

УДК 519.6:551.511.61

**ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ
ОТ ПЫЛЯЩЕГО НЕОРГАНИЗОВАННОГО ИСТОЧНИКА***А. А. Быков, М. Ю. Захаров, Е. Л. Счастливцев***A METHOD FOR RECONSTRUCTION OF A FUGITIVE SOURCE'S
ATMOSPHERIC DUST EMISSION PARAMETERS***A. A. Bykov, M. Y. Zakharov, E. L. Schastlivsev*

Предлагается метод, показывающий возможность восстановления неизвестного дисперсного состава выброса неорганизованного источника на основе экспериментальных исследований краткосрочного суммарного осаждения пыли на различных расстояниях от источника с параллельной фиксацией метеорологических параметров.

We suggest a method to demonstrate the possibility of reconstructing a fugitive source's unknown powder emission. The method is based on experimental studies of short-term integral dust deposition at different distances from the source with simultaneous observation of stable meteorological parameters.

Ключевые слова: неорганизованный источник, дисперсный состав, выброс в атмосферу.

Keywords: fugitive source, powder, atmospheric emission.

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 (почву, снег). Поэтому, как научный интерес, так и практическую значимость представляет экспериментальная 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, с. 563 – 573]. Рассмотрение особенностей построения модели и ее информационного обеспечения [2, с. 74 – 82] 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.

Кратко рассмотрим основные свойства отвалов как источников выброса в атмосферу пылевых частиц.

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 присутствуют 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. Основными производственными процессами, генерирующими выбросы пылевых частиц, являются: выгрузка из самосвалов, формирование отвала бульдозерами и ветровое сдувание. 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 данной работе не рассматриваются. На предприятиях Кузбасса характерный горизонтальный размер пылящих отвалов и складов угля изменяется от 30 до 500 метров, а высота – от 5 до 60 метров.

Важной информацией, как для расчета выброса, так и для расчета дальнейшего загрязнения атмосферы и почвы являются геометрические размеры отвала, состав проводимых на нем работ, влажность материала и т. д. Вся эта информация позволяет оценить суммарный (без детализации по дисперсному составу) выброс пылевых частиц с поверхности отвала на основе методики [3], используемой для проектных работ. Ранее уже отмечалось, что результаты расчета осаждения существенно зависят от корректного задания

параметров источника, одним из которых является дисперсный состав выбрасываемых пылевых частиц, не рассматриваемый в методике [3].

Для точечного организованного источника (труба) получить данный состав можно путем отбора частиц на выходе из трубы с последующим их анализом на распределение по размерам. Однако для неорганизованных источников значительных размеров, к которым относятся отвалы, такое измерение является весьма трудоемким и не вполне определенным. 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 метеорологических параметров. 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. Большое число необходимых для этого вычислений требует разработки эффективной вычислительной схемы и ее программной реализации.

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 на различных удалениях с подветренной стороны от отвала вдоль направления ветра установлено N планшетов, на которые в течение интервала времени T (порядка часа) оседала пыль, выбрасываемая с поверхности отвала. Путем простого взвешивания определено суммарное осаждение частиц всех фракций на каждый планшет. В итоге получаем следующую формализованную задачу.

В точках на расстояниях $X_1, X_2, \dots, X_M$ (м) вдоль оси факела с подветренной стороны от источника с известным выбросом Q (г/сек) известны суммарные осаждения пыли $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_M$ (г/м²). 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). Для временных интервалов порядка часа и менее такое предположение вполне оправданно.

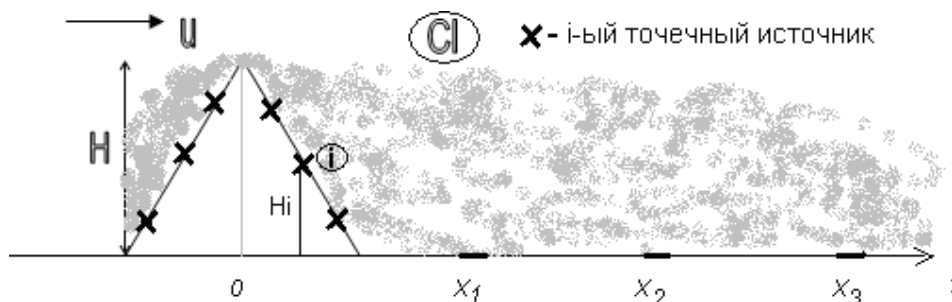


Рис. 1. Схематическое сечение отвала вертикальной плоскостью вдоль направления ветра

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 случае соблюдается.

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

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

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 соответствии с (1) получим в любой точке на расстоянии X_i от i -го условного точечного источника (замещающего i -ю область) суммарное по фракциям 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 поверхности отвала получим на расстоянии X от точки θ (рис.1) суммарное выпадение Ω_{Xc} (г/м²) от всего отвала (X_i – расстояние от i -го точечного источника до точки с координатой X):

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

Поскольку геометрия отвала и его разбиение на точечные источники предполагается известным, то известны все N_i и X_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].

Используя (4), суммарное выпадение для каждой экспериментальной точки X_m ($m=1, \dots, M$) можно представить в следующем виде:

$$\Omega_{X_{CN}} = P_1 \times T \times Q \times \sum_{i=1}^N F_{i1}(X_{Ci}, V_1, H_{Ci}, U) + \dots + P_K \times T \times Q \times \sum_{i=1}^N F_{iK}(X_{Ci}, V_K, H_{Ci}, U). \quad (5)$$

Заметим, что все параметры коэффициента $T \times Q \times \sum_{i=1}^N F_{iK}(X_{Ci}, V_K, H_{Ci}, U)$ нам известны и тогда мы получаем систему линейных уравнений (далее СЛАУ) следующего вида:

$$\begin{aligned} \Omega_{X_{C1}} &= P_1 \times K_{11} + \dots + P_K \times K_{1K} \\ &\dots \\ \Omega_{X_{CN}} &= P_1 \times K_{N1} + \dots + P_K \times K_{NK}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $K_{ij} = T \times Q \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K F_{ij}(X_{Ci}, V_j, H_{Ci}, U)$.

Данную систему линейных уравнений уже можно представить в матричной форме, вида:

$$Au = f, \quad (7)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} K_{11} & \dots & K_{1K} \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{N1} & \dots & K_{NK} \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_K \end{pmatrix}, f = \begin{pmatrix} \Omega_{X_{C1}} \\ \dots \\ \Omega_{X_{CN}} \end{pmatrix}.$$

Легко заметить, что число строк матрицы A соответствует числу экспериментальных точек M , а число столбцов – числу фракций K . Отметим, что если $M < K$, т. е. количество уравнений меньше числа неизвестных, то система получается недоопределенной и решений может быть много. Если $M > K$, т. е. количество уравнений больше числа неизвестных, то система переопределена и решений может не быть вообще. Если $M = K$, то при $\det A = 0$, решений может быть как бесконечно много, так и не быть вообще. Если $\det A \neq 0$, то существует только единственное решение.

Матрица A может быть как незнакоопределенная, особенная или почти особенная ($\det A \approx 10^{-20} - 10^{-30}$). Следовательно, необходимо использовать такую итерационную схему, которая была бы сходящейся, независимо от свойств матрицы A .

В [8] рассматриваются итерационные схемы неполной аппроксимации, для которых доказана сходимость для незнакоопределенных и почти особенных матриц. Если матрица A является особенной, то для решения можно использовать следующую итерационную схему

$$u^{n+1} = u^n - \alpha_{n+1} z^n. \quad (8)$$

Можно показать, что если $z^n \notin \ker A$ и $u^0 = A\varphi, \varphi \in H$ - произвольный вектор, то u^n сходится к нормальному решению нашей системы.

Численный расчет

Для проверки работоспособности модели, возьмем ориентировочные данные, имитирующие экспериментальные исследования по осаждению пыли в пяти точках на расстоянии 50, 100, 150, 200, 250 метров от отвала с максимальной высотой $H=12$ м и шириной сечения 20 м (рис. 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 $\Omega_1=0.6, \Omega_2=0.7, \Omega_3=0.4, \Omega_4=0.4, \Omega_5=0.4$ (все в г/м²). Ориентировочный суммарный выброс пыли Q со всей поверхности отвала при данной скорости ветра в соответствие с методикой [3] составляет при работе на отвале техники и ветровом сдувании 8 г/сек.

Допустим, что число фракций $K = 5$ и воспользуемся таблицей из [1] для скоростей осаждения V_j . Дисперсный состав будем считать неизвестным, хотя его ориентировочное начальное 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 осаждения на снег, V_p , м/с	Скорость осаждения на почву, V_p , м/с
1. Очень мелкие	<1	P_1	0.001	0.002
2. Мелкие	1-10	P_2	0.007	0.013
3. Средние	10-50	P_3	0.042	0.043
4. Крупные	50-100	P_4	0.151	0.155
5. Очень крупные	>100	P_5	0.420	0.430

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_{jl} возьмем на основании литературных данных, приведенных 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 самостоятельных действующих, но выбрасывающих частицы только одного из пяти приведенных в таблице 1 размеров.

Таблица 2

Начальное разбиение суммарного выброса по фракциям

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

Ниже представлен результат, полученный в результате расчета в написанной программе.

Таблица 3

СЛАУ для нахождения доли фракций P_j

$X_m, м$	Скорость осаждения, $V_p, м/с$				
	0.001	0.007	0.042	0.151	0.42
50	0.0001364456	0.0009839609	0.0069089814	0.036485250	0.140850191
100	0/0000677387	0/0004839190	0.0032396138	0.014899939	0.045319076
150	0.0000412917	0/0002944423	0.0019467192	0.008425663	0.018077469
200	0/0000279032	0/0001985948	0.0012961175	0.005270411	0.008224755
250	0/0000201027	0/0001428403	0.0009217855	0.003552129	0.004268615

Таблица 4

Восстановленное разбиение суммарного выброса по фракциям

Номер фракции j , (таб. 1)	1	2	3	4	5
Оптимальный состав, P_{jo}	0.49975	0.270041	0.199	0.02	0.0099

Определитель нашей матрицы равен $1.41 \cdot 10^{-23}$, что говорит о плохой обусловленности матрицы. Таким образом, решение нашей системы линейных уравнений оказывается неустойчивым.

Применяя к нашей системе метод минимальных невязок, мы получаем решение P_{jo} , приведенное в таблице 4. Полученное решение можно назвать оптимальным, поскольку оно характеризует распределение по размерам частиц суммарного выброса пыли, при котором кривая расчетного осаждения наиболее близко проходит к экспериментальным точкам.

Заключение

Исходя из приведенного численного расчета, можно сказать, что определив экспериментально суммарное количество выпавших пылевых частиц в нескольких точках по ветру от источника, действительно можно определить 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 в 2012 году.

Литература

1. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, М. Ю. Климович // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – Т. 10. – № 5.
2. Быков, А. А. Особенности построения и практического применения локальной модели загрязнений почвы техногенными выбросами пылевых частиц / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 4.
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-Дона Х. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 350 с.
5. Сравнительный анализ некоторых математических моделей для процессов распространения загрязнений в атмосфере / И. В. Белов, М. С. Беспалов, Л. В. Клочкова [и др.] // 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. Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, О. В. Смирнова // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2.
8. Захаров, Ю. Н. Итерационные методы решений систем линейных алгебраических уравнений: учеб. пособие / Ю. Н. Захаров. – Кемерово: КемГУ, 2011.

Информация об авторах:

Быков Анатолий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-913-123-03-70, e-mail: bykov@icc.kemsc.ru

Bykov Anatoly Aleksandrovitch – Candidate of Physics and Mathematics, senior researcher at Kemerovo branch of the Institute for Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Захаров Максим Юрьевич – аспирант Институт вычислительных технологий СО РАН, e-mail: zakharovmaxim@mail.ru

Zakharov Maksim Yurievich – post-graduate student at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Счастливцев Евгений Леонидович – доктор технических наук, заведующий лабораторией Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-903-944-52-68, e-mail: zavlab@icc.kemsc.ru

Schastlivtsev Evgeniy Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.