

Д.В. Савельев

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПОТОКАХ ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Рассмотрен процесс распространения тонкодисперсной пыли, образованной в результате взрывных работ при проведении подготовительных выработок. Получена теоретическая зависимость, позволяющая определять концентрацию мелкодисперсной пыли по длине тупиковой выработки в период ее проветривания с учетом утечек воздуха из вентиляционного трубопровода.

ПОШИРЕННЯ ВИСОКОДИСПЕРСНИХ ПИЛОВИХ ЧАСТИНОК У ТУРБУЛЕНТНИХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ПОТОКАХ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ВИБУХОВИХ РОБІТ

Розглянуто процес поширення тонкодисперсного пилу, утвореного в результаті вибухових робіт при проведенні підготовчих виробок. Отримано теоретичну залежність, що дозволяє визначати концентрацію дрібнодисперсного пилу по довжині тупикової виробки в період її провітрювання з урахуванням витоків повітря з вентиляційного трубопроводу.

DISTRIBUTION OF FINE DUST PARTICLES WITHIN TURBULENT VENTILATION FLOW AT BLASTING OPERATION

The process of fine particle distribution as a result of blasting operations while driving development workings is considered. Theoretical dependence which enables to determine concentration of the fine dust along the length of the blind drift during its ventilation taking into account its air leak from the air duct is given.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях мгновенных источников выделения примесей (производство взрывов, внезапные выбросы и др.) в горную выработку за весьма короткий промежуток времени выбрасывается пылегазовое облако, на которое действует свободная струя воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода. Примеси (пыль и газы), находящиеся вне границ свободной струи, проникают в воздушную среду за счет турбулентной

диффузии и таким образом происходит перемешивание и интенсивный вынос пылегазовых примесей из призабойной части выработки [1, 2]. Пыль и продукты взрыва, распространяясь по горным выработкам, ухудшают санитарно-гигиенические показатели рудничной атмосферы на рабочих местах.

Для уменьшения запыленности рудничной атмосферы при проведении горных выработок буровзрывным способом используют различные способы снижения

пылеобразования при производстве взрывов. Для определения эффективности применяемых способов и средств снижения пылеобразования при выполнении взрывных работ необходимо определять концентрацию пыли на любой длине тупиковой выработки в течение всего времени проветривания с учетом утечек воздуха из вентиляционного трубопровода, что возможно на основании закономерностей аэромеханики вентиляционных потоков в горных выработках шахт.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно теории взвешенных частиц в турбулентном вентиляционном потоке характер их движения в горных выработках определяется спектром пульсаций, характерных для турбулентных потоков [2, 3]. Турбулентные пульсации характеризуются величиной скорости и расстояниями, на протяжении которых они претерпевают заметные изменения. Эти расстояния называются масштабом движения. Самые быстрые пульсации имеют и самый большой масштаб движения. Так, например, при турбулентном движении в канале наибольший масштаб пульсаций совпадает с диаметром канала, а скорость пульсаций – с максимальным значением скорости в центре канала. Такие крупномасштабные пульсации включают в себе основную долю кинетической энергии турбулентного движения и осуществляют перенос субстанции.

Вертикальное распределение частиц в горизонтальном потоке с учетом действия гравитационного поля определено Н.А. Фуком. Рассматривая равновесие процессов осаждения частиц под действием силы тяжести и перехода их в верхние слои потока под влиянием турбулентной диффузии, он получил следующее уравнение распределения частиц по высоте

$$\ln \frac{C_y}{C} = -\frac{v_e y}{D_t}, \quad (1)$$

где C – концентрация частиц у дна канала, мг/м³;

C_y – концентрация на высоте y , мг/м³;

y – высота канала, м;

v_e – скорость осаждения частиц в спокойном воздухе, м/с;

D_t – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с

$$D_t = 0,044\nu Re^{0,75}, \quad (2)$$

где Re – число Рейнольдса;

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Из уравнений (1) и (2) следует, что

$$C_y = C \exp\left(-\frac{v_e y}{0,0044 Re^{0,75}}\right). \quad (3)$$

Расчеты, выполненные по уравнению (3) для выработки площадью поперечного сечения 8 м² показывают, что при скорости воздушного потока 0,25 – 0,3 м/с и диаметре кварцевых частиц до 5 мкм концентрация аэрозоля по высоте остается практически неизменной. Экспериментальные исследования, выполненные В.В. Нединим и О.Д. Нейковым, подтверждают справедливость данных расчетов [4]. Следовательно, кварцевые частицы с диаметром до 5 мкм в таких потоках полностью увлекаются вихревыми массами, и действие силы тяжести в удалении от стенок выработок пренебрежимо мало по сравнению с действием аэродинамических сил.

В шахтах по мере удаления от источников пылевыделения запыленность воздуха уменьшается. Это явление объясняется осаждением частиц пыли на поверхность (бока, кровлю и почву) выработок. Наблюдения показывают, что пыль осаждается на поверхности выработок как при малых, так и при больших скоростях вентиляционной струи. Так, например, в рудных шахтах имеет место накопление пыли в вентиляционных выработках, где скорость движения воздуха достигает 5 – 7 м/с. Осаждение

пылевых частиц в турбулентном потоке возможно под влиянием гравитационных сил, диффузионных процессов и инерционных сил.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований [3] показывает, что в турбулентном потоке на достаточном удалении от стенок частицы полностью увлекаются пульсациями, и их перемещение в направлении течения и по сечению потока определяется главным образом динамическими параметрами потока. Гравитационные силы на перемещение мелкодисперсных частиц влияния почти не оказывают. Подсчитано, что в горизонтальной выработке при скорости вентиляционной струи более 0,2 м/с осаждение пыли с размерами частиц менее 10 мкм под действием гравитационных сил практически исключено [3].

Таким образом, можно утверждать, что различие в процессах турбулентного переноса твердых частиц и молекул газа зависит от степени дисперсности пыли и для высокодисперсных систем этим различием можно пренебречь, без ущерба для точности практических расчетов. При сравнении картины движения взвешенных частиц и молекул газа в турбулентном потоке следует исходить из общих уравнений механики турбулентного движения многокомпонентных сред.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Получение теоретической зависимости, позволяющей определять концентрацию мелкодисперсной пыли (< 10 мкм) на любом расстоянии от источника пылеобразования по длине тупиковой выработки в период ее проветривания с учетом утечек воздуха из вентиляционного трубопровода возможно на основании дифференциального уравнения турбулентной диффузии.

После взрывания процесс проветривания длинных тупиковых выработок происходит при нагнетании в них свежего воздуха по трубопроводу. Пыль и газ, выно-

симые из призабойной части, поступают в основную часть выработки в виде облака, которое перемещается воздушным потоком к устью выработки [2]. В начальный момент после взрыва облако заполняет выработку в ее призабойной части (рис. 1, положение I – I). Концентрация пыли и газа во всем объеме облака примерно постоянна.

В дальнейшем, в связи с подачей свежего воздуха в забой по воздухопроводу, пылевое облако движется от забоя, в результате чего происходит разжижение пыли, а, следовательно, и изменение ее концентрации по длине горной выработки (см. рис. 1, положение облака в момент II – II).

При этом в результате неравномерного распределения скоростей движения воздуха в сечении (центральные части потока перемещаются быстрее), а также диффузионных процессов газовое облако растягивается.

Через некоторое время пыль и газ из призабойной части полностью выдуваются и их концентрация становится равной нулю. С этого момента облако отрывается от забоя и начинает двигаться вдоль выработки (см. рис. 1, положение облака в момент III – III). Растяжение облака при постоянном количестве пыли в нем приводит к уменьшению ее концентрации.

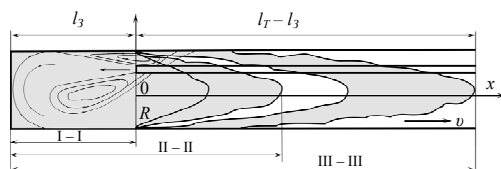


Рис. 1. Схема деформации и растяжения пылевого облака в тупиковой выработке при нестационарном процессе поступления пыли и нагнетательном способе проветривания

На степень разжижения пылевого облака оказывают также влияние утечки воздуха из вентиляционного трубопровода. Кроме того, по мере движения пылевого облака, часть пыли осаждается в выработ-

ке, что также влияет на изменение ее концентрации.

Следовательно, на изменение концентрации пыли по длине выработки оказывают влияние два основных процесса: деформация и растяжение пылевого облака за счет дебита свежего воздуха, а также осаждение пыли из облака за счет сил турбулентной диффузии, носящих пульсационный характер с непрерывным изменением вектора и детерминированных сил с постоянным направлением и модулем (силы гравитационного осаждения, силы сопротивления, аэродинамические силы вентиляционного потока). Таким образом, общее изменение концентрации мелкодисперсной витающей пыли, обусловленное суммарным воздействием вышеуказанных сил, определится из выражения

$$C(x) = C_T(x) + C_Q(x), \quad (4)$$

где C_T и C_Q – соответственно изменения концентрации витающей пыли по длине выработки, обусловленные явлением турбулентной диффузии и увеличением расхода воздуха в выработке, мг/м³.

Соотношение указанных сил различно для частиц разной массы, определяемой ее размером (диаметром) и квазиплотностью (отношением аэродинамически активного объема частицы к ее массе). Также на соотношение сил оказывают влияние скорость воздушного потока или первые производные координат по времени [3].

В пределах рассматриваемой задачи определения концентрации мелкодисперсной витающей пыли (≤ 10 мкм) влиянием детерминированных сил можно пренебречь без ущерба для точности. То есть принимаем, что данные фракции пыли являются турбулентно осаждаемыми частицами, для которых сила веса полностью компенсируется аэродинамическими силами, и ускорение свободного падения меньше либо равно ускорению, придаваемому частице подъемными аэродинамическими силами.

Турбулентная диффузия приводит к непрерывному обмену частицами между элементарными объемами воздуха (молями), поэтому координата Y для произвольной частицы может импульсивно измениться как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения [3].

Интегрально действие сил турбулентной диффузии направлено на выравнивание концентрации примесей в условном объеме воздуха, при этом частицы мелких фракций пыли распределяются практически равномерно по сечению выработки.

Экспериментальные данные последнего периода [3] с детализированным пофракционным анализом процессов осаждения пыли указывают на то, что масса осаждаемой пыли (витающих фракций) прямо пропорциональна скорости потока воздуха. В этом случае возрастает амплитуда турбулентных пульсаций, объем выносимой тонкой пыли в «осаждаемую» область увеличивается. Силы сцепления частиц с поверхностью (в диапазоне $v_{возд} < v_{кр}$) достаточны для удержания турбулентно осаждаемых частиц, поэтому тонкие фракции, управляемые только силами диффузии, осаждаются более интенсивно с ростом скорости потока воздуха.

Для турбулентно осаждаемых фракций пыли изменение концентрации в дифференциальной форме по длине описывается уравнением [3]

$$\frac{dC_T}{C_T} = (-k v_x) dx, \quad (5)$$

где k – отношение массы витающей монодисперсной пыли в рассматриваемом элементарном объеме выработки к массе осаждаемой пыли на единице площади.

Решение уравнения (5) для двух произвольных сечений, отнесенных на расстояние Δx с учетом известной концентрации в начальной точке C_0 , дает зависимость изменения концентрации фракций аэрозоля, подверженных процессам только турбулентного осаждения

$$C_T(x) = C_0 \exp(-k\Delta x v_x), \quad (6)$$

де C_0 – концентрация пыли в призабойной зоне, мг/м³.

Уравнение (6) определяет процесс убывания концентрации монодисперсного аэрозоля, находящегося в состоянии витания, т.е. когда $g' < 0$ для рассмотренных размеров частиц.

Для определения концентрации пыли с учетом деформации пылевого облака математически задача может быть представлена следующим образом.

В цилиндрической системе координат, начало которой, расположено в плоскости нагнетательного трубопровода (рис. 1), предполагается, что в начальный момент времени ($t = 0$) концентрация пыли является функцией радиуса выработки, то есть $C = C_0\phi(r)$.

Принимаем допущение, что на поверхность выработки ($r = R$) витающая пыль не оседает. Скорость движения воздуха (v) принимается равной среднему ее значению на рассматриваемом участке. Концентрация пыли за пределами призабойной зоны ($x = 0$) зависит от радиуса выработки и изменяется по экспоненте

$$C_Q = C_0 \exp\left(-\frac{vt}{l_3}\right) f(r).$$

С учетом принятых допущений изменение концентрации витающей пыли можно описать уравнением турбулентной диффузии

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_Q}{\partial t} + v \frac{\partial c_Q}{\partial x} + AC = \\ = D_x \left(\frac{\partial^2 c_Q}{\partial x^2} \right) + D_r \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial c_Q}{\partial r} + \frac{\partial^2 c_Q}{\partial r^2} \right) \end{aligned}$$

с условиями однозначности

$$C_Q(0, r, x) = C_0\phi(r);$$

$$C_Q(t, r, 0) = C_0\phi r \exp(-vt/l_3);$$

$$\frac{\partial C_Q(t, R, x)}{\partial r} = 0.$$

Величина, учитывающая изменение концентрации витающей пыли за счет утечек воздуха из вентиляционного трубопровода определяется на основании выражения

$$A = \frac{(Q_K - Q_H)v}{Q_H x},$$

где Q_H – количество воздуха, поступающее в призабойное пространство, м³/с;

Q_K – количество воздуха в начале горной выработки, м³/с.

Применяем метод конечного интегрального преобразования Ханкеля в виде

$$\bar{C}_Q(t, \varepsilon, x) = \int_0^R r C_Q(t, r, x) I_0(\varepsilon r) dr$$

с формулой обращения

$$\begin{aligned} C_Q(t, r, x) = \frac{r}{R^2} \cdot \bar{C}_Q(t, 0, x) + \\ + \frac{r}{R^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{I_0(\varepsilon_i r)}{I_0^2(\varepsilon_i R)} \cdot \bar{C}_Q(t, \varepsilon_i, x), \quad (7) \end{aligned}$$

после чего из уравнения (7) исключаем переменную r .

Используем также интегральное преобразование Лапласа по переменной t в следующем виде

$$C_Q(p, \varepsilon, x) = \int_0^{\infty} \exp(-pt) \cdot \bar{C}_Q(t, \varepsilon, x) dt.$$

При помощи таблиц [5] выполняем переход к оригиналу по переменной t .

Указанные преобразования дают решение задачи в безразмерной форме:

$$\begin{aligned}
\frac{C_Q}{C_0} = & 2 \int_0^1 y \Phi(y) dy \cdot \exp(-BFo) + \int_0^1 y F(y) dy \cdot \exp\left(\frac{Pe}{2}x - \beta Fo\right) \times \\
& \times \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta}x\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta\right)Fo}\right] + \right. \\
& + \exp\left(\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta}x\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta\right)Fo}\right] \left. \right\} - \int_0^1 y \Phi(y) dy \times \\
& \times \left[\exp(-BFo) \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \frac{Pe}{2}\sqrt{Fo}\right) + \exp(Pe \cdot x) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \frac{Pe}{2}\sqrt{Fo}\right) \right] + \right. \\
& + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{I_0(\mu_i y)}{I_0^2(\mu_i)} \left[\int_0^1 y F(y) I_0(\mu_i y) dy \cdot \exp\left(\frac{Pe}{2}x - \beta Fo\right) \right] \times \\
& \times \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta + k\mu_i^2}x\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta + k\mu_i^2\right)Fo}\right] + \right. \\
& + \exp\left(\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta + k\mu_i^2} \cdot x\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta + k\mu_i^2\right)Fo}\right] \left. \right\} - \\
& - \exp\left[-\left(B + k\mu_i^2\right)Fo\right] \cdot \int_0^1 y \Phi(y) I_0(\mu_i y) dy \times \\
& + \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \frac{Pe}{2}\sqrt{Fo}\right) + \exp(Pe \cdot x) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \frac{Pe}{2}\sqrt{Fo}\right) \right\} + \\
& + 2 \int_0^1 y \Phi(y) I_0(\mu_i y) dy \cdot \exp\left[-\left(k\mu_i^2 + B\right)Fo\right],
\end{aligned} \tag{8}$$

где Fo и Pe – соответственно, критерии Фурье и Пекле; $Fo = \frac{D_x t}{R^2}$; $Pe = \frac{vR}{D_x}$;

$$k = \frac{D_r}{D_x}; \quad x = \frac{l_T - l_3}{R}; \quad y = \frac{r}{R}; \quad B = \frac{AR^2}{D_x};$$

$$\beta = \frac{v}{l_3} \frac{R^2}{D_x}; \quad \mu_i = \varepsilon_i R; \quad \Phi(y) = \frac{\phi(r)}{C_0};$$

$$F(y) = \frac{f(r)}{C_0}.$$

Перед началом взрывных работ, когда вредные примеси в подготовительной выработке отсутствуют $C(0, y, x) = \Phi(y) = 0$.

Экспериментальные исследования [4] показали, что концентрация витающей пыли по высоте выработки остается практически неизменной, следовательно, можно допустить, что поток турбулентной диффузии направлен лишь в направлении оси x . Тогда $F(x) = 1$ и решение (8) может быть представлено в следующем виде

$$\begin{aligned}
C_Q = C_0 \frac{1}{2} \exp\left(\frac{Pe}{2}x - \beta Fo\right) \times \\
\times \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta\right)Fo}\right] + \right. \\
\left. + \exp\left(\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta\right)Fo}\right] \right\}. \quad (9)
\end{aligned}$$

Величина B в выражениях (8) и (9) определяется из формулы

$$B = \frac{AR^2}{D_x} = \frac{(Q_k - Q_n)vR^2}{Q_n x D_x},$$

трубопровода, и характеризуется величиной β , определяемой из выражения

$$\beta = \frac{Q_n R^2}{SD_x l_3}.$$

где S – площадь поперечного сечения горной выработки, m^2 .

Степень изменения концентрации витающей пыли в призабойном пространстве зависит от активности свободной струи, обусловленной величиной расхода воздуха, выходящего из конца вентиляционного

На основании выражений (4), (6) и (9), изменение концентрации мелкодисперсной витающей пыли по длине проветриваемой горной выработки, с учетом влияния действующих сил, можно выразить следующей зависимостью

$$\begin{aligned}
C(x) = C_0 \exp(-kAxv_x) + C_0 \frac{1}{2} \exp\left(\frac{Pe}{2}x - \beta Fo\right) \times \\
\times \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta\right)Fo}\right] + \right. \\
\left. + \exp\left(\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + B - \beta x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + B - \beta\right)Fo}\right] \right\}
\end{aligned}$$

Начальная запыленность воздуха C_0 в пределах зоны отброса продуктов взрыва определяется по формуле [6]

$$C_0 = K_{II} l_{uf} \frac{K_c}{K_g}, \quad (10)$$

где K_{II} – коэффициент пропорциональности ($K_{II} = 60$ для начальной максимальной

запыленности и $K_{II} = 20$ – для средней запыленности);

K_c – коэффициент, зависящий от способа взрыва (при электровзрывании $K_c = 0,5$, при огневом способе $K_c = 1,0$);

K_g – коэффициент, зависящий от обводненности пород и выработки (для сухого забоя $K_g = 0,5$; для забоя с влажными

породами или искусственным орошением $K_g = 1,0$; для забоя со слабым притоком и небольшим капежом $K_g = 2,0$; для обводненного забоя с обильным капежом или внутренней водяной забойкой $K_g = 3,0$);

f – коэффициент крепости пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова;

$l_{ш}$ – средняя длина шпура, м.

При взрывании по слоистым и трещиноватым породам в формулу (10) вносится поправка 0,7 – 0,9. При взрывании в вертикальных стволах, наклонных выработках и в восстающих вносится соответствующая поправка, равная 0,1; 0,5 и 0,1.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований установлено, что изменение концентрации пыли по длине выработки обуслов-

лено суммарным воздействием сил деформации и растяжения пылевого облака за счет дебита свежего воздуха, а также за счет сил турбулентной диффузии, носящих пульсационный характер с непрерывным изменением вектора и детерминированных сил с постоянным направлением и модулем (силы гравитационного осаждения, силы сопротивления, аэродинамические силы вентиляционного потока).

На основании решения дифференциального уравнения турбулентной диффузии взвешенных в вентиляционном потоке частиц пыли получена теоретическая зависимость, позволяющая определять концентрацию мелкодисперсной пыли на любом расстоянии от источника пылеобразования по длине тупиковой выработки в период ее проветривания с учетом утечек воздуха из вентиляционного трубопровода.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поздняков Г.А. Динамика концентрации пылегазовых аэрозолей в длинных тупиковых выработках, проводимых буровзрывным способом / Г.А. Поздняков, Г.О. Петрунин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – Отд. вып. № 12. – С. 296 – 302.

2. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт / К.З. Ушаков. – М.: Издательство МГГУ, 2004. – 481 с.

3. Романченко С.Б. Пылевая динамика в угольных шахтах / С.Б. Романченко, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 256 с.

4. Недин В.В. Борьба с пылью на рудниках. / В.В. Недин, О.Д. Нейков. – М.: Недра, 1965. – 180 с.

5. Волков И.К. Интегральные преобразования и операционное исчисление / И.К. Волков, А.Н. Канатников. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 229 с.

6. Янов А.П. Защита рудничной атмосферы от загрязнений / А.П. Янов, В.С. Ващенко. – М.: Недра, 1977.

ОБ АВТОРАХ

Савельев Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры аэрологии и охраны труда Национального горного университета.