

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕДАНИЯ ПЫЛИ КАЛИЙНОЙ СОЛИ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

М. А. Семин¹, А. Г. Исаевич², С. Я. Жихарев³

*Горный институт УрО РАН,
E-mail: ¹seminma@inbox.ru, ²aero_alex@mail.ru, ³perevoloki55@mail.ru,
ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Предложена математическая модель динамики частиц соляного аэрозоля в горной выработке, учитывающая конвективно-диффузионный перенос частиц вместе с воздушным потоком, коагуляцию частиц и конденсацию на них влаги, оседание частиц на почву горной выработки под действием силы тяжести. С помощью метода конечных разностей получено численное решение задачи о движении частиц соляного аэрозоля в горной выработке, определены распределения концентрации и среднего радиуса частиц аэрозоля. Выполнено сравнение полученных результатов с аналитической моделью и данными натурального эксперимента. Определена зависимость скорости оседания частиц аэрозоля от параметров аэрозоля, которая может использоваться для параметризации математических моделей движения пылевоздушных смесей в вентиляционных сетях калийных рудников.

Рудничная вентиляция, калийная соль, соляная пыль, пылевоздушная смесь, моделирование, оседание пыли

DOI: 10.15372/FTPRPI20210218

Критическое содержание пыли и различных аэрозольных частиц в рабочей зоне — острая проблема горного производства. Согласно [1], максимальная запыленность воздуха на калийных рудниках Верхнекамского и Старобинского месторождений может превышать 2500 мг/м^3 , а в среднем значение колеблется в пределах $440 - 1070 \text{ мг/м}^3$. Запыленность атмосферы воздухоподающих горных выработок намного ниже, как правило, находится в диапазоне $4 - 8 \text{ мг/м}^3$ для транспортных штреков и достигает 70 мг/м^3 для конвейерных. Предельно допустимая концентрация пыли в рабочей зоне составляет 5 мг/м^3 [2, 3].

В настоящее время накоплен большой практический опыт по борьбе с пылью на угольных шахтах и калийных рудниках [2, 4–13]. Наибольшая эффективность пылеподавления при минимальных тратах материальных и трудовых ресурсов достигается в тех случаях, когда удается использовать естественные свойства частиц пылевого аэрозоля: электрические, магнитные, инерционные, сорбционные. Именно на этом основаны многие существующие методы и меро-

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-45-596020).

приятия по борьбе с загрязнением, например осаждение пыли за счет орошения воздуха, применения пены, пылеулавливателей [14]. Помимо перечисленных, выделяют традиционные методы снижения запыленности — вентиляцию (увеличение расхода воздуха для разбавления вредных примесей) и пылеподавление (оградительные щиты и пр.).

В литературе описано большое количество экспериментальных данных о запыленности воздуха калийных рудников как в тупиковых выработках и лавах, так и на главных и панельных транспортных штреках. Однако теоретический анализ получаемых данных ограничивается построением эмпирических формул для ожидаемой запыленности воздуха в рабочих зонах, для критической скорости воздуха, при которой происходит отрыв пыли от стенок горных выработок. Исследование [11] — исключение, автором предложена аналитическая модель движения соляного аэрозоля в горной выработке в поле действия силы тяжести.

Теоретический анализ закономерностей движения пылевоздушной смеси в системах горных выработок необходим для разработки эффективных методов и мероприятий по снижению запыленности воздуха калийных рудников и должен проводиться на вентиляционных сетях с использованием одномерных моделей движения воздушной струи с содержанием вредных примесей. В рамках таких моделей распределение воздушных потоков рассчитывается по правилам Кирхгофа I и II рода [15]:

$$\sum_{i \in V_j} Q_i = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in L_k} B_i (H_i - R_i Q_i |Q_i|) = 0, \quad (2)$$

а распределение вредной примеси — с помощью конвективно-диффузионного уравнения

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{Q_i}{S_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \lambda_i C_i + F_i. \quad (3)$$

Здесь Q_i — расход воздуха в горной выработке i , $\text{м}^3/\text{с}$; H_i — депрессия источника тяги в горной выработке i , Па; R_i — аэродинамическое сопротивление горной выработки i , $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$; B_i — индикатор направления выработки (ветви графа) в контуре k ; C_i — концентрация соляного аэрозоля по длине горной выработки i , $\text{мг}/\text{м}^3$; S_i — сечение горной выработки i , м^2 ; D_T — коэффициент турбулентной диффузии воздушного потока, $\text{м}^2/\text{с}$; λ_i — параметр, характеризующий скорость уменьшения концентрации соляного аэрозоля за счет его оседания на почву и стенки горной выработки, $1/\text{с}$; F_i — интенсивность образования пыли в источнике пыления, $\text{мг}/\text{м}^3/\text{с}$; t — время, с; x — координата по оси выработки, м; V_j — множество горных выработок (ветвей графа вентиляционной сети), смежных с узлом j ; L_k — множество горных выработок, входящих в контур k [4, 16, 17].

Предполагается, что λ_i зависит от относительной влажности и температуры воздуха, а F_i — от относительной влажности воздуха и производительности комбайна. В случае существенной вариации относительной влажности и температуры воздуха в вентиляционной сети рудника систему (1)–(3) следует дополнять соответствующими уравнениями переноса [18, 19].

Знания закономерностей уменьшения средней концентрации соляного аэрозоля в сечении горной выработки по ее длине, а также закономерностей генерации пыли на комбайновых комплексах, конвейерах и в местах загрузки/разгрузки скипов крайне важны. Это позволит определить λ_i и F_i и параметризовать математическую модель динамики пылевоздушной

смеси в системе горных выработок. Такая модель, помимо уравнений (1)–(3), будет включать соответствующий набор граничных и начальных условий. В данной работе они не конкретизируются.

Эмпирическая формула для определения средней запыленности воздуха на рабочем месте машиниста комбайна для тупиковых выработок, проходимых комбайном [1]:

$$\bar{C} = 250\bar{J}, \quad (4)$$

$$\bar{C} = \bar{C}_{30\%} \exp\left(0.3 - \frac{\varphi}{100}\right). \quad (5)$$

Здесь \bar{J} — средняя производительность комбайна, т/мин; $\bar{C}_{30\%}$ — концентрация пыли при относительной влажности воздуха 30%; φ — относительная влажность воздуха, %. Совершенство формулы (4) требует проведения численного трехмерного моделирования движения пылевоздушных смесей в тупиковых горных выработках с работающим комбайновым комплексом. Частично это затрагивалось в [2, 12], но данный вопрос не является предметом настоящего исследования.

В [11] с помощью модели движения соляного аэрозоля в горной выработке в поле действия силы тяжести получена удобная аналитическая формула для расчета уменьшения средней концентрации пыли (соляного аэрозоля) в сечении горной выработки по ее длине. Однако данная формула содержит ряд существенных упрощений (например, предположение о том, что влажная частица соляного аэрозоля — жидкая капля, автоточность решения). Также не пояснено, как проводить анализ влияния относительной влажности воздуха на снижение концентрации пыли в горной выработке, в то время как проведение такого анализа имеет большое значение, так как повышение относительной влажности — одна из эффективных мер снижения запыленности горных выработок. Моделирование данного процесса позволило бы подбирать правильные параметры систем обеспыливания.

Цель настоящей работы — проведение более глубокого теоретического анализа закономерностей динамики частиц пылевого аэрозоля в поле действия силы тяжести, а также определение параметра λ_i , характеризующего скорость оседания частиц соляного аэрозоля на почву и стенки горной выработки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теоретический анализ динамики соляного аэрозоля в горной выработке рассматривает следующие физические процессы:

- конвективный перенос частиц аэрозоля вместе с воздушным потоком;
- диффузионный перенос частиц аэрозоля вследствие турбулентного режима течения воздуха;
- оседание частиц аэрозоля на почву горной выработки под действием силы тяжести;
- коагуляция частиц аэрозоля в результате их абсолютно неупругих соударений;
- конденсационный рост частиц аэрозоля в результате поглощения влаги из воздуха.

Помимо этого, предполагается изотермичность и стационарность протекающих физических процессов, а также тот факт, что оседание пыли на почву горной выработки более выражено, чем прилипание пыли к боковым стенкам и кровле горной выработки. С учетом этого анализ динамики соляного аэрозоля целесообразно проводить в рамках двумерной постановки задачи. Геометрически горная выработка задается как прямоугольная область высотой h и длиной L (рис. 1).

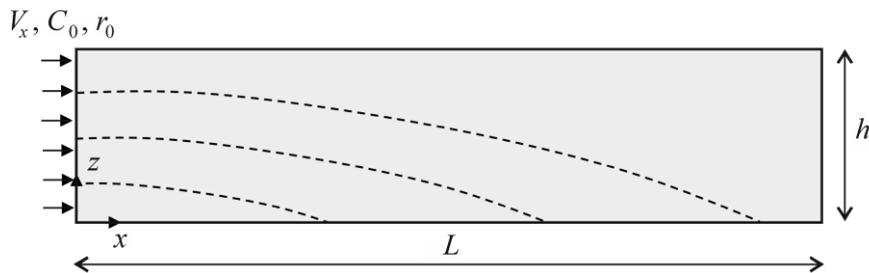


Рис. 1. Расчетная область

Система координат выбрана таким образом, что ось x направлена вдоль горной выработки, ось z — вертикально, в поперечном направлении. Центр системы координат находится в нижнем левом углу выработки. Воздушный поток движется слева направо. Слева, на входе в горную выработку, задаются параметры соляного аэрозоля: скорость потока V_x , начальная концентрация C_0 и начальный размер r_0 частиц аэрозоля. Продольная компонента скорости воздушного потока V_x считается постоянной. Поперечная (вертикальная) компонента скорости воздуха всюду равна нулю, в то время как поперечная компонента скорости частиц аэрозоля переменна. Принимается, что на входе в выработку концентрация соляного аэрозоля распределена однородно по высоте. Физически ненулевая концентрация частиц соляного аэрозоля на входе в горную выработку может быть связана с влиянием некоторого источника пыления, например работающего комбайна.

Поскольку частицы аэрозоля в своем большинстве ($> 99\%$) имеют радиус > 0.1 мкм [1], число Кнудсена в данном случае мало и, следовательно, справедливо основное предположение гидроаэромеханики о сплошности (континуальности) среды. Это позволяет свести задачу об изменении концентрации гигроскопичного аэрозоля по длине прямой горной выработки к решению стационарного уравнения конвективно-диффузионного переноса:

$$\frac{\partial V_x C}{\partial x} + \frac{\partial V_z C}{\partial z} = D_T \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

где V_x , V_z — компоненты скорости частиц аэрозоля в продольном (x) и поперечном (z) направлении горной выработки, м/с; C — концентрация частиц аэрозоля, мг/м³; D_T — коэффициент турбулентной диффузии воздушного потока, м²/с.

По данным [20], эмпирическая формула для расчета коэффициента турбулентной диффузии при $Re > 10000$:

$$D_T = 0.044\nu Re^{0.75}, \quad (7)$$

здесь ν — ламинарная кинематическая вязкость воздуха, м²/с; Re — число Рейнольдса воздушного потока.

Скорость частиц аэрозоля в продольном направлении равна средней скорости воздушного потока в горной выработке, которая является известным параметром при решении задачи. Скорость частиц в поперечном направлении горной выработки должна быть оценена исходя из анализа физических механизмов эволюции и оседания частиц на почву выработки в поле силы тяжести. Если предположить, что радиус частиц аэрозоля достаточно мал (до 35 мкм), то можно воспользоваться приближением Стокса и получить выражение для скорости оседания сферической частицы радиусом r в воздухе [11, 21]:

$$V_z = -\frac{2}{9} \frac{r^2 g}{\nu}, \quad (8)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; ν — ламинарная кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

Согласно [21], формула (8) позволяет рассчитывать динамику частиц размерами до 35 мкм в воздушном потоке в пределах погрешности 10 %. Если размер частиц исследуемых аэрозолей больше, необходимо использовать более точные зависимости (например, формулу Озеена).

На практике в каждой точке пространства горной выработки присутствуют частицы в широком диапазоне радиусов [4]. Это связано с полидисперсностью аэрозоля в месте его генерации и с активным массообменом в турбулентном воздушном потоке. Для простоты в [11, 22] принималось, что в каждой точке пространства горной выработки присутствуют частицы только одного радиуса. Использовалась гипотеза о локальной монодисперсности соляного аэрозоля: в произвольном элементарном объеме пространства выработки поведение реального полидисперсного соляного аэрозоля хорошо описывается монодисперсным аэрозолем с частицами некоторого среднего радиуса. Также важно учитывать, что в пространстве горной выработки происходит массоперенос посредством турбулентной диффузии, оказывающий влияние на среднее значение радиуса частиц аэрозоля.

Сделанные допущения позволяют сформулировать уравнение переноса среднего радиуса r частиц аэрозоля как некоторой скалярной характеристики потока:

$$\frac{\partial V_x r}{\partial x} + \frac{\partial V_z r}{\partial z} = D_T \left(\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial z^2} \right) + R_{\text{коаг}} + R_{\text{конд}}. \quad (9)$$

Здесь $R_{\text{конд}}$, $R_{\text{коаг}}$ — слагаемые, отвечающие за конденсационный и коагуляционный рост частиц аэрозоля, м/с . Согласно [11, 23–26], конденсационный рост рассольной пленки на соляной частице рассчитывается по уравнению

$$R_{\text{конд}} = \frac{D_T \mu_p \Delta P}{\rho_p R (T + 273.15) r}, \quad (10)$$

где μ_p — молекулярный вес рассола, кг/моль ; ΔP — разница между парциальными давлениями водяного пара в воздухе и на поверхности рассольной пленки частицы аэрозоля, Па ; ρ_p — плотность рассола, кг/м^3 ; R — универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T — температура, $^\circ\text{C}$.

В [11] предполагалось, что по мере роста частицы аэрозоля за счет конденсации влаги на ней концентрация соли в рассольной пленке падает обратно пропорционально увеличению объема влажной частицы. Данный вывод справедлив только в том случае, если в растущей влажной частице твердое соляное ядро полностью растворилось (случай жидкой капли). На начальных стадиях конденсационного роста частиц аэрозоля сделанное заключение несправедливо: концентрация рассола поддерживается постоянной, равной предельной концентрации насыщенного раствора. Это происходит до тех пор, пока возможна “подпитка солью”. С учетом того, что объемная концентрация насыщенного раствора соли NaCl составляет $\sim 21\%$ [27], для того чтобы вся соль растворилась во влажной пленке, радиус влажной частицы аэрозоля должен вырасти в 1.8 раза, а масса — в 2.5 раза.

Разница ΔP между парциальными давлениями водяного пара в воздухе и на поверхности рассольной пленки частицы аэрозоля в изотермическом случае линейно зависит от разницы относительных влажностей $\Delta\varphi$ в воздухе и на поверхности рассольной пленки:

$$\Delta P = \Delta\varphi P_n = \Delta\varphi \cdot 6.112 \exp\left(\frac{17.5T}{241.2 + T}\right). \quad (11)$$

Согласно [1], относительная влажность воздуха вблизи поверхности рассольной пленки называется критической влажностью $\varphi_{кр}$. Для большинства солей она практически не зависит от температуры и составляет для каменной соли 77, сильвинита — 67, карналлита — 50 %.

После того как радиус влажной частицы аэрозоля вырастет в 1.8 раза, твердое ядро во влажной частице растворится, а концентрация рассола в капле начнет убывать. Вместе с этим возрастет критическая влажность, что замедлит или остановит последующий рост рассольной капли. Поэтому формулу (11) следует модифицировать:

$$\Delta P = [\varphi - f(\varphi_{кр})] \cdot 6.112 \exp\left(\frac{17.5T}{241.2 + T}\right), \quad (12)$$

$$f(\varphi_{кр}) = \varphi_n + (\varphi_{кр} - \varphi_n) \min\left[1; \left(\frac{1.8r_0}{r}\right)^3\right], \quad (13)$$

φ_n — относительная влажность насыщенного водяного пара, %.

Коагуляционный рост частицы аэрозоля $R_{коаг}$ в турбулентном воздушном потоке может быть описан, исходя из формулы [28], для числа столкновений $d\Phi$ частиц с заданной частицей в единицу объема за время dt [21]:

$$d\Phi = 4\pi D_T R n dt, \quad (14)$$

где R — радиус коагуляции (приближенно равен $2r$), м; n — общее количество частиц в единице объема аэрозоля, м^{-3} . Формула (14) применима в случае, когда $D_T t / R^2 \sim 1$ или $t \sim 10^{-7}$ с.

Предположив, что в промежуток времени dt в единичном объеме пространства горной выработки масса частиц аэрозоля постоянна (справедливо $4\pi\rho r^3 n / 3 = \text{const}$), становится возможным рассчитать изменение среднего радиуса частиц аэрозоля вследствие их коагуляции:

$$R_{коаг} = \frac{dr}{dt} = -\frac{r}{3n} \frac{dn}{dt} = \frac{r}{6} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{4\pi D_T r^2 n}{3}. \quad (15)$$

С учетом того, что общее количество частиц n в единице объема аэрозоля равно массовой концентрации аэрозоля C , деленной на массу одной частицы, формула (15) будет выглядеть как

$$R_{коаг} = \frac{4\pi D_T r^2}{3} \frac{C \cdot 10^{-6}}{\rho \frac{4\pi r^3}{3}} = \frac{D_T C \cdot 10^{-6}}{\rho r}. \quad (16)$$

Плотность частицы ρ будет зависеть от соотношения воды и соли в ней. Множитель 10^{-6} учитывает, что единица измерений концентрации аэрозоля — миллиграмм на кубический метр.

Получен закономерный результат: с течением времени и увеличением радиуса частиц аэрозоля за счет коагуляции происходит замедление скорости роста радиуса. Это связано с тем, что при фиксированной концентрации аэрозоля C по мере роста среднего радиуса

частиц в рассматриваемом малом объеме количество частиц n уменьшается обратно пропорционально кубу радиуса частиц, а вероятность столкновения растет медленнее (прямо пропорционально квадрату радиуса частиц). Примечательно, что аналогичная зависимость роста радиуса частицы от текущего значения радиуса наблюдается и для механизма конденсационного роста, так как приток влаги к пленке на частице прямо пропорционален площади сферической частицы, т. е. только квадрату радиуса частиц.

В настоящей работе рассматривается одна разновидность механизма коагуляции — турбулентная. Однако существуют еще такие, как броуновская, гидродинамическая, градиентная, акустическая. В [11] для случая горных выработок показано, что они дают существенно меньший вклад по сравнению с турбулентной коагуляцией, за исключением тонкого пограничного слоя вблизи стенок горных выработок, где ярко выражена градиентная коагуляция. Согласно [21], в случае градиентной коагуляции вблизи стенки количество соударений частиц в единицу времени равно аналогичному количеству для турбулентной коагуляции с точностью до постоянного числового множителя. В [21, 28] указывается, что значение механизма турбулентной коагуляции наиболее важно для частиц, диаметры которых $10^{-50} - 10^{-4}$ см.

Уравнения переноса концентрации и среднего радиуса частиц аэрозоля должны быть дополнены следующими граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \tag{17}$$

$$C|_{x=0} = C_0, \quad \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \tag{18}$$

$$\left. \frac{\partial r}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial r}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \tag{19}$$

$$r|_{x=0} = r_0, \quad \left. \frac{\partial r}{\partial x} \right|_{x=L} = 0. \tag{20}$$

Полученная система уравнений (6), (9), (12)–(13), (16)–(20) является замкнутой и позволяет определить распределения концентрации и среднего радиуса частиц аэрозоля в горной выработке, а также параметр λ , характеризующий скорость уменьшения средней по сечению концентрации соляного аэрозоля по длине горной выработки.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Для удобства теоретического анализа полученной системы уравнений следует ввести безразмерные переменные — продольную X' и поперечную Z' координаты, концентрацию C' и радиус частиц R' :

$$X' = \frac{x}{h}, \quad Z' = \frac{z}{h}, \quad C' = \frac{C}{C_0}, \quad R' = \frac{r}{r_0}. \tag{21}$$

Высота горной выработки h принята в качестве единого характерного пространственного размера в задаче. Она используется при переходе к обеим безразмерным поперечным координатам X' и Z' . Это сделано для того, чтобы упростить последующую запись дифференциальных уравнений переноса в безразмерном виде, а также сделать графический анализ численного решения более удобным, так как по текущей величине X' можно судить о том, сколько характерных размеров горной выработки прошел поток от ее начала до рассматриваемого места.

В этом случае уравнения переноса концентрации (6) и среднего радиуса частиц (9) после преобразований имеют вид:

$$\frac{\partial C'}{\partial X'} - A \frac{\partial R'^2 C'}{\partial Z'} = \frac{1}{\text{Pe}_T} \left(\frac{\partial^2 C'}{\partial X'^2} + \frac{\partial^2 C'}{\partial Z'^2} \right), \quad (22)$$

$$\frac{\partial R'}{\partial X'} - A \frac{\partial R'^3}{\partial Z'} = \frac{1}{\text{Pe}_T} \left(\frac{\partial^2 R'}{\partial X'^2} + \frac{\partial^2 R'}{\partial Z'^2} \right) + \frac{1}{\text{Pe}_T} \frac{K}{R'}. \quad (23)$$

Данная система уравнений содержит три безразмерных комплекса:

$$\text{Pe}_T = \frac{V_x h}{D_T}, \quad (24)$$

$$A = \frac{2 g r_0^2}{9 \nu V_x}, \quad (25)$$

$$K = \frac{h^2}{r_0^2} \left[\frac{\mu_p \Delta P(R')}{\rho_p R(T + 273.15)} + \frac{C_0 C'}{\rho(R')} \cdot 10^{-6} \right]. \quad (26)$$

Граничные условия можно записать так:

$$\left. \frac{\partial C'}{\partial Z'} \right|_{Z'=0} = \left. \frac{\partial C'}{\partial Z'} \right|_{Z'=1} = 0, \quad (27)$$

$$C'|_{X'=0} = 1, \quad \left. \frac{\partial C'}{\partial X'} \right|_{X'=L/h} = 0, \quad (28)$$

$$\left. \frac{\partial R'}{\partial Z'} \right|_{Z'=0} = \left. \frac{\partial R'}{\partial Z'} \right|_{Z'=1} = 0, \quad (29)$$

$$R'|_{X'=0} = 1, \quad \left. \frac{\partial R'}{\partial X'} \right|_{X'=L/h} = 0. \quad (30)$$

Система (22), (23) является нелинейной и, скорее всего, не имеет точного аналитического решения. Численное решение системы (22) – (30) осуществлялось с использованием метода конечных разностей в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Анализ проводился для набора параметров задачи, которые соответствуют параметрам вентиляционного штрека одной из лав на руднике ОАО “Беларуськалий”, где осуществлялись экспериментальные замеры распределения концентрации аэрозоля калийной соли:

Высота горной выработки, м	2.80
Длина горной выработки, м	300
Средняя скорость воздуха в горной выработке, м/с	1.75
Температура воздуха, °С	20
Кинематическая вязкость воздуха, м ² /с	1.5·10 ⁻⁵
Начальное значение радиуса частиц аэрозоля, мкм	10
Начальная концентрация пыли, мг/м ³	600
Относительная влажность, %	37.50
Критическая относительная влажность, %	67
Молекулярный вес насыщенного рассола, кг/моль	0.022
Плотность воды, кг/м ³	1000
Плотность соли, кг/м ³	2000
Универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К)	8.31
Коэффициент молекулярной диффузии воздуха, м ² /с	0.00007

При данных параметрах задачи значения безразмерных комплексов на левой границе расчетной области ($C' = R' = 1$) равны: $Re_T \approx 543$, $A \approx 8.3 \cdot 10^{-6}$, $K \approx 23520$. В безразмерном комплексе K первое слагаемое равно нулю, так как относительная влажность воздуха ниже критической влажности и, следовательно, конденсации влаги на частицах аэрозоля не происходит. На рис. 2 представлены рассчитанные распределения безразмерных концентраций и среднего радиуса частиц аэрозоля.

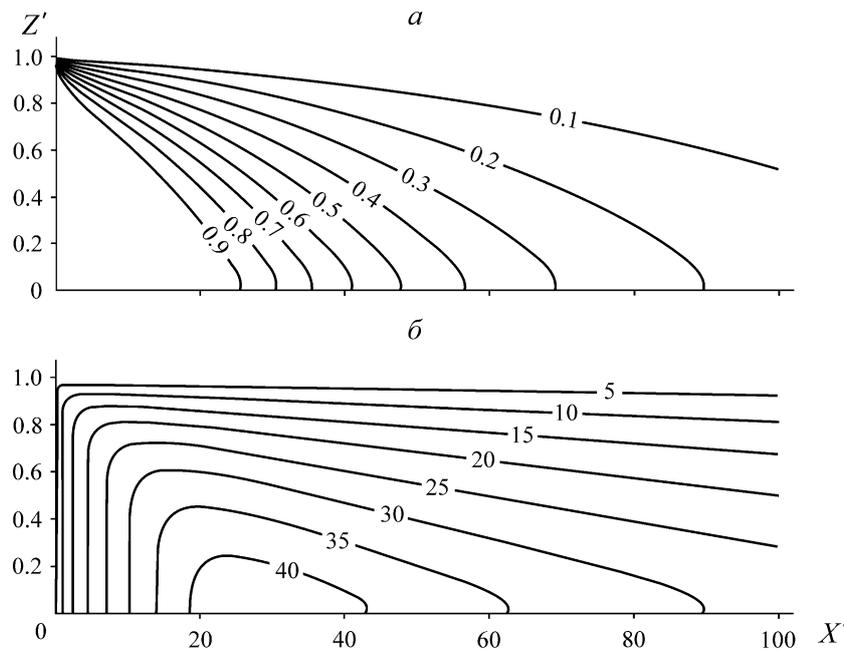


Рис. 2. Распределения безразмерных концентраций (а) и среднего радиуса частиц аэрозоля (б)

Видно, что концентрация аэрозоля распределена неравномерно по горной выработке и убывает по мере продвижения воздушного потока слева направо (рис. 2а). Распределение концентрации аэрозоля имеет выраженную асимметрию, что обусловлено влиянием конвективного слагаемого в вертикальном направлении Z' . В результате коагуляционного роста частиц аэрозоля значение среднего радиуса сначала растет и достигает ~ 40 (рис. 2б). Область, на которой средний радиус имеет максимальное значение, находится вблизи почвы горной выработки. Частицы аэрозоля с таким радиусом быстро оседают на почву выработки за счет возрастающего влияния силы тяжести и не успевают продвинуться дальше. По мере продвижения воздушного потока по длине горной выработки происходит уменьшение среднего размера частиц.

Анализ изменения основных характеристик соляного аэрозоля по длине горной выработки удобно проводить в терминах концентрации и радиуса аэрозоля, усредненных по поперечному сечению горной выработки. На рис. 3 представлены кривые для C'_{cp} при разных начальных концентрациях аэрозоля и различных относительных влажностях воздушного потока. Для более высоких начальных концентраций аэрозоля процесс оседания частиц на стенки горных выработок протекает быстрее (рис. 3а) вследствие более интенсивного процесса коагуляции частиц. Согласно рис. 3б, относительная влажность воздуха оказывает сильное влияние на оседание частиц аэрозоля даже в том случае, когда относительная влажность воздуха превышает критическую влажность (67%) всего на несколько процентов.

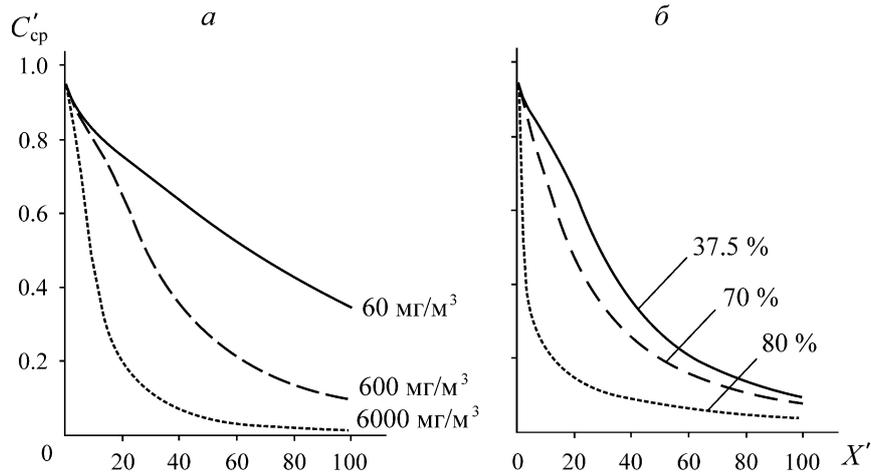


Рис. 3. Распределения средней по сечению концентрации аэрозоля при разных начальных концентрациях (а) и относительных влажностях воздушного потока (б)

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ОСЕДАНИЯ ЧАСТИЦ СОЛЯНОГО АЭРОЗОЛЯ

Как отмечалось, цель настоящего исследования — определение достаточно универсальной функциональной зависимости параметра λ от свойств воздушно-пылевого потока, движущегося по горной выработке. Для этого необходимо иметь приближенное аналитическое решение системы уравнений (21)–(30). В простейшем случае аналитическое решение уравнения (22) при граничных условиях (27), (28) можно получить в предположении малости конвективного слагаемого в вертикальном направлении. Тогда распределение концентрации аэрозоля станет независимым от среднего радиуса его частиц. В уравнении (22) можно отбросить слагаемое, отвечающее за диффузию в продольном направлении горной выработки, поскольку искомый параметр λ по определению не должен учитывать продольную диффузию (она в уравнении (3) учтена отдельно).

Если решить полученное линейное уравнение параболического типа

$$\frac{\partial C'}{\partial X'} = \frac{1}{Pe_T} \frac{\partial^2 C'}{\partial Z'^2} \quad (31)$$

методом разделения переменных, то искомое аналитическое решение будет представлять собой ряд Фурье со следующим первым членом:

$$C' = \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2 X'}{Pe_T}\right) \sin(\pi Z'). \quad (32)$$

Имеет смысл удерживать только первый член, поскольку для рассматриваемых параметров задачи при $X' > 6$ доля остальных членов ряда в общем решении (сумме ряда) составляет $< 5\%$. Соответствующий этому решению размерный параметр равен

$$\lambda = \frac{\pi^2}{Pe_T} \frac{1}{h} = \frac{\pi^2 D_T}{h^2 V_x}. \quad (33)$$

Решение (32) получено при наборе граничных условий, отличных от (27), (28). Граничное условие на выходе из расчетной области не использовалось по причине того, что оно становится избыточным после понижения порядка дифференциального уравнения по перемен-

ной X' с двух до единицы. Граничное условие на входе в расчетную область использовалось в неизменном виде (28). Вместо граничных условий II рода (27), в рамках которых нельзя получить нетривиальное решение задачи методом разделения переменных, использовались граничные условия I рода: $C'|_{z'=0} = C'|_{z'=1} = 0$. Физически выбор таких граничных условий может приводить к более интенсивному оседанию частиц аэрозоля на почве и кровле горной выработки.

Формула (33) учитывает оседание пыли за счет турбулентной диффузии в вертикальном (поперечном) направлении горной выработки, но не учитывает эффекты коагуляции частиц аэрозоля и конденсации влаги на них. Предполагается, что данная формула будет хорошо работать в случае, когда концентрация соляного аэрозоля в горной выработке мала (коагуляция частиц будет протекать медленно), а относительная влажность воздуха ниже критической (конденсация отсутствует).

На рис. 4 представлен сравнительный анализ формулы (33), численного решения системы (22)–(30) и результатов экспериментальных измерений массовой концентрации пыли на вентиляционном штреке одной из лав на руднике ОАО “Беларуськалий”. Экспериментальные замеры проводились с помощью портативного прибора для измерения массовой концентрации аэрозольных частиц Testo CEL-712/K1, работающего в диапазоне $0.001–250 \text{ г/м}^3$ с разрешением 0.001 мг/м^3 . Оседание пыли по аналитической формуле (33) в целом происходит медленнее, чем по данным численного расчета, что связано с неучетом фактора коагуляции, которая ускоряет процесс оседания частиц аэрозоля (см. рис. 3а). На начальном отрезке выработки $0 < X' < 30$ численные расчеты хорошо сходятся с аналитической моделью (радиус частиц аэрозоля еще не успел существенно возрасти в процессе коагуляции частиц). Однако данные экспериментальных исследований на этом промежутке дают существенно более низкие значения, что, скорее всего, связано с тем, что в условиях натурального эксперимента распределение частиц аэрозоля по радиусу в начале участка измерений значительно отличается от однородного. При $X' > 40$ численная модель дает концентрации аэрозоля немного ниже, чем результаты экспериментальных наблюдений, аналитическая модель — немного выше. Физические причины такого рассогласования модельных и экспериментальных данных установить не удалось ввиду того, что в условиях рудника всегда есть множество случайных неучтенных факторов, вызванных протеканием технологических процессов и влияющих на запыленность рудничной атмосферы.

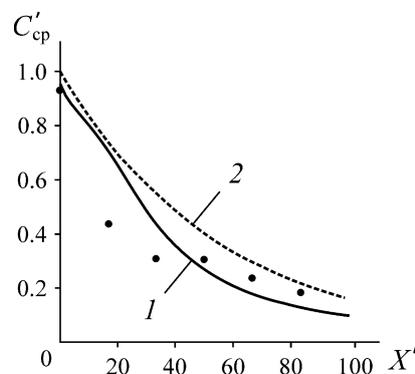


Рис. 4. Изменение средней концентрации аэрозоля по длине горной выработки: 1 — численное моделирование; 2 — аналитическая модель; точки — натурный эксперимент

Формулу (33) можно усовершенствовать на предмет учета процессов коагуляции частиц и конденсации на них влаги путем добавления эмпирических множителей, полученных в результате многопараметрического численного моделирования и последующего поиска аппроксимирующих функций для полученных численных зависимостей. В настоящей работе посредством метода наименьших квадратов для формулы (33) найдены эмпирические множители: F_C (учитывает оседание частиц аэрозоля вследствие их коагуляции) и F_φ (учитывает оседание частиц аэрозоля вследствие конденсации влаги на них):

$$\lambda = 0.3 \frac{\pi^2 D_T}{h^2 V_x} F_C F_\varphi, \quad (34)$$

$$F_C = 1 + 0.0075(h^2 C_0)^{0.67}, \quad (35)$$

$$F_\varphi = 1 + 0.0038(h^2 \Delta\varphi)^{1.8}. \quad (36)$$

Здесь C_0 — начальная концентрация аэрозоля, мг/м³; $\Delta\varphi$ — разница между фактической относительной влажностью воздушного потока и критической влажностью, %. Если фактическая относительная влажность воздушного потока меньше критической влажности, то $\Delta\varphi = 0$. В (34) дополнительно введен множитель 0.3, чтобы исключить слишком быстрое оседание частиц аэрозоля в модели (33), вызванное использованием в ней граничных условий I рода. Значение 0.3 определено в результате сопоставления аналитической модели (33) с расчетными данными на численной модели (21)–(30) в отсутствии процессов коагуляции и конденсации.

ВЫВОДЫ

Получена формула для расчета скорости оседания частиц соляного аэрозоля в горных выработках в поле силы тяжести, учитывающая турбулентную диффузию воздушного потока, процессы коагуляции частиц и конденсации влаги на частицах. Она может использоваться для параметризации математических моделей движения пылевоздушных смесей в вентиляционных сетях калийных рудников. Кроме того, для параметризации математической модели необходимо знать интенсивность пылевыделения в процессе работы горного оборудования (добычных комбайнов, бункеров, перегружателей, конвейеров и пр.). Исследование данных параметров — предмет дальнейших работ авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Медведев И. И., Красноштейн А. Е.** Аэрология калийных рудников. — Свердловск: УрО АН СССР, 1990. — 251 с.
2. **Левин Л. Ю., Исаевич А. Г., Семин М. А., Газизуллин Р. Р.** Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горн. журн. — 2015. — № 1. — С. 72–75.
3. **Magomet R. D., Rodionov V. A., and Solovev V. B.** Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines, *Int. J. Civil Eng. Technol.*, 2019, Vol. 10, Issue 02. — P. 1154–1161.

4. **Бурчаков А. С., Москаленко Э. М.** Динамика аэрозолей в горных выработках. — М.: Наука, 1965. — 68 с.
5. **Кобылкин С. С., Харисов А. Р.** Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки // Зап. ГИ. — 2020. — Т. 245. — С. 531–538.
6. **Родионов В. А., Цыганков В. Д., Жихарев С. Я.** Морфологический состав шахтной угольной пыли и его влияние на взрывопожароопасность горных выработок // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 145–158.
7. **Balaga D., Siegmund M., Kalita M., Williamson B. J., Walentek A., and Malachowski M.** Selection of operational parameters for a smart spraying system to control airborne PM10 and PM2.5 dusts in underground coal mines, *Process Safety Environmental Protection*, 2021, Vol. 148. — P. 482–494.
8. **Jiang W., Xu X., Wen Z., and Wei L.** Applying the similarity theory to model dust dispersion during coal-mine tunneling, *Process Safety Environmental Protection*, 2021, Vol. 148. — P. 415–427.
9. **Kaledina N. O., Kobylkin S. S., and Kobylkin A. S.** The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines, *Eurasian Min.*, 2016, No. 1. — P. 41–44.
10. **Ma Q., Nie W., Yang S., Xu C., Peng H., Liu Z., and Guo C.** Effect of spraying on coal dust diffusion in a coal mine based on a numerical simulation, *Environmental Pollution*, 2020, art. No. 114717.
11. **Казаков Б. П.** Исследование процессов пылеподавления в калийных рудниках кондиционированием воздуха: дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 1973. — 215 с.
12. **Файнбург Г. З., Исаевич А. Г.** Анализ микроциркуляционных потоков между микрозонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // ГИАБ. — 2020. — № 3. — С. 58–73.
13. **Lotz G., Plitzko S., Gierke E., Tittelbach U., Kersten N., and Schneider W. D.** Dose-response relationships between occupational exposure to potash, diesel exhaust and nitrogen oxides and lung function: cross-sectional and longitudinal study in two salt mines, *Int. Archives Occupational Environmental Health*, 2008, Vol. 81, No. 8. — P. 1003–1019.
14. **Исаевич А. Г.** Исследование пылевой обстановки на рудниках ОАО “Беларуськалий”, опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2018. — С. 249–253.
15. **Kruglov Y. V., Levin L. Y., and Zaitsev A. V.** Calculation method for the unsteady air supply in mine ventilation networks, *J. Min. Sci.*, 2011, Vol. 47, No. 5. — P. 651–659.
16. **Венгеров И. Р.** Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 632 с.
17. **Красноштейн А. Е., Файнбург Г. З.** Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников. — Свердловск: УрО РАН, 1992. — 242 с.
18. **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.
19. **Semin M. and Zaitsev A.** On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts, *Thermal Sci. Eng. Progress*, 2020, Vol. 20, art. No. 100760.
20. **Sherwood T. K. and Woertz B. B.** Mass transfer between phases role of eddy diffusion, *Industrial and Eng. Chemistry*, 1939, Vol. 31, No. 8. — P. 1034–1041.
21. **Фукс Н. А.** Механика аэрозолей. — М.: АН СССР, 1955. — 353 с.
22. **Шалимов А. В.** Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д-ра техн. наук. — Пермь, 2012. — 329 с.

- 23. Аджемян Л. Ц., Васильев А. Н., Гринин А. П., Казанский А. К.** Автомодельное решение задачи диффузии пара к зародившейся и растущей в парогазовой среде капле // Коллоид. журн. — 2006. — Т. 68. — № 3. — С. 418–420.
- 24. Жихарев С. Я., Родионов В. А., Пихконен Л. В.** Исследование технологических свойств и показателей взрывопожароопасности каменноугольной пыли инновационными методами // Горн. журн. — 2018. — № 6. — С. 45–49.
- 25. Mason B. J. and Chien C. W.** Cloud- droplet growth by condensation in cumulus, Quarterly J. Royal Meteorol. Society, 1962, Vol. 88, No. 376. — P. 136–142.
- 26. Mason B. J. and Ghosh D. K.** The formation of large droplets in small cumulus, Quarterly J. Royal Meteorol. Society, 1957, Vol. 83, No. 358. — P. 501–507.
- 27. Ольховиков Ю. П.** Крезь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
- 28. Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. — М.: Физматлит, 1959. — 700 с.

*Поступила в редакцию 06/I 2021
После доработки 12/III 2021
Принята к публикации 15/III 2021*