалентного сопротивления трения о стенки вентиляционного канала.

В качестве критерия для оценки относительного вклада местных сопротивлений можно выбрать критерий, аналогичный (4):

$$K_2 = \frac{P_m}{P_{\text{ГВУ}}}, \quad (5)$$

где P_m — падение давления на местных сопротивлениях сопряжения ствола с вентиляционным каналом ГВУ, Па; $P_{\text{ГВУ}}$ — общая депрессия ГВУ, складывающаяся из потерь давления на сопротивлении трению и местных сопротивлениях, Па.

В случае действующих рудников оба параметра в (5) справа могут быть измерены в ходе проведения воздушно-депресссионной съемки. При рассмотрении проектируемых рудников местное сопротивление сопряжения P_m может быть оценено по формуле

$$P_m = R_m Q_{\text{ГВУ}}^2 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{S_{\text{кан}}^2} + \frac{(1-k)^2}{S_{\text{ств}}^2} \right) Q_{\text{ГВУ}}^2. \quad (6)$$

Здесь ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; $S_{\text{кан}}$ — площадь поперечного сечения вентиляционного канала ГВУ, м^2 ; $S_{\text{ств}}$ — площадь поперечного сечения ствола, м^2 ; k — коэффициент внешних утечек через надшахтное здание ствола; $Q_{\text{ГВУ}}$ — расход воздуха на ГВУ, $\text{м}^3/\text{с}$. Формула получена из более общей формулы расчета местных сопротивлений, предложенной в [14], посредством принятия допущения, что вентиляционный канал ГВУ соединяется со стволом под прямым углом. Коэффициент внешних утечек k через надшахтное здание ствола равен отношению расхода воздуха, поступающего из надшахтного здания, к расходу воздуха в вентиляционном канале ГВУ и принимает значения от 0 до 1 (рис. 3).

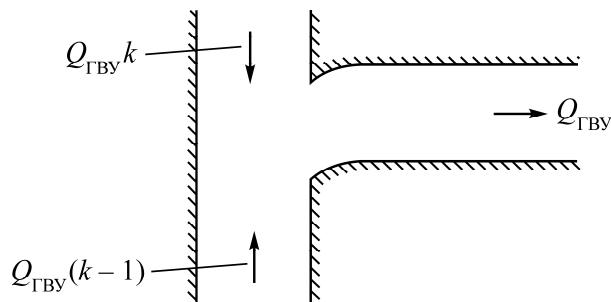


Рис. 3. Схема вентиляционного канала ГВУ

Если подставить (6) в (5) и принять, что депрессия ГВУ выражается через расход ГВУ по формуле $P_{ГВУ} = (R + R_m)Q_{ГВУ}^2$, то получим

$$K_2 = \frac{\frac{1}{S_{кан}^2} + \frac{(1-k)^2}{S_{ств}^2}}{\frac{2R}{\rho} + \frac{1}{S_{кан}^2} + \frac{(1-k)^2}{S_{ств}^2}}, \quad (7)$$

где R — сопротивление вентиляционной сети без учета местного сопротивления сопряжения ствола с вентиляционным каналом ГВУ, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$.

Из (7) следует, что при фиксированном расходе воздуха на ГВУ увеличение внешних утечек ведет к уменьшению критерия K_2 и, следовательно, относительной роли местных сопротивлений. Если зафиксировать расход воздуха в стволе $Q_{ств} = (1-k)Q_{ГВУ}$, то при увеличении внешних утечек значение критерия K_2 будет также увеличиваться, а относительная роль местных сопротивлений возрастет.

Если принять плотность воздуха равной 1.2 кг/м^3 , площадь поперечного сечения ствола — 38.5 м^2 , а внешние утечки — 0.2 , то критерий K можно представить на номограмме как функцию сопротивления вентиляционной сети и сечения вентиляционного канала ГВУ (рис. 4).

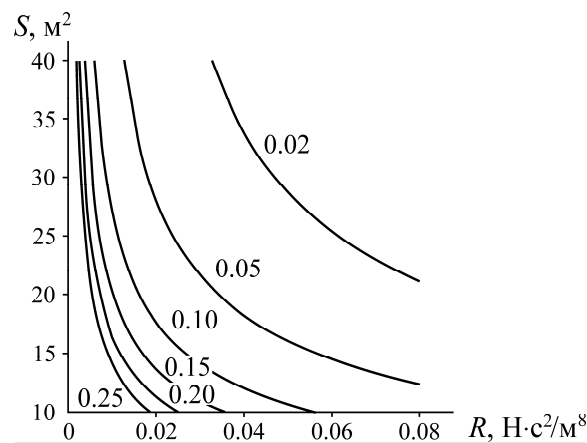


Рис. 4. Доля местных аэродинамических сопротивлений вентиляционного канала ГВУ как функция общего сопротивления вентиляционной сети и сечения вентиляционного канала

В (6) может быть добавлен дополнительный безразмерный множитель, учитывающий влияние шероховатости стенок горных выработок [14]:

$$\beta = 0.95 + 280\alpha, \quad (8)$$

где α — коэффициент аэродинамического сопротивления вентиляционного канала ГВУ, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Рассмотрим относительный вклад местных сопротивлений вентиляционного трубопровода, проведенного в тупиковой горной выработке (рис. 5). Оценка относительного вклада в данном случае может быть сделана по критерию типа (4):

$$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^N P_{mi}}{P_{ВМП}}. \quad (9)$$

Здесь P_{mi} — падение давления на местном сопротивлении № i , Па; N — общее количество местных сопротивлений (поворотов, изменений сечения) трубопровода; $P_{ВМП}$ — депрессия ВМП, Па.

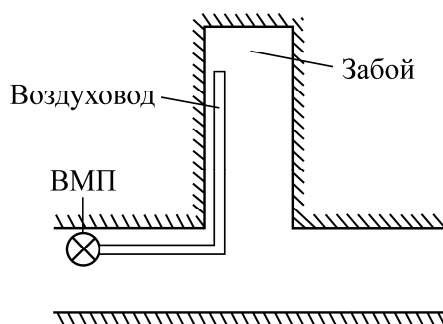


Рис. 5. Проветривание тупиковой выработки с помощью ВМП и вентиляционного трубопровода

Депрессия ВМП в (9) $P_{\text{ВМП}}$ может быть определена из экспериментально измеренной производительности ВМП и паспортной напорной характеристики ВМП или по проектным данным исходя из полного сопротивления вентиляционного трубопровода и требуемого расхода воздуха в тупиковой выработке. Падения давления на местных сопротивлениях P_{mi} сложно измерить экспериментально, поэтому их требуется оценить с использованием эмпирических формул, которые могут быть взяты из справочников [15, 16].

В случае поворота трубопровода круглого сечения на угол 90° при радиусе скругления $R = 0.5D - 1.0D$ падение давления на местном сопротивлении вычисляется по формуле

$$P_{\text{пов}} = 0.21 \left(\frac{R}{D} \right)^{-2.5} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (10)$$

где D — диаметр трубопровода, м; V — средняя скорость воздушного потока в поперечном сечении трубопровода, м/с.

В случае внезапного расширения воздушной струи при вытекании из трубопровода падение давления на местном сопротивлении составит

$$P_{\text{вр}} = \left(1 - \frac{S_{\text{тр}}^2}{S_{\text{выр}}^2} \right) \frac{\rho V^2}{2}. \quad (11)$$

Здесь $S_{\text{тр}}$ — поперечное сечение трубопровода, м^2 ; $S_{\text{выр}}$ — поперечное сечение выработки, м^2 .

Рассмотрим частный случай вентиляционного трубопровода с одним поворотом на 90° . Примем, что воздухопровод имеет диаметр 0.8 м (сечение 0.5 м^2). Сечение выработки при этом составляет 20 м^2 . Величина критерия K_3 равна

$$K_3 = \frac{P_m}{P_m + P_l} = \frac{0.81V^2}{0.81V^2 + 0.025LV^2} = \frac{1}{1 + 0.03L}, \quad (12)$$

L — суммарная длина вентиляционного трубопровода, м.

Из (12) следует, что при длинах трубопроводов менее 130 м критерий K_3 превышает 0.2, т. е. относительный вклад местных сопротивлений превышает 20 %. Пренебрежение местными сопротивлениями в данной ситуации приводит к завышенным расчетным расходам воздуха более чем на 10 %.

На рис. 6 показана зависимость критерия K_3 от длины вентиляционного трубопровода при различном количестве поворотов трубопровода под прямым углом. Диаметр трубопровода по-прежнему принимается равным 0.8 м, а сечение выработки — 20 м^2 . Видно, что при двух поворотах под прямым углом критерий K_3 начинает превышать 0.2 при длине трубопровода 220 м, а при трех поворотах — при длине 300 м.

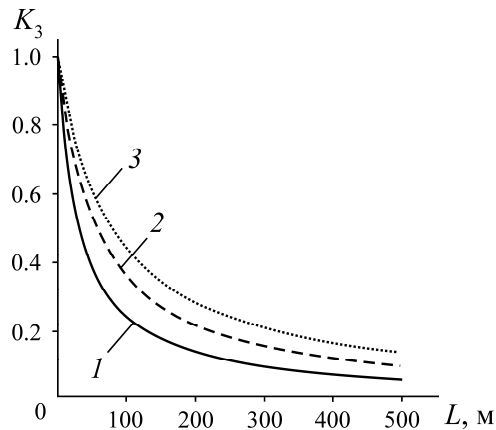


Рис. 6. Зависимость критерия от длины вентиляционного трубопровода при различном количестве поворотов трубопровода — одном (1), двух (2) и трех (3)

Подводя итог по всем трем рассмотренным видам местных сопротивлений, следует отметить, что учет каждого вида местных сопротивлений зависит от требуемой точности при решении вентиляционных задач. В случае, когда достаточно определять расходы воздуха с точностью до 15 % (что соответствует точности определения перепадов давления 30 %), предельные значения соответствующих критериев K_1 (4), K_2 (7) или K_3 (12) могут быть взяты равными 0.3.

Разработанные критерии K_1 , K_2 и K_3 могут использоваться лишь для качественной оценки, так как не учитывают специфические особенности схем проветривания рудников. Например, критерий K_1 в виде (4) не учитывает случай, когда свежая воздушная струя подается по нескольким параллельным штрекам, а утечки через вентиляционные сооружения имеют другие значения. Критерий K_2 предполагает, что угол сопряжения ствола с вентиляционным каналом равен 90° , а скругления кромок выработок на сопряжении существенно меньше характерного размера. В критерии K_3 нет учета утечек через трубопровод.

Сделанная качественная оценка нужна для того, чтобы решить, следует ли проводить учет того или иного местного сопротивления. После этого возникает следующий вопрос — как считать местные сопротивления?

МЕТОДЫ РАСЧЕТА МЕСТНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Количественный анализ местных сопротивлений должен проводиться в индивидуальном порядке посредством математического моделирования воздухораспределения в шахтах и рудниках. Расчет воздухораспределения в вентиляционных сетях обычно выполняется на основе решения системы уравнений Кирхгофа 1-го и 2-го рода:

$$\sum_{i \in V_j} Q_i = 0, \quad (13)$$

$$\sum_{i \in C_k} (R_i Q_i |Q_i| - H_i) = 0. \quad (14)$$

Здесь Q_i — расход воздуха в i -й ветви, $\text{м}^3/\text{с}$; R_i — сопротивление в i -й ветви, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$; H_i — падение давления в i -й ветви, Па; V_j — множество ветвей, граничащих с j -м узлом; C_k — множество ветвей, входящих в k -й контур.

Учет местных сопротивлений в рамках подхода (13), (14) обычно осуществляется одним из следующих методов: эквивалентных длин выработок; добавочных сопротивлений в ветвях; узловых сопротивлений [1, 7, 14, 17]. В рамках первого метода местные сопротивления прибавляются к сопротивлению трения выработок посредством задания эквивалентной длины выработки вместо ее физической длины. В рамках второго метода сопротивление в ветвях представляется в виде суммы сопротивления трения и местных сопротивлений, при этом местные сопротивления не записываются в терминах дополнительной длины выработки. Первый и второй методы являются эквивалентными. В рамках третьего метода местные сопротивления относятся непосредственно к узлам и рассчитываются для каждой пары выработок, одна из которых входит, а другая выходит из сопряжения. В этом случае уравнения Кирхгофа 2-го рода записываются так:

$$\sum_{i \in C_k} (R_i Q_i |Q_i| - H_i) + \sum_{j \in C_k} H_{jk}^* = 0,$$

H_{jk}^* — потери давления на местных сопротивлениях в j -м узле при движении по k -му контуру, Па.

Величина H_{jk}^* задается как аналитическая функция расходов воздуха и сечений в ветвях, граничащих с j -м узлом, например в виде, предложенном в [14]:

$$H_{jk}^* = -\beta_k \omega_k \sum_{i=1}^{N_{in}} \left| \frac{Q_i}{Q_\Sigma} \right| \frac{\rho(V_i - V_k)^2}{2} - \beta_k \omega_k \sum_{i=1}^{N_{in}} \left| \frac{Q_i}{Q_\Sigma} \right| \frac{\rho(V_j^2 - V_i^2)}{2} + \\ -\beta_k \omega_k \sum_{i=1}^{N_{in}} \frac{Q_i}{S_j} \rho(V_j - V_i) - 2\beta_k \omega_k \sum_{i=1}^{N_{in}} \rho V_i V_k \left| \frac{Q_i}{Q_\Sigma} \right| \sin^2 \left(\frac{\delta_{ik}}{2} \right).$$

Здесь Q_Σ — суммарный расход воздуха, проходящий через сопряжение выработок, м³/с; Q — расход воздуха, м³/с; V — скорость воздуха, м/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; δ_{ik} — угол поворота воздушного потока,двигающегося из выработки № i в выработку № k , град; β_k — множитель, характеризующий шероховатость стенок выработок; ω_k — коэффициент устойчивости; N_{in} — количество выработок, по которым воздух поступает в сопряжение; индексы i и j относятся к выработкам, входящим в сопряжение, индекс k — к выработкам, исходящим из сопряжения. Суммирование осуществляется по всем выработкам, входящим в сопряжение. Множитель β_k предлагается определять как функцию коэффициента аэродинамического сопротивления α_k исходящей ветви $\beta_k = 0.95 + 240\alpha_k$. Коэффициент устойчивости ω_k может быть принят равным единице в случае аналитических оценочных расчетов. При численном моделировании для улучшения сходимости в [14] он принят равным $\omega_k = 1.05 / (1 + 0.02Q_\Sigma / Q_k)$.

Первые два метода дают нефизичные результаты, если режим проветривания в руднике меняется по сравнению с исходным, для которого строилась математическая модель по данным воздушно-депресссионной съемки [13]. Для демонстрации этого можно рассмотреть вентиляционную сеть, представленную на рис. 7. Принимается, что физические и геометрические параметры всех выработок равны, два присутствующих на схеме тройника также имеют одинаковые свойства. Воздушный поток движется слева направо под действием некоторого источника тяги. Для этой сети классический подход расчета распределения расходов воздуха на базе системы уравнений Кирхгофа 1-го и 2-го рода (13), (14) дает равные расходы воздуха в параллельных ветвях № 2 и № 3. В действительности по ветви № 2 пойдет больше воздуха, чем по ветви № 3. Методы учета местных сопротивлений, описанные в [1, 2, 15, 18], показывают также равные расходы воздуха в ветвях № 2 и № 3. Подходы [14, 17] и расчет по формулам из гидравлики [16] дают правильный результат — расход в ветви № 2 больше, чем в ветви № 3.

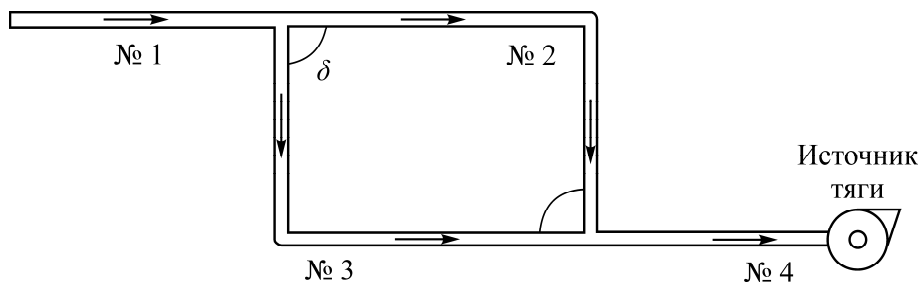


Рис. 7. Модельный участок вентиляционной сети, демонстрирующий влияние местных аэродинамических сопротивлений

При реверсировании вентилятора распределение расходов воздуха в параллельных ветвях № 2 и № 3 должно измениться — по ветви № 3 пойдет теперь больше воздуха. Подходы [16, 17] требуют изменения исходной математической модели и пересчета местных сопротивлений выработок или эквивалентных длин выработок для новых направлений расходов. Если этого не сделать, то расход воздуха в ветви № 2 останется больше, чем в ветви № 3. При расчете в рамках метода узловых давлений делать изменение исходной математической модели и пересчитывать местные сопротивления в узлах не требуется [14]. Получаемые расходы воздуха в реверсивном режиме проветривания корректны: по ветви № 3 идет больше воздуха, чем по ветви № 2.

Таким образом, метод узловых сопротивлений является наиболее удобным при решении сетевых задач воздухораспределения с учетом местных сопротивлений всех выработок в руднике или отдельных горизонтах.

Расчет местных сопротивлений сопряжения шахтного ствола с вентиляционным каналом ГВУ, калориферным каналом или горизонтами целесообразно выполнять с использованием методов вычислительной динамики жидкости и газа, поскольку есть возможность учесть все важные детали геометрии сопряжения: угол скругления острых кромок, углы поворота, влияние армировки ствола, различных засоров в канале и пр. [14, 19]. Местные сопротивления вентиляционных трубопроводов могут рассчитываться с помощью справочных коэффициентов и формул. В существующих справочниках [16] содержится большой объем эмпирических данных о величинах потерь давления при преодолении потоком различных препятствий. Следует учитывать, что на практике вентиляционные трубопроводы могут иметь существенные утечки воздуха по своей длине, что, как правило, не принимается в расчет в справочных коэффициентах и формулах.

ВЫВОДЫ

Проведена классификация местных сопротивлений. Выделены три группы сопротивлений (сопряжений шахтных стволов с горизонтами и с вентиляционными каналами; сопряжений выработок рудничных горизонтов; вентиляционных трубопроводов в тупиковых горных выработках и камерах) и для каждой получен критерий, позволяющий оценить относительную долю, которую составляет эта группа местных сопротивлений в общерудничной депрессии. Учитывать каждый вид местных сопротивлений рекомендуется, когда значение данного критерия превышает 0.2. В противном случае пренебрежение местными сопротивлениями может привести к несоответствию фактических и расчетных расходов воздуха на 10 % и более. Для каждой группы местных сопротивлений определены расчетные методы, которыми целесообразно пользоваться при количественном анализе воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях при изменении режимов проветривания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохирев Н. Н., Радько В. В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. — М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2007. — 324 с.
2. Скочинский А. А., Комаров В. Б. Рудничная вентиляция. — М.: Углетехиздат, 1949. — 444 с.
3. Alymenko N. I. Aerodynamic parameters of ventilating passages joined-up with the main mine fan, J. of Min. Sci., 2011, Vol. 47, No. 6. — P. 814–823.
4. Gou Y., Shi X., Zhou J., Qiu X., and Chen X. Characterization and effects of the shock losses in a parallel fan station in the underground mine, Energies, 2017, Vol. 10, No. 6. — 785 p.
5. Purushotham T., Sastry B. S., and Samanta B. Estimation of shock loss factors at shaft bottom junction using computational fluid dynamics and scale model studies, CIM J., 2010, Vol. 1, No. 2. — P. 130–139.
6. Deen J. B. Field verification of shaft resistance equations, Proc. of the US Mine Ventilation Symp., 1991. — P. 647–655.
7. Веденеева Л. М. Исследование аэродинамических процессов в местных сопротивлениях и их влияния на воздухораспределение в вентиляционных сетях с большим эквивалентным отверстием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 1995. — 17 с.
8. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Левин Л. Ю. Проветривание выработок большого сечения с помощью вентиляторных установок, работающих без переключки // Науки о Земле. — 2010. — № 2. — С. 89–97.
9. Hurtado J. P., Díaz N., Acuña E. I., and Fernández J. Shock losses characterization of ventilation circuits for block caving production levels, Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, Vol. 41, No. 1. — P. 88–94.
10. Кобылкин С. С., Каледин О. С., Дядин С. А., Кобылкин А. С. Оценка влияния местных сопротивлений на общее аэродинамическое сопротивление воздухопроводов // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование. — 2015. — С. 91–92.
11. Kratz A. P. and Fellows J. R. Pressure losses resulting from changes in cross-sectional area in air ducts, University of Illinois Bulletin, 1938, Vol. 35, No. 52. — P. 3–60.
12. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Варсегова Е. В. К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщ. 3 // Изв. вузов. Строительство. — 2016. — № 6. — С. 58–65.
13. Левин Л. Ю., Семин М. А., Клюкин Ю. А. Расчет местных аэродинамических сопротивлений в моделях вентиляционных сетей шахт и рудников // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2018. — № 3. — С. 265–278.
14. Семин М. А. Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2016. — 151 с.
15. Харев А. А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. — М.: Углетехиздат, 1954. — 248 с.
16. Idel’chik I. E. Handbook of hydraulic resistance, CRC Press, 1994. — 790 p.
17. McPherson M. J. Subsurface ventilation and environmental engineering, London, Chapman and Hall, 1993. — 904 p.
18. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Стукалов В. А. Моделирование аэродинамических сопротивлений сопряжений горных выработок // Горн. журн. — 2009. — № 12. — С. 56–58.
19. Левин Л. Ю., Семин М. А., Клюкин Ю. А., Киряков А. С. Обоснование скорости движения воздуха в вентиляционных каналах // Горн. журн. — 2016. — № 3. — С. 68–72.

Поступила в редакцию 20/II 2019

После доработки 26/III 2019

Принята к публикации 26/III 2019