

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.411.332 (574.31)

Ж. Г. Левицкий, Ж. К. Аманжолов, А. Д. Нургалиева

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА

В организации вентиляции современных шахт и рудников широкое применение находят вентиляторы местного проветривания (ВМП). С их помощью обеспечивается подача воздуха в тупиковые выработки при строительстве шахт, при подготовке новых горизонтов, при проведении отдельных подготовительных выработок или используются для увеличения подачи воздуха по отдельным направлениям.

Работа подземного вентилятора может осуществляться через перемычку или без нее. Основным недостатком, усложняющим использование первого способа регулирования, является сооружение обводного канала и установка шлюза для прохода транспорта и людей и уменьшения рециркуляции в зоне работы подземного вентилятора.

Этого недостатка практически лишены активные регуляторы, работающие без перемычки, в качестве которых могут использоваться вентиляторы местного проветривания или иные, небольшие по габаритам, источники тяги. При установке их в подземных выработках они могут работать в качестве положительных регуляторов, если выте-

нергии ВМП, то появляющаяся в этом случае дополнительная величина разрежения будет способствовать увеличению некоторого количества воздуха, поступающего в данную выработку.

Участок 2 – зона влияния выработки с воздухопроводом. На участке, где проложен трубопровод, происходит разделение воздушного потока. Часть воздуха перемещается по трубопроводу за счет энергии ВМП, оставшаяся часть течет мимо под действием общешахтной депрессии. Очевидно, величина энергии главного вентилятора, тормозимая на преодоление сил трения при перемещении воздуха на этом участке выработки, будет меньше при условии работы ВМП, и эти изменения будут тем больше, чем больше аэродинамическое сопротивление участка выработки с воздухопроводом и выше производительность ВМП.

Участок 3 – зона влияния, вытекающей из трубопровода, а при отсутствии его из вентилятора струи воздуха. Данный участок характерен только для схемы рис. 1, а. Поступающий в трубопровод воздух выбрасывается затем с большой скоростью по направлению общего потока. Выте-



Рис. 1. Схемы установки ВМП

кающая из вентилятора струя совпадает с общим направлением потока, а в не газовых шахтах – как отрицательные регуляторы при встречном взаимодействии струй.

Если проанализировать схемы установки ВМП в выработках, работающих по нагнетательной схеме проветривания (рис. 1), то можно выделить три зоны, влияющие в определенной степени на аэродинамику воздушного потока.

Участок 1 – зона влияния всаса вентилятора. В этой зоне, с одной стороны, происходит взаимодействие потока воздуха в выработке со стоком на всасе вентилятора, с другой – по мере приближения воздушного потока к всасу вентилятора скорость его движения увеличивается. Увеличение скорости вызывает уменьшение статического давления. Так как эти изменения происходят за счет

кающей струя обладает значительным запасом кинетической энергии, которая передается окружающему потоку. Поскольку струя распространяется в ограниченном пространстве, то это приводит к изменению статической составляющей давления и возникновению эжекционного эффекта с последующим увеличением поступления воздуха в выработку. Исследованиями установлено [1], что депрессия, развиваемая активным источником тяги, определяется по формуле:

$$h_a = \frac{\rho}{2} \left[\pm 2v_e^2 \frac{S_e}{S} - (1,06 - 94\alpha)(v_1^2 - v_2^2) \right], \quad (1)$$

где h_a – депрессия, создаваемая в выработке активным потоком на выходе из вентилятора, Па;

v_e – средняя скорость потока воздуха на вы-

ходе из вентилятора, m/c ;

$v_1 = q/S$ – средняя скорость потока воздуха в выработке, m/c ;

$v_2 = (q - q_e)/S$ – средняя скорость потока воздуха за вычетом расхода воздуха q_e через вентилятор, m/c ;

S – поперечное сечение выработки в месте установки вентилятора, m^2 ;

S_e – поперечное сечение выходного отверстия вентилятора, m^2 ;

ρ – плотность воздуха, kg/m^3 ;

α – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки, $Pa \cdot c^2/m^2$.

Величина приращения воздуха Δq в ветви с работающим активным регулятором может быть найдена, исходя из следующих условий.

Потеря напора в ветви с работающим вентилятором составит величину, равную:

$$H = Rq^2 \pm |h_e|, \quad (2)$$

где q – расход воздуха в выработке на момент включения вентилятора в работу, m^3/c ;

R – аэродинамическое сопротивление выработки с вентилятором, $Pa \cdot c^2/m^6$.

С другой стороны, депрессия выработки может быть выражена через приращение воздуха, т.е.:

$$H = R(q + \Delta q)^2. \quad (3)$$

Решая совместно (2) и (3) относительно Δq , получим:

$$\Delta q = q \left(\sqrt{1 \pm \frac{|h_e|}{Rq^2}} - 1 \right). \quad (4)$$

С учетом найденной поправки новый расход воздуха для искомой выработки находится из выражения $q^* = q + \Delta q$.

Знак «+» в формулах (1) и (4) следует брать при спутном взаимодействии потоков, знак «–» – для встречного взаимодействия струй.

Из выражения (4) следует, что при спутном взаимодействии потоков воздуха и выполнении условия

$$\frac{|h_e|}{Rq^2} \geq 3 \quad (5)$$

количество поступающего воздуха в регулиру-

ющую ветвь увеличивается в два раза, что может явиться причиной опрокидывания вентиляционных струй в параллельных или диагональных соединениях. При встречном взаимодействии потоков выполнение условия

$$\frac{|h_e|}{Rq^2} \leq 1 \quad (6)$$

приводит к тому, что в ветви с работающим вентилятором происходит опрокидывание вентиляционной струи. Экспериментальные исследования подтвердили правильность данного соотношения. На графике рис. 2 в этом случае наблюдается значительный разброс точек около теоретической кривой.

Следует отметить, что использование активных регуляторов при встречном взаимодействии струй может быть весьма полезным при блокировании поступления холодных масс воздуха или иных вредностей через штолни в случае комбинированной отработки рудных месторождений открытым и подземным способом.

В зоне работы ВМП происходит взаимодействие двух течений – стока на всасе вентилятора с потоком воздуха в выработке. По аналогии со стоком воздух на всас вентилятора поступает со всех сторон. Струя, которая движется справа налево (рис. 3), будет встречать противоположно направленную струю набегающего потока. Так как скорость в поступающем потоке постоянная по величине и направлению в любом его сечении, а скорость в поле стока убывает по мере удаления от центра стока, то справа от него должна существовать зона, в которой эти скорости равны по абсолютной величине, но противоположны по направлению. Следовательно, результирующий поток в этой зоне будет иметь скорость, равную нулю, то есть за всасом вентилятора происходит торможение воздушного потока с последующим движением его к всасу вентилятора.

Если принять скорость движения воздушного потока равномерной во всей плоскости и рассматривать всасывающее отверстие вентилятора как сток, то картина течения может быть описана с помощью функций комплексного переменного.

Пусть в полосе шириной a движется поток воздуха со скоростью v (рис. 4, a). Принимая всасывающее отверстие вентилятора за сток, помес-

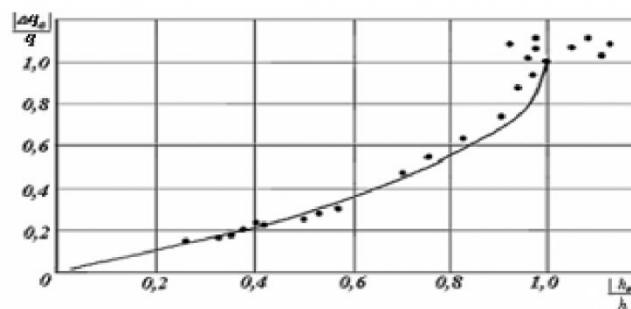


Рис. 2. Зависимость изменения расходов воздуха в относительных координатах при встречном взаимодействии струй

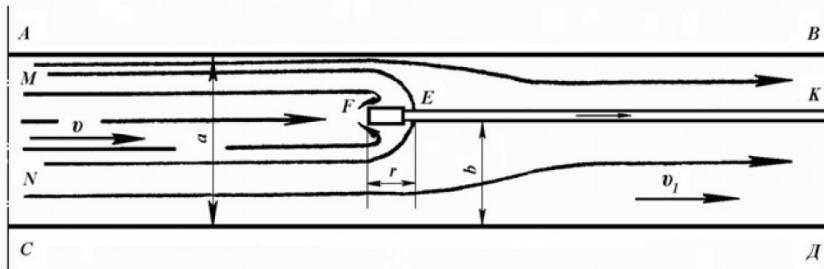


Рис. 3. Схема воздушного потока в выработке с ВМП

тим его в точке 0 на удалении b от границы. Прием начали координат в точке установки ВМП и проведем ось x по направлению движения потока. Для определения комплексного потенциала течения в рассматриваемой области воспользуемся следующей последовательностью конформных отображений.

Применим к потоку в полосе на плоскости z преобразование параллельного переноса $\eta = z + ib$. Получим на плоскости η полосу $0 < Jm \eta < a$ (рис. 4, б).

Используя функцию вида

$$\xi = e^{\frac{\eta - \pi}{a}},$$

преобразуем полосу шириной a на плоскости η в полуплоскость $Jm \xi > 0$ (рис. 4, в).

Остается верхнюю полуплоскость ξ отобразить в плоскость t . Это достигается преобразованием $t = \xi^2$. Данная функция отображает верхнюю полуплоскость $Jm \xi > 0$ в плоскость t с разрезом вдоль действительной оси $Re t > 0$ (рис. 4, д).

Учитывая последовательность конформных отображений, получим следующий ряд равенств:

$$t = \xi^2 = e^{2\eta \frac{\pi}{a}} = e^{2(z+ib)\frac{\pi}{a}} = e^{2z\frac{\pi}{a}} \cdot e^{i2\pi\frac{b}{a}}.$$

Так как

$$e^{i2\pi\frac{b}{a}} = [e^0 (\cos 2\pi + i \sin 2\pi)]^{\frac{b}{a}} = 1,$$

то

$$t = e^{2z\frac{\pi}{a}}. \quad (7)$$

Комплексный потенциал рассматриваемого течения в плоскости t будет равен алгебраической сумме комплексных потенциалов потока и стока, т.е.:

$$W = \nu^* t - \frac{q_s}{2\pi} \ln(t - t_0). \quad (8)$$

При заданном расходе воздуха необходимо, чтобы $\nu \cdot a = 2\pi\nu^*$. Откуда следует:

$$\nu^* = \frac{a}{2\pi}\nu. \quad (9)$$

Точка t_0 в выражении (2) должна соответствовать месту установки ВМП, то есть точке расположения стока в плоскости z . Из (1) следует, что точка $z = 0$ переходит в точку $t_0 = 1$. Тогда выражение (8) с учетом (7) и (9) примет вид:

$$W = \nu \frac{a}{2\pi} e^{2z\frac{\pi}{a}} - \frac{q_s}{2\pi} \ln \left(e^{2z\frac{\pi}{a}} - 1 \right). \quad (10)$$

Если взять первую производную от выражения (10) по изменяющемуся аргументу z , то получим комплексную скорость:

$$\frac{dW}{dz} = \nu e^{2z\frac{\pi}{a}} - \frac{q_s}{a} \cdot \frac{e^{2z\frac{\pi}{a}}}{e^{2z\frac{\pi}{a}} - 1}. \quad (11)$$

В точке торможения потока $\frac{dW}{dz} = 0$. Из (5)

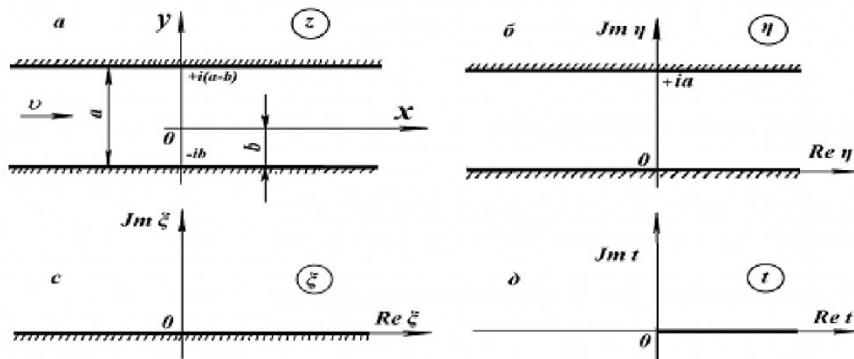


Рис. 4. Последовательность конформных отображений

следует, что производная будет равна нулю при условии:

$$v e^{2z \frac{\pi}{a}} - v - \frac{q_e}{a} = 0.$$

Так как $z = x + iy$, то полученное выражение можно представить в следующем виде:

$$v e^{2\pi \frac{x}{a}} \left(\cos 2\pi \frac{y}{a} + i \sin 2\pi \frac{y}{a} \right) - \left(\frac{q_e}{a} + v \right) = 0. \quad (12)$$

Из равенства (12) вытекает следующая система уравнений:

$$\begin{cases} v e^{2\pi \frac{x}{a}} \cos 2\pi \frac{y}{a} - \left(\frac{q_e}{a} + v \right) = 0; \\ v e^{2\pi \frac{x}{a}} \sin 2\pi \frac{y}{a} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

В данном случае расход воздуха через вентилятор следует рассматривать как плоский сток:

$$q_e = v_e \cdot l, \quad (14)$$

где v_e – средняя скорость потока на входе в вентилятор, м/с; l – длина стороны всасывающего отверстия, м.

Параметр l для всаса круглой формы можно определить, если заменить площадь круга эквивалентной площадью квадратного сечения, т.е. $l^2 = \pi R^2$. Отсюда находим, что $l = 1,77R$, где R – радиус всаса вентилятора.

Следовательно:

$$q_e = 1,77 \cdot R \cdot v_e \quad (15)$$

Из множества значений y , удовлетворяющих второму уравнению системы (13), рассматриваемому случаю отвечает значение $y = 0$, то есть точка, в которой расположен всас вентилятора. Учитывая это и имея в виду (15), из первого уравнения системы находим расстояние $x = r$ до точки, в которой скорость равна нулю:

$$r = \frac{a}{2\pi} \ln \left(1,77 \frac{R \cdot v_e}{a \cdot v} + 1 \right), \quad (16)$$

где a – характерный размер сечения выработки в месте установки ВМП, соответствующий гидравлическому диаметру поперечного сечения, м. Для выработок произвольной формы параметр $a = 4S/\Pi$, где Π – периметр поперечного сечения выработки.

Общий анализ полученных выражений показывает, что при подходе к вентилятору скорость движения воздуха в поперечном сечении должна изменять как свою величину, так и направление. На нейтральной линии тока MEN (рис. 3) скорость изменяется от величины v до нуля в критической точке E . На границе EF скорость увеличивается от нуля до заданной скорости v_e на всасе вентилятора, при этом ее направление меняется на противоположное. На границе EK скорость воздуха возрастает от нуля до v_1 и ее направление совпадает с общим направлением движения потока.

В первой зоне наблюдается увеличение скорости воздушной струи перед всасывающим отверстием вентилятора, область влияния которого оказывается на расстоянии до $(5 - 6) \cdot R$.

Эффективность и безопасность вентиляции подготовительных забоев при нагнетательной схеме проветривания в значительной степени зависит от отсутствия рециркуляции воздуха в зоне работы ВМП. Для предупреждения рециркуляции действующие Правила безопасности предусматривают выполнение двух условий: во-первых, вентилятор следует устанавливать не ближе 10 м от устья тупиковой выработки и, во-вторых, его производительность должна быть не более 70 % от общего количества воздуха, подаваемого к его всасу за счет общешахтной депрессии.

Как показывает практика, выполнение этих правил не гарантирует отсутствия рециркуляционных потоков. Последние, как правило, образуются за вентилятором практически во всех случаях, а при малых скоростях движения воздушного потока область их действия может распространяться на весь участок между вентилятором и устьем тупиковой выработки.

Существенное значение для безопасности проветривания имеет ширина второй зоны, так как от нее зависит размер препятствия, которое обтекает, проходящий мимо вентилятора, воздушный поток. Из рис. 5 видно, что сечение зоны торможения движения воздуха в плоскости всасывающего отверстия вентилятора может быть равно полной или усеченной площади круга с радиусом y_0 . Так как весь воздух, заключенный внутри области ABC , поступает на всас вентилятора местного проветривания, то величина y_0 может быть найдена из условия пересечения граничной контурной линии ABC с осью y .

Для определения y_0 воспользуемся выражени-

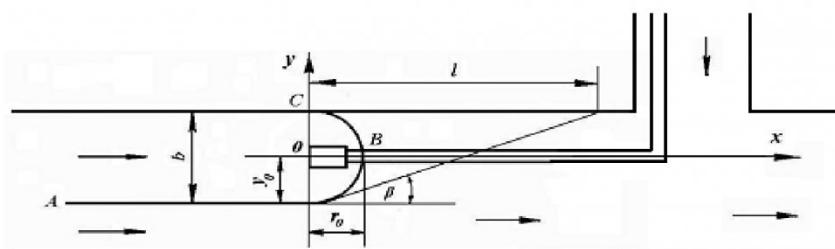


Рис. 5. Расчетная схема к определению места установки ВМП

ем комплексного потенциала (10), описывающего рассматриваемое течение. Разложив в ряд Маклорена показательную функцию в уравнении (10) и ограничившись двумя первыми членами разложения, получим:

$$W = v \frac{a}{2\pi} \left(1 + \frac{2\pi}{a} z \right) - \frac{1,77 R v_e}{2\pi} \ln \frac{2\pi}{a} z. \quad (17)$$

Выражая комплексный потенциал через семейство эквипотенциальных линий и линий тока, будем иметь:

$$\varphi + i\psi = v \frac{a}{2\pi} \left[1 + 2 \frac{\pi}{a} (x + iy) \right] - \frac{1,77 R v_e}{2\pi} \times \\ \left(\ln \left| 2 \frac{\pi}{a} z \right| - i \operatorname{arctg} \frac{y}{x} \right). \quad (18)$$

Отсюда находим функцию тока:

$$\psi(x, y) = v \cdot y - \frac{1,77 R v_e}{2\pi} \operatorname{arc tg} \frac{y}{x} = \text{const}. \quad (19)$$

Из (19), учитывая условие прохождения линии тока через точку B , в которой $y=0$, находим $\text{const} = 0$. Следовательно, уравнение контурной линии ABC будет иметь вид:

$$v \cdot y - \frac{1,77 R v_e}{2\pi} \operatorname{arc tg} \frac{y}{x} = 0,$$

откуда при $x = 0$ определяется искомый радиус зоны торможения потока:

$$y_o = 0,44R \frac{v_e}{v}. \quad (20)$$

Наибольший интерес представляет третья зона (рис. 5), расположенная между точкой торможения потока B и устьем тупиковой выработки. На этом участке имеют место два режима движения воздуха. Непосредственно за вентилятором движение воздушного потока неустойчивое. В противоположной от ВМП части выработки течение в основном является устойчивым по направлению. В выработках большого поперечного сечения при $q/q_e = 1,43$ средняя скорость движения воздуха за вентилятором не превышает $0,1\text{--}0,2$ м/с. Это приводит к тому, что зона неустойчивого воздушного потока занимает до 40 % поперечного сечения выработки и протяженность ее может превышать требуемую по Правилам безопасности десятимет-

ровую отметку. Если в таких выработках ВМП расположен на расстоянии 10 м от устья тупиковой выработки, то это неизбежно приведет к рециркуляции и исходящая из тупика струя загрязненного воздуха, попадая в неустойчивую зону, будет поступать на всас вентилятора.

Длина зоны неустойчивого проветривания может быть определена, если принять, что за всасывающим отверстием вентилятора формируется полуограниченная свободная струя (рис. 5). В этом случае

$$l = \frac{b}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (21)$$

где l – длина зоны неустойчивого проветривания, м;

b – ширина зоны торможения потока, м;

β – угол расширения свободной струи, равен $8\text{--}10^0$.

Подставляя в (21) удвоенное значение ширины зоны торможения потока $b = 2y_0$ и имея ввиду, что $\operatorname{tg} 9^0 = 0,158$, получим расчетную формулу для определения минимального расстояния, которое должно выдерживаться между ВМП и потоком воздуха, исходящего из тупиковой выработки.

$$l \geq 5,6 R \cdot \frac{v_e}{v}. \quad (22)$$

Как показывают расчеты, для выработок большого сечения при $v_e/v = (30\text{--}40)$ длина зоны неустойчивого проветривания может достигать 50 м и более, что и подтверждается замерами в натурных условиях. Если скорость движения воздуха в выработке с ВМП составляет порядка 2–4 м/с, то величина l будет равна 14–7 м. Выполнение требований ПБ в подобного рода ситуациях не обеспечит должной безопасности ведения горных работ.

Из изложенного следует, что расстояние от места установки вентилятора до устья тупиковой выработки должно не только удовлетворять требованиям ПБ, но и проверяться по формуле (22), учитывающей режим движения воздушного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левицкий Ж.Г. Аэромеханика вентиляционных потоков. – Караганда: КарГТУ, 2003. – 228с.

□ Авторы статьи:

Левицкий

Жорж Георгиевич,
докт.техн.наук, проф. (каф. рудничной аэробиологии и охраны труда Карагандинского государственного технического университета)
Email: LG_36@mail.ru

Аманжолов

Журсын Канапиевич,
канд.техн.наук, доц.. (каф. рудничной аэробиологии и охраны труда Карагандинского государственного технического университета)
Email: dzeff08c@mail.ru

Нургалиева

Асель Данияловна,
канд.техн.наук (каф. рудничной аэробиологии и охраны труда Карагандинского государственного технического университета)
Email: m611adn@mail.ru