

УДК 622.4: 519.67

ЭФФЕКТ СКОРОСТИ ВЕТРОВОГО ПОТОКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЫЛЕНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

¹Маслобоев В.А., ^{1,2}Бакланов А.А., ³Амосов П.В.

¹Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН,
Апатиты, e-mail: masloboev@ksc.ru;

²Всемирная метеорологическая организация, Женева, e-mail: aabaklanov@yahoo.com;

³Горный институт Кольского НЦ РАН, Апатиты, e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

Апробированы два наиболее приемлемых и общепризнанных методов по оценке интенсивности пыления (пустыни, хвостохранилища и др.): зависимость Westphal et al. (1988) и схема DEAD (1995). Продемонстрирован авторский переход к определению динамической скорости u_d для произвольной высоты пылящей поверхности, что необходимо для выполнения оценки интенсивности пыления. Реализация перехода выполнена на базе двухмерной численной модели аэродинамики атмосферы на примере хвостохранилища вблизи г. Апатиты. Представлены результаты расчетов и обработки горизонтальной скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью при вариации скорости ветрового потока от 5 до 23 м/с. Указаны особенности поинтервальной (по размерам песчинок) интенсивности пыления хвостохранилища АНОФ-2 с использованием рассмотренных методов интенсивности пыления при вариации скорости ветра. Значения интенсивности пыления для наиболее часто повторяемой скорости ветрового потока близки показателю «максимальной удельной сдуваемости пыли», которая используется инженерными организациями при разработке документации по оценке воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: интенсивность пыления, скорость ветрового потока, методический подход, динамическая скорость

THE EFFECT OF WINDFLOW VELOCITY ON DUSTING INTENSITY OF TAILINGS

¹Masloboev V.A., ^{1,2}Baklanov A.A., ³Amosov P.V.

¹Institute of the Industrial Ecology Problems of the North KSC RAS, Apatity, e-mail: masloboev@ksc.ru;

²World Meteorological Organization, Geneva, e-mail: aabaklanov@yahoo.com;

³Mining Institute KSC RAS, Apatity, e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

Two most acceptable and generally adopted methods of dusting intensity assessments (for deserts, tailing dumps, etc.), i.e. the dependence of Westphal et al. (1988) and the DEAD scheme (1995), were tested. The authors demonstrate an approach to determine dynamic velocity u_d for any height of dusting surface, which is necessary for assessment of dust intensity. The demonstration is fulfilled based on two-dimensional numerical model of atmospheric aerodynamics on example of the tailing dump in the vicinity of the city of Apatity. The horizontal velocity at the height of +10 m above the dusting surface with the wind velocity ranging between 5 and 23 m/sec is calculated and processed. The peculiarities of interval (size of sand particles) dust intensity of the tailing dump of ANPP-2 are shown using the considered methods for dusting intensity with wind velocity variations. The dust intensity values for the most frequently occurring wind-flow velocity are close to «maximum specific dust off value» which is used by engineering organizations for planning documentations for environmental impact assessments.

Keywords: intensity of dusting, velocity of wind flow, methodic approach, dynamic velocity

Данная работа является естественным продолжением исследований специалистов КНЦ РАН по проблеме пыления хвостохранилищ на базе методов численного моделирования. В определенной мере информация, представленная в публикациях [3, 4, 6], является авторским взглядом на проблему интенсивности пыления на начало 2012 г.

Более глубокое «погружение» в проблему позволило авторам на основе анализа существующих подходов по оценке интенсивности пыления (пустыни, хвостохранилища и др.) существенно продвинуться в понимании как сопровождающих процесс пыления физических механизмов, так и их математического описания. Некоторые результаты выполненного исследования представлены

в докладах на российских и международных конференциях [1, 2, 7].

В частности, были рассмотрены подходы по оценке интенсивности пыления, приемлемые для решения практических задач по исследованию влияния скорости ветрового потока на уровень интенсивности пыления хвостохранилища АНОФ-2, а значит, и на загрязнение атмосферы для района г. Апатиты при северо-западном ветре. По результатам анализа сделан предварительный вывод, что наиболее приемлемыми для последующих исследований загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по ветровому потоку могут быть признаны зависимость D.L. Westphal et al. [9] и схема DEAD [8]. Именно эти зависимости дают минимальное расхождение результатов

на всем рассмотренном диапазоне скорости ветрового потока. Отметим, что оба подхода базируются на функциональной зависимости потока массы пыли от динамической скорости на высоте пыления в 4-й и 3-й степенях соответственно.

При рассмотрении турбулентного переноса пыли с хвостохранилища АНОФ-2 представляется разумным ограничиться частицами, размер которых не превышает 70 мкм.

Авторский подход к оценке динамической скорости

На рис. 1 представлена схема модели, которая принимается для обоснования величины скорости, необходимой для оценки вертикального потока массы частиц (интенсивности пыления). Основная идея – динамическая скорость на высоте пылящей поверхности u_* определяется через осредненную горизонтальную компоненту референтной скорости ветра набегающего потока на высоте +10 м u_{ref} на основе численных расчетов для различной высоты пылящей дамбы.



Рис. 1. Схема модели под обоснование методики определения интенсивности пыления

На входной границе модели рассмотрим диапазон значений референтной скорости ветра u_{ref} на высоте 10 м над основанием модели (от 5 до 23 м/с, например, с шагом 3 м/с). Задавая логарифмический профиль скорости на входной границе области (шероховатость принимается на уровне 0,05 м), выполняем расчет аэродинамики на базе стационарной стандартной $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности [3, 4, 6]. Далее выполняем обработку расчетных аэродинамических параметров вдоль пунктирной линии рис. 1: операцию осреднения горизонтальной компоненты скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью u_{10} . Результаты обработки численных экспериментов для горизонтальной скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью, а также переход к динамической скорости u_* обобщены в табл. 1.

Дополнительно для последующего использования при численном решении

уравнения конвективно-диффузионного переноса пыли выполнено осреднение (по области моделирования) значений коэффициентов динамической турбулентной вязкости. Результаты этой операции приведены в табл. 1. Последующий переход к значениям коэффициентов турбулентной диффузии стандартен, ранее использован и описан авторами в работах [3, 4, 6].

Гранулометрический состав (в графической форме) отвальных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2 приведен в диссертационной работе А.В. Стриженок [5]. Обработка информации позволила авторам получить количественные показатели по долям («вес» интервала) каждого моделируемого интервала размера частиц пыли (табл. 2). В табл. 2 также приведены значения пороговой скорости u_*^p для пыли интервала крупности p до 70 мкм в диаметре с шагом 10 мкм, рассчитанные по методике авторов работы [8]), а также скорости оседания разнокалиберной пыли, вычисленные в Сток-

совом приближении [3] и необходимые для последующих вычислений конвективно-диффузионного переноса.

Таблица 1

Осредненные значения горизонтальной скорости на высоте +10 м u_{10} , динамической скорости u_* на высоте поверхности пыления и турбулентной динамической вязкости η_t

Скорость u_{ref} , м/с	u_* , м/с	u_{10} , м/с	η_t , Па·с
1	2	3	4
5	0,623	8,246	0,4086
8	0,996	13,19	0,6563
11	1,370	18,14	0,9053
14	1,743	23,09	1,1554
17	2,117	28,04	1,4067
20	2,490	32,98	1,6593
23	2,863	37,93	1,9136

Таблица 2

Значения «веса» интервала, пороговой скорости и скорости оседания в зависимости от среднего диаметра частиц пыли

Срединный диаметр (диапазон интервала), мкм	«Вес» интервала, –	Пороговая скорость u_*^p , м/с	Скорость оседания w_g , м/с
1	2	3	4
5 (0–10) D1	0,022	0,951	0,00195
15 (10–20) D2	0,083	0,420	0,0175
25 (20–30) D3	0,142	0,295	0,0487
35 (30–40) D4	0,194	0,243	0,0955
45 (40–50) D5	0,209	0,218	0,1580
55 (50–60) D6	0,189	0,206	0,2360
65 (60–70) D7	0,161	0,201	0,3290

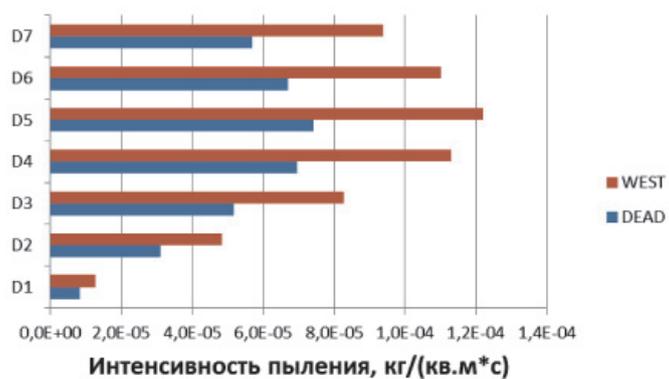
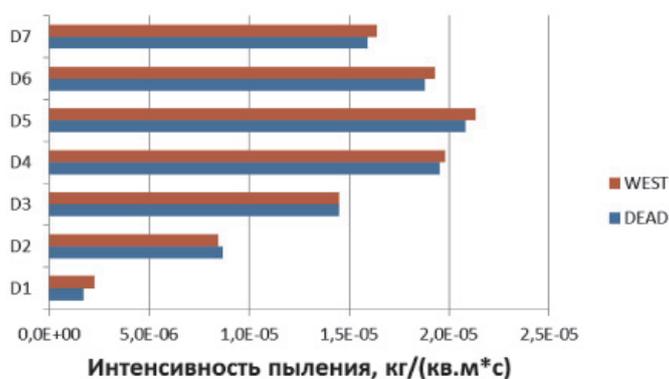
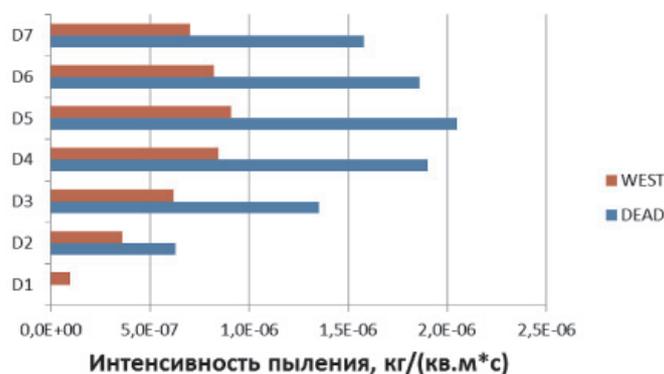


Рис. 2. Поинтервальные интенсивности пыления при вариации скорости ветра: а – 5 м/с; б – 11 м/с; в – 17 м/с

Анализ интенсивности пыления

Некоторые результаты вычислений поинтервальных вертикальных потоков массы для схемы DEAD [8] и зависимости D.L. Westphal et al. [9] при вариации скорости ветра с использованием необходимых параметров, приведенных в табл. 1 и 2, представлены на рис. 2 ((а) 5 м/с, (б) 11 м/с и (в) 17 м/с).

Безусловно, яркой особенностью расчетных интенсивностей пыления, выполненных для схемы DEAD, является отсутствие числового значения при скорости ветра 5 м/с для самой мелкой пыли D1 (срединный диаметр 5 мкм). Данный факт имеет очевидное объяснение: величина пороговой скорости (табл. 2, 3-й столбец, 2-я строка) выше значения динамической скорости (табл. 1, 2-й столбец, 2-я строка), т.е. в рамках данной модели (схема DEAD) эмиссии пыли такой крупности не происходит.

Анализ показывает, что при малых скоростях ветрового потока (не более 8 м/с) практически для пыли любой крупности значения интенсивности пыления, рассчитанные по схеме DEAD (рис. 2, а), несколько выше аналогичных расчетных данных по зависимости D.L. Westphal et al. При величине скорости ветрового потока 11 м/с результаты расчетов интенсивности пыления по обоим используемым подходам наиболее близки (рис. 2, б). Дальнейшее увеличение скорости ветра (встречается существенно реже) приводит к тому, что расчетные (по зависимости D.L. Westphal et al.) интенсивности пыления заметно превышают аналогичные величины, вычисленные с использованием схемы DEAD (рис. 2, в).

Обобщением расчетных данных являются кривые рис. 3, а и б, на которых представлены суммарные интенсивности пыления при вариации либо скорости ветрового потока, либо расчетной величине динамической скорости на высоте пыления соответственно. Поведение кривых рис. 3, а и б подтверждают указанный выше факт: до величины скорости ветрового потока 11 м/с превалирует кривая интенсивности пыления по схеме DEAD, а при более высокой скорости – кривая по зависимости D.L. Westphal et al. Пересечение кривых происходит вблизи отметки 11 м/с.

Построенные кривые описываются степенными функциями AV^n в 4-й (зави-

симость D.L. Westphal et al.) и 3-й (схема DEAD) степенях либо скорости ветрового потока, либо расчетной величине динамической скорости на высоте пыления. Коэффициенты пропорциональности A в степенных зависимостях следующие: для рис. 2, а: I – 8,031 и II – 6,987; для рис. 2, б: I – 3,877 и II – 2,896. Размерность скорости V в обоих случаях м/с.

Расчетные данные интенсивности пыления необходимы при решении конвективно-диффузионного уравнения распространения пыли при описании граничных условий на поверхности пыления. В силу того, что указанное уравнение является линейным, достаточно будет выполнить численные эксперименты по пространственно-временному распределению концентрации пыли в исследуемой области, например, для данных зависимости D.L. Westphal et al.. Зная соответствующие отношения интенсивностей пыления, пересчитываем значения концентрации пыли, отвечающие эмиссии пылевых частиц по схеме DEAD. В результате прогноз пространственно-временного распределения концентрации пыли будет определяться в некотором диапазоне значений.

Естественно, авторы понимают, что для верификации численной модели необходимо проведение трудоемких экспериментальных исследований на объекте пыления, что, к сожалению, не может быть реализовано по целому ряду причин. Предпринята попытка проверить на объективность полученные значения интенсивности пыления. Для этого проанализированы данные отчета «Реконструкция хвостохранилища до отметки 200 м: проектная документация. Раздел 8 «Перечень мероприятий по охране окружающей среды», посвященного реконструкции хвостохранилища АНОФ-2 до высотной отметки 200 м. Специалисты ЗАО «Механобр Инжиниринг» используют показатель – «максимальная удельная сдуваемость пыли». В своих оценках авторы указанного отчета используют значение $5,29 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с), что в представленных на рис. 3, б графических зависимостях отвечает значению динамической скорости не выше 0,6 м/с.

Выводы

Проанализированы два подхода по оценке интенсивности пыления (зависимость D.L. Westphal et al. и схема DEAD),

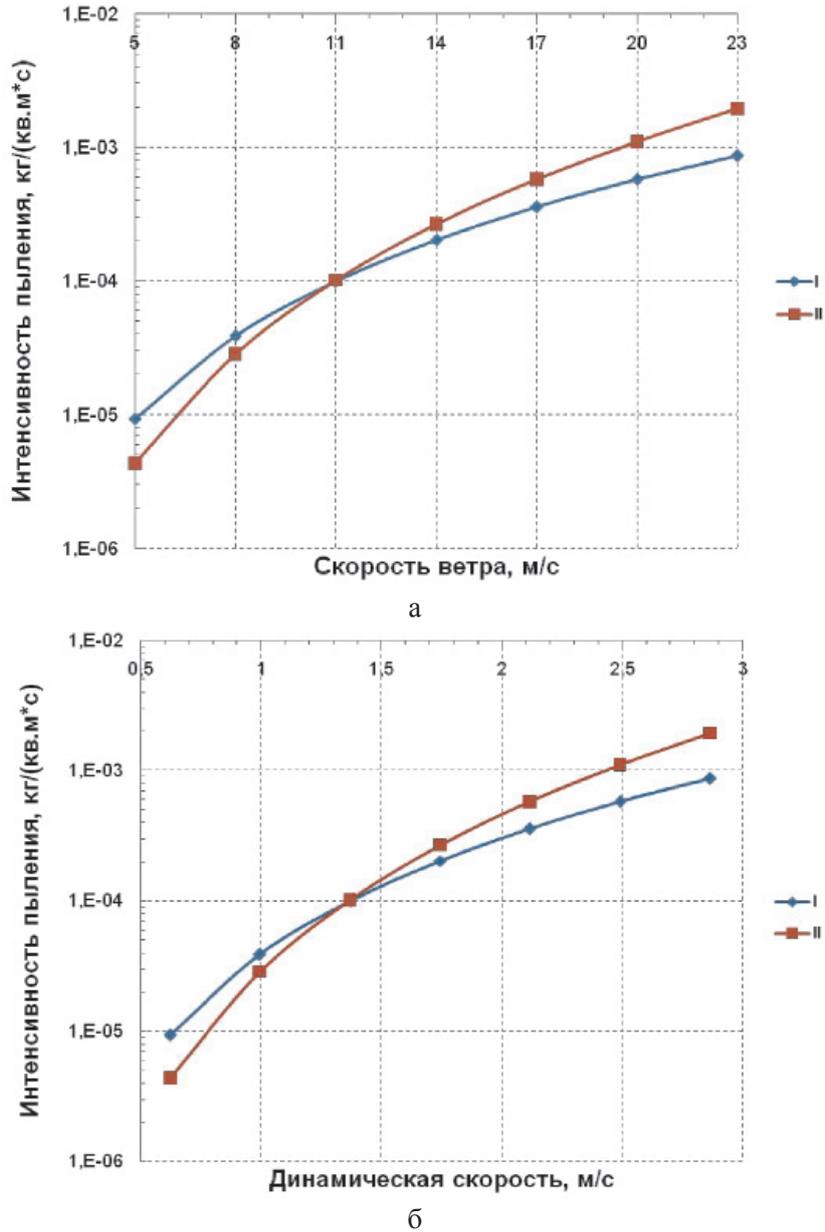


Рис. 3. Расчетные суммарные интенсивности пыления в зависимости:
 а – от скорости ветрового потока на референтной высоте;
 б – от динамической скорости на высоте пыления;
 I – схема DEAD (ромб); II – зависимость Westphal D.L. et.al. (квадрат)

которые, по мнению авторов, наиболее приемлемы для решения практической задачи о влиянии скорости ветрового потока и высоты пылящей поверхности на загрязнение атмосферы (на примере хвостохранилища АНОФ-2). Оба подхода базируются на функциональной зависимости потока массы от динамической скорости на высоте пыления в 4-й и 3-й степенях соответственно.

Продемонстрирован достаточно простой и нетрудоемкий переход к определению динамической скорости u_* и скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью u_{10} по данным референтной скорости ветра набегающего потока и высоты дамбы. Указанные величины, определяемые на базе созданной двумерной численной модели аэродинамики атмосферы исследуемой области,

позволяют осуществить оценки интенсивности пыления.

Выполнен сравнительный анализ расчетных значений поинтервальной интенсивности пыления на базе выбранных подходов при вариации скорости ветрового потока в широком диапазоне. Указан экономичный путь дальнейших численных экспериментов по прогнозу пространственно-временного распределения поинтервальной концентрации пыли, основанный на линейной природе конвективно-диффузионного уравнения и выполненном анализе расчетных вертикальных потоков массы пыли с использованием зависимости D.L. Westphal et al. и схемы DEAD.

Список литературы

1. Амосов П.В., Бакланов А.А. К вопросу оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 1 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. Ун-т, 2015. – С. 3–5.
2. Амосов П.В., Бакланов А.А. Оценка вертикального потока массы пыли на хвостохранилище на базе схемы DEAD // Проблемы недропользования. – 2015. – № 3. – С. 80–85.
3. Амосов П., Бакланов А., Ригина О. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 109 с.
4. Маслобоев В.А., Бакланов А.А., Мазухина С.И., Ригина О.Ю., Амосов П.В. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 376–384.
5. Стриженок А.В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: дис. ... канд. техн. наук. – 2015. – URL: http://www.spmi.ru/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/dissertaciya_strizhenok.pdf (дата обращения 12.09.2015).
6. Amosov P.V., Baklanov A.A., Masloboev V.A., Mazihkina S.I. CFD-model developing of dust transfer at a tailings dump // Proceedings of the 4-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management – CRETE-2014, 2–5 September 2014, Chania, Crete, Greece. Executive Summaries. – Chania: Technical University of Crete, 2014. – P. 279–280.
7. Amosov P.V., Baklanov A.A. Assessment of dusting intensity on ANOF-2 tailing by using a Westphal D.L. dependency // Proceedings / X International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development, 4–7 November 2015, Bor, Serbia; [organizer] University of Belgrade, Technical Faculty Bor; editor Zoran S. Markovic. Bor: University of Belgrade, Technical Faculty, 2015 (Bor: Tercija). – P. 39–43.
8. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the Atmospheric Dust Cycle 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme // Journal of Geophysical Research-Atmospheres. – 1995. – Vol. 100. – № D8. – P. 16415–16430.
9. Westphal D.L., Toon O.B., Carlson T.N. A Case-Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1988. – № 45. – P. 2145–2175.