

УДК 622.411.52:532: 62 – 784.4

В.Б. Малеев, В.Б. Гого, Н.И. Скорынин, А.В. Малеев, А.А. Кудрявцев
(ДонНТУ)

МОДЕЛЬ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПЫЛЕВОГО КОЛПАКА НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ШАХТЫ

Исследовано влияние технологических процессов угольных шахт на атмосферный воздух поверхностного комплекса этих предприятий.

Ключевые слова: химический состав, физическая и математическая модель, техногенный пылевой колпак, поверхностный комплекс шахты, концентрация пыли, перенос пыли.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Вследствие чрезвычайно высокой концентрации в Донецкой области промышленных производств, на регион приходится более четверти всех выбросов вредных веществ в атмосферу в целом по Украине.

За счёт сокращения промышленного производства выбросы загрязняющих атмосферу веществ от стационарных источников по сравнению с 2007 годом уменьшилась на 120 тыс. тонн или на 7,3%, но остаются значительными – 1533 тыс. тонн. Свыше 90% областного объёма вредных выбросов стационарными источниками образуются на предприятиях металлургического комплекса, электроэнергетики и угольной промышленности. В результате воздушный бассейн испытывает значительные нагрузки прежде всего в тех городах и районах, где расположены эти предприятия.

Сократить вредные выбросы в атмосферу не позволяют устаревшие технологические процессы и недостаточная эффективность работы очистных сооружений.

В угольной промышленности мощными источниками загрязнения атмосферы являются вентиляторные установки главного проветривания, которые в течение суток выбрасывают в техногенный пылевой колпак, покрывающий шахтный поверхностный комплекс, более 1,5 тонн аэрозольной пыли каждая, создавая при этом превышение ПДК в 2-3 раза. Исследованиями МакНИИ установлено, что во вмещающих породах угольных шахт Донбасса наиболее характерными минералами являются: кварц, полевые шпаты (преимущественно кислые плагиоклазы), слюды (мусковит, серицит, биотит), гидрослюды (иллит, монотермит), минералы группы каолинита и монтмориллонита, кальцит, доломит, магнезит. В качестве примесей распространены сернистые соединения железа (пирит и марказит), окислы, гидроокислы и карбонаты железа, магнетит, лимонит, сидерит. Тяжелые минералы (циркон, турмалин, рутил и др.) встречаются в незначительном количестве. Наиболее важное значение из всех ингредиентов вещественного состава, содержание которых определяет вредность пыли для здоровья, имеют прежде всего свободная, а затем связанная двуокись кремния. Эта пыль агрессивно действует на оборудование поверхностного комплекса, провоцирует опасные заболевания органов дыхания рабочих.

Поэтому моделирование возникновения техногенного пылевого колпака (ТПК) над поверхностью шахтного комплекса является актуальной научной задачей, имеющей практическое приложение.

Анализ исследований и публикаций. Технологические процессы угольных шахт, которые осуществляются в подземных и поверхностных работах, оказывают существенное негативное воздействие на атмосферный воздух поверхностного комплекса шахты выбросами пыли вентиляции, шахтных подъёмов, участков сортировки и погрузки горной массы, котельных, горящих породных отвалов и т.д. Шахтная технологическая пыль вредно действует на здоровье шахтёров, которые вынуждены дышать запылённым воздухом, как в процессах подземных работ, так и на территории шахтного поверхностного комплекса. В работах [1,2] подчёркивается, что поступление вентиляционного воздуха в шахту осуществляется, как правило, с территории её поверхностного комплекса, что создаёт проблемы для системы вентиляции шахты в обеспечении нормативного качества свежего воздуха по пыли. Воздушная среда производственных зон шахты, как на поверхности, так и под землёй наполняется аэрозольной пылью, опасной системным и регулярным негативным воздействием на здоровье шахтеров, и несущей угрозу возможных взрывов.

Динамика основных показателей, характеризующих техногенное воздействие пыли угольных шахт на атмосферу (воздух рабочих зон), свидетельствует о том, что за последние годы абсолютные валовые выбросы пыли в воздух поверхности шахты снижаются в связи с сокращением добычи угля, однако изменение этих показателей отстает от темпов снижения объемов производственной добычи. В угольной отрасли из примерно 400 эксплуатирующихся пылеочистных сооружений 64% не обеспечивают нормативную очистку. Около 30% источников пыли не оснащены пылеулавливающими установками [3].

С вентиляционными выбросами шахт в атмосферу технологического комплекса шахтной поверхности поступает значительное количество угольной пыли, метана, которые могут быть использованы в качестве вторичного энергоресурса для получения тепла и электрической энергии, необходимой для шахты.

Необходимо отметить, что имеющиеся научно-технические разработки главным образом были направлены на создание средств по снижению выбросов пыли в технологических процессах шахтного поверхностного комплекса, связанных с работой главных вентиляторных установок шахты, транспортировкой угля, отвалообразованием, снижением выбросов загрязняющих веществ при сжигании угля в шахтных котельных и сушильных установках на обогатительных фабриках и др. С учетом оценки состояния этих разработок и уровнем реального их использования в условиях угольных шахт целесообразно сформировать направления и основные блоки имеющихся проблем угольной отрасли, которые связаны с охраной труда в аспектах борьбы с пылью.

По нашим оценкам воздушная среда поверхностного комплекса шахты каждую минуту, в среднем, наполняется отработанным вентиляционным воздухом в объёме, примерно, 200 тыс. м³ с концентрацией пыли, примерно, (5-7)мг/м³, что в течение суток составляет выброс 1,5 тонны пыли. Частицы размером более 10 мкм оседают в неподвижном воздухе с возрастающей скоростью и не диффундируют, размером 0,25-10 мкм оседают в воздухе с постоянной скоростью, размером менее 0,25 мкм находятся в непрерывном броуновском движении и энергично диффундируют.

Постановка задачи. Разработать физическую и математическую модели возникновения техногенного пылевого колпака над поверхностью шахтного

комплекса, позволяющие производить экологический мониторинг атмосферного воздуха.

Изложение материала и результаты. Физическая модель процесса загрязнения пылью атмосферы поверхностного комплекса шахты состоит в том, что перенос пыли от источников в воздухе происходит за счет турбулентных процессов газообмена с последующим выпадением пыли на дневной поверхности шахты. В слоях запылённого воздуха наблюдаются значительные положительные (восходящие) градиенты скорости воздушных масс в зонах расположения основных источников пыли, т.к. их температура в течение года не ниже 20°C. К тому же при этих условиях температура запылённого воздуха у поверхности шахты возрастает в сравнении с температурой атмосферы за пределами территории шахты под влиянием солнечной радиации, которая, однако, при вертикальном подъеме воздуха над источником пыли снижается с увеличением высоты.

Математическая модель процесса загрязнения пылью поверхностного комплекса шахты через атмосферу разработана на основе изменения концентрации пыли, выброшенной источником (например, главной вентиляторной установкой), в атмосферный воздух производственного пространства шахты с учётом влияния скорости атмосферного ветра. Для исследования принято известное уравнение переноса частиц пыли в атмосферном воздухе [4, 5]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y}\right) - w \frac{\partial q}{\partial z} + k_s \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{q}{\tau}, \quad (1)$$

где q - массовая концентрация пыли; u, v, w - проекции мгновенных скоростей движения частицы пыли на оси координат x, y, z ; k_x, k_z - коэффициенты турбулентности воздуха по горизонтали и вертикали; τ - время релаксации частицы пыли.

Анализ уравнения (1) показывает, что горизонтальные составляющие скорости переноса частиц пыли (u, v) совпадают с составляющими скорости ветра. Вертикальная составляющая (w) для твердых частиц пыли (< 1 мкм) практически равна вертикальной скорости ветра. В случае крупных частиц пыли (> 1 мкм) под составляющей (w) в уравнении (1) понимаем алгебраическую сумму вертикальной скорости движения воздуха и средневзвешенной (по массе) скорости падения частиц пыли с учетом силы трения о воздух, т.е.:

$$w = w_a - w_g, \quad (2)$$

где w_a - вертикальная составляющая атмосферного воздуха; w_g - средневзвешенная (по массе) скорость падения частиц пыли в воздухе.

Принимаем, что при восходящем движении воздуха $w_a > 0$, при нисходящем - отрицательная, т.е. $w_a < 0$.

Из уравнения (1) следует, что концентрация пыли в фиксированной точке объёма ($\partial q / \partial t$ - локальная производная) изменяется во времени под влиянием ряда факторов, а именно так, что первое слагаемое в правой части уравнения (1) характеризует приток частиц пыли от источников, в точках которых

концентрации пыли и скорости ветра известны. Максимумы концентрации пыли находятся в центре расположения источника выбросов.

В направлении ветра концентрация пыли со временем убывает, а на подветренном направлении ее концентрация со временем возрастет.

Для оценки второго слагаемого уравнения (1) необходимо знать вертикальные профили концентрации пыли и скорости по уравнению (2).

Третье слагаемое в правой части уравнения (1) характеризует распространение (диффузию) пыли на некоторое расстояние от источника. Целесообразно, в соответствии с опытными данными, описывать распределение пыли по горизонтальной поверхности шахты в соответствии с формулой Гаусса [6], т.е.

$$q(x, y, z, t) = S_{\text{exp}}(-0,5R^2\sigma_R^{-2})(2\pi\sigma_R^2)^{-1}q^*(z, t), \quad (3)$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ - расстояние нахождения частицы пыли от оси z , σ_R - среднеквадратическое отклонение расстояния; $q^*(z, t)$ - концентрация пыли, осреднённая по горизонтальной площади на высоте по координате z в момент времени t .

$$q^*(z, t) = \lim_{S \rightarrow \infty} \frac{1}{S} \iint_S q(x, y, z, t) dS. \quad (4)$$

Выражение (4) определяет максимальное значение концентрации пыли в начале координат. Поле концентраций пыли будет симметричным относительно этого начала. С увеличением расстояния от начала координат (R) концентрация пыли убывает по экспоненте, асимптотически приближаясь к нулю (при $R \rightarrow \infty$).

Для заданных среднеквадратических отклонений в виде стандартных величин σ'_R и σ''_R , причем $\sigma'_R < \sigma''_R$, сравним распределение концентраций пыли по горизонтали согласно (3).

При $R = 0$, концентрация пыли $q(0, z, t)$ составит:

$$q'(0, z, t) > q''(0, z, t). \quad (5)$$

Это неравенство сохраняется при малых значениях R . При увеличении R концентрация пыли во втором случае убывает медленнее, чем в первом. На больших расстояниях соотношение между концентрациями пыли примет вид:

$$q'(R, z, t) > q''(R, z, t). \quad (6)$$

Сравнивая (5) и (6), находим, что они противоположны при значениях R близких к нулю. Взяв отношение (5) и (6), определяем, что на больших расстояниях от центра источника пыли это отношение неограниченно растет при увеличении R .

На приток частиц пыли в воздух поверхностного комплекса шахты влияет вертикальный турбулентный обмен, представленный четвертым слагаемым уравнения (1), роль которого оценим ниже.

Пятое слагаемое правой части (1) описывает отток пыли в результате захвата ее каплями и кристаллами атмосферных осадков над территорией шахтного поверхностного комплекса. Под влиянием этого фактора, а также падения частиц пыли в поле силы тяжести происходит определенное самоочищение атмосферы поверхностного комплекса шахты. При

доминирующем действии только этого фактора уравнение (1) примет упрощённый вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{q}{\tau}. \quad (7)$$

Интегрируя (7) при начальных условиях ($q = q_0$ при $t = t_0$) имеем:

$$q(t) = q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (8)$$

Анализируя (8), отмечаем, что: при $t = \tau$ концентрация пыли убывает в 2,72... раза, что раскрывает физический смысл параметра времени «жизни» пыли, т.е. её нахождения (витания) в воздухе. В общем случае концентрация пыли в воздухе поверхностного комплекса шахты является функцией координат и времени. Решение уравнения (1) возможно при его дополнении уравнениями движения, неразрывности и баланса энергии компонентов среды. Кроме этого необходимо учесть полуэмпирические соотношения: функции распределения частиц пыли и капель осадков по размерам; формулы, связывающие коэффициенты турбулентности запыленного воздуха с характеристиками атмосферного ветра над территорией поверхностного комплекса шахты; формулы теории подобия для установления связи между параметрами вертикального обмена и термодинамическими величинами.

Исследуем (1) для частного случая, при котором будут усреднёнными параметрами за некоторый период времени составляющие уравнения так, что $\frac{\partial q}{\partial t} \approx 0$; $u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} \approx 0$.

Горизонтальную диффузию учтем с помощью формулы (3), тогда уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} - w \frac{d\bar{q}}{dz} - \frac{\bar{q}}{\tau} = 0, \quad (9)$$

где \bar{q} — усреднённая масса концентрации пыли.

Значения параметров k_z, w, τ также усреднены по времени и площади поверхности, но являются функциями высоты. Уравнение (9) решается численными методами. Для получения удобных функций дополнительно предположим, что скорость w не зависит от высоты и равна некоторому среднему по слою значению, т.е. $w = const$ в приземном слое ($h = 30\text{ м}$ [2]). Выше приземного слоя k_z не зависит от z . В работе [2] дано его значение:

$$k_z = k_\infty \left[1 + \varepsilon - \exp\left(-\frac{z}{L}\right) \right], \quad (10)$$

где L — масштаб длины; $k(1 + \varepsilon) \approx k_\infty$ значение k_z при $z > h$; $\varepsilon = k_0/k_\infty$, значение k_0 при $z = 0$, а k_∞ при $z \rightarrow \infty$.

Вблизи поверхности шахтного комплекса коэффициент турбулентности линейно растёт с высотой:

$$k_z = k_0 + \frac{k_\infty}{L} z. \quad (11)$$

Інтегруючи (9) при $\tau \rightarrow \infty$ в измерениях высоты, имеем:

$$k_z \frac{d\bar{q}}{dz} - \bar{w}\bar{q} = A. \quad (12)$$

Постоянную интегрирования (A) определим из условия, что на верхней границе пограничного слоя концентрация пыли и турбулентность практически равны нулю, т.е. при $z = H$, $A = 0$.

Уравнение (12) примет вид:

$$-k_z \frac{d\bar{q}}{dz} = (\bar{w}_g - \bar{w}_a)\bar{q}, \quad (13)$$

где \bar{w}_g и $-k_z \frac{d\bar{q}}{dz} = (\bar{w}_g - \bar{w}_a)\bar{q}$ — осредненные по всему пограничному слою скорости падения частиц пыли и вертикального перемещения воздуха.

Уравнение (13) выражает условие, при котором возникает равенство турбулентного потока воздуха и потока частиц пыли, обусловленное действием силы тяжести и сил, действующих при вертикальном движении воздуха, восходящим в циклонах и нисходящим в антициклонах.

Чтобы проинтегрировать (13) введем независимую переменную, связанную с высотой, в таком виде:

$$\eta = (1 + \varepsilon) \exp\left(\frac{z}{L}\right) - 1. \quad (14)$$

Тогда уравнение (13) запишем так:

$$\frac{d\bar{q}}{q} = -\delta \frac{d\eta}{\eta}, \quad (15)$$

где δ — безразмерный параметр, равный

$$\delta = \frac{1}{k_1(1 + \varepsilon)}. \quad (16)$$

Интегрируя (15), получим:

$$\bar{q}(z) = \bar{q}_1 \left(\frac{\eta}{\eta_1}\right)^{-\delta}, \quad (17)$$

где η — экспоненциальная функция высоты; $\bar{q}(z)$ — степенная функция.

По соотношению (17) рассчитываются концентрации пыли на всех интересующих высотах. Для условий поверхностного комплекса шахты особый интерес представляют малые высоты — до 100 м. Для малых высот формула (17) даёт:

$$\eta \approx (1 + \varepsilon) \left(1 + \frac{z}{L}\right) - 1 \approx \frac{z}{L}, \quad (18)$$

$$\bar{q}(z) = \bar{q}_1 \left(\frac{z_1}{z} \right)^\delta.$$

Для высот более 100 м:

$$\eta \approx (1 + \varepsilon) \exp\left(\frac{z}{L}\right) \approx \exp\left(\frac{z}{L}\right), \quad (19)$$

$$\bar{q}(z) = \bar{q}_1 \eta_1^\delta \exp\left(-\delta \frac{z}{L}\right).$$

Для верхней границы приземного слоя (до 30 м) будем иметь:

$$\bar{q}(h) = \bar{q}_1 \eta_1^\delta \exp\left(-\delta \frac{h}{L}\right). \quad (20)$$

Взяв отношение $\frac{\bar{q}(z)}{\bar{q}_n}$ и применив (19) и (16), получим:

$$\bar{q}(z) = \bar{q}_n \exp\left[-(w_g - w_a)k_\infty^{-1}(z - h)\right]. \quad (21)$$

Обозначим, что скорость убывания концентрации $\bar{q}(z)$ при увеличении z зависит от параметров (a) и (b):

$$a = (\bar{w}_g - w_a)k_\infty^{-1}; \quad b = (w_g - w_a)k_1^{-1}. \quad (22)$$

Малые значения параметров (a) и (b) относятся к случаям сильно развитого турбулентного обмена. Это имеет место при больших значениях k_∞ и k_1 в выражении (22). Турбулентный обмен интенсивен в тех случаях, когда наблюдается сильный ветер или термическая неустойчивость слоев запылённого воздуха у поверхности шахты, что особенно наблюдается в местах главной вентиляторной установки шахты.

Выводы и направления дальнейших исследований

Из физического анализа процесса следует, что концентрация пыли на малых высотах повышается у поверхности шахтного комплекса при условии, что масса пыли, поступающей от источника, постоянна. При больших значениях параметров (a) и (b) концентрация пыли снижается с увеличением высоты, вследствие чего ее содержание незначительно на высотах и велико вблизи поверхности шахты. Большие величины (a) и (b) возникают при: слабом развитии турбулентного обмена (низкая скорость ветра, устойчивая температура воздуха у поверхности шахты); значительных размерах частиц пыли; сильных нисходящих движениях атмосферного воздуха у источника пыли вниз, т.е. при антициклонах.

Кроме этого, высокие уровни загрязнения воздуха технологической пылью шахты создаются при слабом ветре, при отрицательной разности температур воздуха у поверхности шахтного комплекса. При совместном действии этих факторов возникает наиболее тяжелая обстановка для проведения производственных и технологических работ на поверхности шахты, а так же для вентиляции шахты, так как содержание пыли в воздухе увеличивается (накапливается) и её концентрация может во много раз превысить ПДК.

При указанных условиях производственного пространства угольной шахты над ее поверхностью возникает устойчивая воздушно-пылевая среда — техногенный пылевой колпак (ТПК).

В дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть вопросы влияния частиц аэрозольной пыли на процессы конденсации газообразных примесей и паров воды в воздухе техногенного пылевого колпака и исследовать размеры ТПК.

Литература

1. Медведев Э.Н. Теория и практика охраны труда на угольных шахтах / Медведев Э.Н., Мартовицкий В.Д., Кашуба О.И., Крутенко С.А., Топчий С.Е. — Макеевка, МакНИИ: ООО «Промдрук», 2006. — 600 с.
2. Петрухин П.М. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / Петрухин П.М., Гродель Г.С., Жилиев Н.И. и др. — М.: Недра, 1981. — 271 с.
3. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности / Под ред. А.С. Кузьмича. — М.: Недра, 1982. — 240 с.
4. Антропогенные изменения климата / Под ред. М.И. Будыко и Ю.А. Израэля. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 403 с.
5. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / Берлянд М.Е. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 272 с.
6. Ганиев Р.Ф. Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии / Ганиев Р.Ф., Кобаско Н.И., Лакиза В.Д. и др. — Киев: Техника, 1980. — 142 с.

© Малеев В.Б., Гого В.Б., Скорынин Н.И., Малеев А.В., Кудрявцев А.А., 2011

Надійшла до редколегії 24.09.2010

УДК 504.054:66.011

О. В. Фурман (ДонНТУ), **М. А. Хоменко** (ВАТ «Авдіївський коксохімічний завод»)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ШИХТИ ЯК ФАКТОРА ВИРІШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ КОКСОХІМІЇ

Досліджено шихту різного марочного складу за показниками хімічного аналізу, пластометричних і петрографічних характеристик. Доведено необхідність формування оптимального складу шихти за результатами петрографічних досліджень. Знайдено рівняння регресії, що дозволяє прогнозувати вміст сірководню в прямому коксовому газів в залежності від показників якості шихти. Підібрано оптимальний склад шихти.

Ключові слова: шихта, петрографічний аналіз, оптимальний склад, коксовий газ, сірководень, математична модель.

Коксохімічне виробництво багатотоннажне, технологічно поєднує безліч найрізноманітніших за характером процесів, агрегатів, апаратів і, внаслідок цього, представляє собою значне джерело забруднення навколишнього середовища. Дефіцит якісної вугільної сировини і зростаючі вимоги до якості коксу — основні проблеми коксохімічних підприємств України [1–3]. Складання вугільних шихт на коксохімічних підприємствах здійснюється переважно емпіричним шляхом на основі результатів дослідних коксувань, але при цьому зовсім не береться до уваги екологічна сторона питання. Тому підбір оптимального складу шихти, який з одного боку характеризується найбільшою спіклівістю для виробництва коксу, а з другого — мінімальним вмістом забруднюючих речовин в зворотному коксовому газі, а також мінімальною