

О методе восстановления параметров выбросов в атмосферу от пылящего неорганизованного источника

А.А.БЫКОВ, М.Ю.ЗАХАРОВ, Е.Л.СЧАСТЛИВЦЕВ

ИВТ СО РАН, Россия

e-mail: zakharovmaxim@mail.ru

Рассматривается задача о пылеобразовании от неорганизованных источников (отвалов, террикопов и т. п.). Приводится модель, позволяющая восстановить дисперсный состав выбрасываемой пыли на основе данных натуральных наблюдений. приводятся модельные расчёты.

Введение

В настоящее время Кемеровская область является основным угледобывающим регионом России. Концентрация производства на незначительной территории вызывает высокую экологическую нагрузку на природные комплексы, в том числе и на атмосферу. Выбросы угледобывающих предприятий, составляющие четверть суммарного по области выброса, содержат большой процент пылевых частиц, загрязняющих не только атмосферу, но и подстилающую поверхность. Поэтому, как научный интерес, так и практическую значимость представляет модельная оценка выпадения и накопления пылевых выбросов на сельскохозяйственных землях, в снеговом покрове, в бассейнах рек и т.д.

Для проведения количественной оценки осаждения твердых частиц на заданную территорию авторами разработана и доведена до практического использования локальная модель расчета суммарного потока пылевых частиц промышленного происхождения на подстилающую поверхность за длительный (год, сезон) промежуток времени [1]. Рассмотрение особенностей построения модели и ее информационного обеспечения [2] показывает, что одной из весьма значимых причин возникновения существенных погрешностей при расчетах является отсутствие информации о дисперсном составе выбросов таких характерных для угледобычи неорганизованных источников как перегрузка угля, работа горной техники, отсыпка и пыление отвалов. Для выяснения свойств отвалов как источников выброса в атмосферу пылевых частиц, рассмотрим их более подробно.

Причиной образования отвалов при разработке угольных месторождений является удаление больших масс покрывающих и вмещающих пород, годовые объемы которых в несколько раз превышают объемы добываемого угля. Породы, поступающие в отвал, образуются за счет проходки выработок, их ремонта и восстановления. В литологическом отношении отвалы представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, углем и другими породами. В них присутствует древесина, металлические предметы. Породы неоднородны по гранулометрическому составу, имеют размер от глинистых частиц до глыб. В зависимости от технологии отвалообразования формируются отвалы следующих типов: конические (терриконы), хребтовые и плоские. Отвалы принимают породу от отдельной шахты, разреза, обогатительной фабрики или от группы угольных предприятий.

Они имеют четко выраженное слоистое строение, предопределенное особенностями технологии отсыпки. Обычным является чередование крупнообломочных слоев со слоями мелочи. Крупные глыбы нередко скатываются к подошве отвала, а максимальное количество мелкого материала (прежде всего глинистого) накапливается в вершинной его части. Таким образом, любой отвал является источником пылевых частиц различного химического и дисперсного состава. Естественно, в случае самовозгорания отвал выбрасывает и газообразные примеси, которые не влияют на процессы осаждения и в дальнейшем не рассматриваются.

Оценить суммарный (без детализации по дисперсному составу) выброс пылевых частиц с поверхности отвала можно с использованием методики [3], используемой для проектных работ. При этом важной информацией как для расчета выброса, так и для расчета дальнейшего загрязнения атмосферы и почвы являются его геометрические размеры. Обзор данных показывает, что на предприятиях Кузбасса характерный горизонтальный размер пылящих отвалов и складов угля изменяется от 30 до 500 метров, а высота от 5 до 60 метров.

Как отмечалось ранее, точность результатов моделирования долгопериодного осаждения во многом зависит от правильного задания параметров источника и его выброса, одним из которых является дисперсный состав выбрасываемых пылевых частиц. Получить данный состав можно, конечно же, путем прямого эксперимента. Однако это не так-то просто, особенно для неорганизованных источников значительных размеров, к которым относятся отвалы. Поэтому в данной работе предлагается рассмотреть возможность восстановления неизвестного дисперсного состава неорганизованного выброса на основе экспериментальных исследований краткосрочного суммарного осаждения пыли на различных расстояниях от источника с параллельной фиксацией метеопараметров. Очевидно, что для этого прежде всего необходима модель расчета осаждения за небольшой интервал времени, порядка 1 часа. Такая модель позволит провести решение вариационной задачи по выбору параметров выброса, обеспечивающих наилучшее соответствие расчета с данными наблюдений. Огромное число необходимых для этого вычислений требует разработки эффективной вычислительной схемы и ее программной реализации.

1. Модель

Рассмотрим модель отвала, которая в простейшем варианте будет выглядеть так, как представлено на рисунке.1, где: H - высота всего отвала, м; U - скорость ветра, м/с; Cl - класс устойчивости атмосферы по схеме Пасквилла [4]. Предположим, что проведен эксперимент, в результате которого удалось измерить количество осевшей пыли ($\text{г}/\text{м}^2$) в нескольких точках X_{c1} , X_{c2} , X_{c3} и т.д. вдоль по ветру с подветренной стороны от источника.

При этом предполагается, что для всего времени T (сек) проведения эксперимента метеорологические параметры, которые определяют процесс переноса примеси, остаются неизменными (тем самым обеспечиваются условия стационарности).

Простейшей краткосрочной стационарной моделью, позволяющей количественно описать процесс распространения и осаждения пылевых частиц в зависимости от параметров источника и метеорологических условий является модель гауссовского факела [4, 5]. Как неоднократно отмечалось в литературе, применительно к расчету осаждения частиц она удовлетворительно работает на незначительных удалениях от источника, что в нашем слу-

чае вполне оправдано.

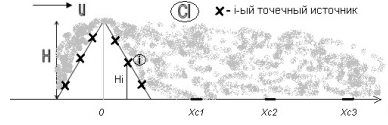


Рис. 1. Сечение отвала вертикальной плоскостью вдоль направления ветра.

Как показано в [6], если точечный источник выбрасывает в атмосферу Q (г/сек) пылевых частиц одинаковой плотности, аэродинамического диаметра и, следовательно, скорости оседания V (м/сек), то выпадение ϖ (г/м²) таких частиц на расстоянии X (м) за время T (сек) на подстилающую поверхность можно рассчитать на основе соотношения, которое для дальнейшего удобно представить в виде

$$\varpi = T \times Q \times F(H, X, U, \sigma_y, \sigma_z, V), \quad (1)$$

где: H - высота выброса (м); U - скорость ветра (м/сек); σ_y, σ_z - дисперсионные коэффициенты, зависящие от класса устойчивости атмосферы и определяющие интенсивность турбулентного перемешивания в поперечном ветру направлении по горизонтали и вертикали [4]. Функция F задается выражением

$$F = \frac{V}{2\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{H - (XV/U)}{\sigma_z}\right)^2\right), \quad (2)$$

а зависимость коэффициентов σ_y, σ_z от расстояния X и класса устойчивости атмосферы можно найти в [4, 5].

Представим поверхность нашего неорганизованного источника в виде совокупности из N областей, каждая из которых имеет одинаковую площадь. Заменим каждую i -ю область точечным источником с номером i , который выбрасывает в атмосферу Q_i ($i = 1, \dots, N$) пылевых частиц с долевым фракционным составом P_j ($j = 1, \dots, K$), где K - число фракций, а $\sum_{j=1}^K P_j = 1$. Тем самым выброс j -ой фракции от i -го источника составляет $Q_{ij} = Q_i \times P_j$. При этом j -я фракция обладает скоростью оседания V_j . В соответствие с (1) получим на расстоянии X_i от i -го условного точечного источника (заменяющего i -ю область) суммарное осаждение на поверхность

$$\varpi_i = T \times \sum_{j=1}^K (Q_i \times P_j \times F(H_i, X_i, U, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}, V_j)) = T \times Q_i \times \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_i, V_j). \quad (3)$$

В предположении единого фракционного состава и однородности выброса со всей площади поверхности отвала получим на расстоянии X от точки с $X = 0$ (рисунок 1) суммарное выпадение Ω_{X_c} (г/м²) от всего отвала (X_{C_i} - расстояние до точки с координатой X_c от i -го точечного источника)

$$\Omega_{X_c} = \sum_{i=1}^N (\varpi_i) = T \times \sum_{i=1}^N Q_i \times \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_{C_i}, V_j) = T \times Q \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_{C_i}, V_j) \quad (4)$$

Поскольку геометрия отвала и его разбиение на точечные источники предполагается известным, то известны все H_i и i . Известны определяющие метеоусловия (скорость ветра U и класс устойчивости Cl), а, следовательно, и диффузионные параметры σ_{yi}, σ_{zi} для каждого точечного источника. Суммарный выброс всего отвала Q можно ориентировочно получить на основе методики [3].

Таким образом, для полной реализации (4) необходимо задать число фракций, дисперсный состав P_j и значения скоростей оседания V_j для каждой фракции частиц. Для первых экспериментов положим $K=5$ и воспользуемся таблицей из [1] для скоростей оседания V_j . Дисперсный состав будем считать неизвестным, хотя ориентировочное его значение можно оценить по литературным данным [7].

Таблица 1. Параметры удаления частиц из атмосферы на подстилающую поверхность

Класс по размеру	Диаметр частиц, мкм	Доля фракции в выбросе P_j	Скорость осаднения на снег, $V_j S$, м/с	Скорость осаднения на почву, V_j , м/с
1.Очень мелкие	<1	P1	0.001	0.002
2.Мелкие	1-10	P2	0.007	0.013
3.Средние	10-50	P3	0.042	0.043
4.Крупные	50-100	P4	0.151	0.155
5.Очень крупные	>100	P5	0.420	0.430

Предположим, что в точках X_{c1}, X_{c2}, X_{c3} (см. рисунок 1) определены суммарные (для всех фракций) значения выпадения пылевых частиц за период времени (например, 1 час или 3600 сек), и эти значения равны $\Omega_{X_{c1}}^d, \Omega_{X_{c2}}^d, \Omega_{X_{c3}}^d$. Попытаемся определить неизвестный дисперсный состав P_j из условия

$$\sum_n (\Omega_{X_{cn}}^d - \Omega_{X_{cn}})^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

Для этой цели разработана вычислительная схема и компьютерная программа, позволяющая проводить циклы расчетов осаднения в заданных точках с различными комбинациями P_j . Принцип варьирования P_j позволяют производить как полный перебор с заданными шагами по P_j , так и использовать закономерности осаднения частиц различных размеров при удалении от источника. Заметим, что представление (4) позволяет после принятия постоянного числа фракций и их постоянной скорости осаднения V_j единожды насчитать матрицу $\|F_{ij}(X_{ci}, V_j)\|$ (размерность $N \times K$) по формуле (2) и затем при варьировании фракционного состава P_j просто пересчитывать линейную форму (4), значительно ускорив тем самым процесс поиска оптимального в смысле (5) набора P_j . Ниже приведены некоторые результаты численных экспериментов.

2. Численный эксперимент

Для проверки работоспособности модели, возьмем ориентировочные данные, имитирующие экспериментальные исследования по осаднению пыли в трех точках на расстоянии 50, 100 и 150 метров от отвала с максимальной высотой $H = 12$ м и шириной сечения 20 м (см. рисунок 1). Длина отвала, т.е. его горизонтальный размер, перпендикулярный плоскости рисунка 1, составляет 100 м. Предположим, что в момент проведения эксперимента скорость ветра была 1 м/сек при классе устойчивости атмосферы D . В течение

часа суммарное осаждение пыли составило $\Omega_1^d = 0.6$, $\Omega_2^d = 0.7$ и $\Omega_3^d = 0.4$ г/м². Ориентировочный суммарный выброс пыли Q со всей поверхности отвала при данной скорости ветра в соответствии с методикой [3] составляет при работе на отвале техники и ветровом сдувании может достигать 8 г/сек.

Разобьем поверхность отвала на 6 точечных источников, отвечающих за участки отвала с одинаковой площадью, и сконцентрируем в них выброс по всей 100-метровой длине отвала. В предположении равномерности выброса с единицы площади получим для каждого из 6-и источников суммарный выброс $Q_i=1.333$ г/сек.

Начальное разбиение по дисперсному составу P_{j1} возьмем на основании литературных данных, приведенным в [5], учитывая, что выделение пыли на действующем отвале обусловлено такими процессами, как выгрузка, формирование и сдувание

Разбиение выброса каждого из 6-и источников по фракционному составу фактически означает то, что каждый из этих источников превращается в 5 самостоятельно действующих, но выбрасывающих частицы только одного из пяти приведенных в таблице 1 размеров.

Таблица 2. Начальное разбиение суммарного выброса по фракциям

Номер фракции j , (табл. 1)	1	2	3	4	5
Начальный состав P_{j1}	0.2	0.37	0.2	0.15	0.08
Выброс $Q_{ij1} = Q_i P_{j1}$, г/сек	0.32	0.592	0.32	0.24	0.128

Пробный расчет с указанными выше метеоусловиями и параметрами выброса (см. рисунок 2) показал, что экспериментальные точки лежат достаточно далеко от расчетной кривой суммарного осаждения на подстилающую поверхность. Причем максимум выпадения лежит заметно ближе к источнику. Физический смысл процесса выпадения частиц с различной скоростью осаждения подсказывает, что направление поиска оптимального фракционного состава P_{j0} в данном случае следует, скорее всего, искать путем увеличении процента мелких и средних частиц при снижении доли крупной фракции. Целенаправленный перебор возможных вариантов P_j с вычислением критерия (5) и остановкой итераций при сумме квадратов отклонения менее 3% от квадрата среднего значения экспериментальных замеров позволил получить один из вариантов "оптимального" дисперсного состава P_{j0} , который приведен в таблице 3. Следует заметить, что в процессе вычислений для проверки критерия (5) потребовалось также изменение суммарного выброса источника Q в сторону увеличения. Величина Q , для которой на рисунке 3 приведен расчет с оптимальным дисперсным составом равна 13.4 г/сек.

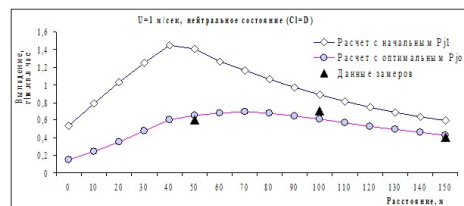


Рис. 2. Сравнение расчётов суммарного выпадения частиц от отвала для начального и оптимального в смысле критерия (5) фракционного состава выброса

Таблица 3. Оптимальное разбиение суммарного выброса по фракциям

Номер фракции j , (табл. 1)	1	2	3	4	5
Начальный состав P_{j1}	0.5	0.27	0.2	0.02	0.01
Выброс $Q_{ij1} = Q_i P_{j1}$, г/сек	1.34	0.724	0.536	0.054	0.027

3. Заключение

Исходя из приведенных численных экспериментов можно сказать, что, зная суммарное количество выпавшего пылевого осадка в нескольких подветренных точках, действительно можно подобрать такой дисперсный состав выброса, при котором расчетные данные будут отличаться от экспериментальных с допустимым для практики отклонением. Привлечение физического смысла процесса осаждения позволяет достаточно надежно выбрать направление поиска оптимального решения.

Таким образом, предлагаемая модель представляется вполне работоспособной и готовой для усвоения данных эксперимента, который планируется провести в окрестности одного из отвалов летом 2011 года.

Список литературы

1. Быков А.А., Счастливец Е.Л., Пушкин С.Г., Климович М.Ю. *Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность*. - Химия в интересах устойчивого развития. - Том 10, No 5, 2002.- с. 563-573.
2. Быков А.А., Счастливец Е.Л., Пушкин С.Г. *Особенности построения и практического применения локальной модели загрязнений почвы техногенными выбросами пылевых частиц*/Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2007. - № 4. - с. 74-82.
3. *Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля*.- Пермь: МНИИЭКО ТЭК, 2003. - 116 с.
4. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей*//под.ред. Ньистадта Ф.Т.М., Ван-Допа Х.- Л.: Гидрометеоздат, 1985.-350 с.
5. Белов И.В., Беспалов М.С., Ключкова Л.В., Павлова Н.К, Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. *Сравнительный анализ некоторых математических моделей для процессов распространения загрязнений в атмосфере*. // - Математическое моделирование, 1999, т. 11, №7
6. Kenneth Wark, Cecil F. Warner. *Air Pollution. Its Origin and Control. A Dun-Donnelley Publisher.* //New York 1976.
7. Быков А.А., Счастливец Е.Л., Пушкин С.Г., Смирнова О.В. *Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона*. // -Ползуновский вестник. №2, 2006. - с.209-217.