

мальные затраты на сбор и транспортировку подсланевой воды.

Таким образом, анализ процессов образования загрязненной воды на судах показывает, что, несмотря на определенные достижения специалистов по защите окружающей среды при эксплуатации судов, существует перспек-

тива достижения положительного эффекта в исследуемой области при уменьшении образования загрязненной воды на судах, а также при разделении стока сточной воды и разнесения технологических операций по очистке воды и оптимального применения судовых и внесудовых природоохранных технических средств.

Список литературы

1. Туровский И. С. Обработка осадков сточных вод. — М.: Стройиздат, 1984.
2. Жуков А. И., Монгайт И. Л., Родзиллер И. Д. Методы очистки производственных сточных вод. — М.: Стройиздат, 1984.
3. Евилович А. З. Утилизация осадков сточных вод. — М.: Стройиздат, 1989.
4. Владимиров А. М. Охрана окружающей среды. — М.: Москва, 1991.
5. Яковлев С. В. Очистка производственных сточных вод. — М.: Стройиздат, 1979.
6. Новиков Ю. В. Экология, окружающая среда и человек. — М.: Москва, 1998.
7. Наставление по предотвращению загрязнения внутренних водных путей при эксплуатации судов РД 152-011-00. — М.: Москва, 2000.

УДК 628.511.001.57:656.62.073.28:689.46

Д. Н. Костюничев,

канд. техн. наук,
ФГОУ ВПО «Волжская государственная
академия водного транспорта»;

Н. С. Отделкин,

д-р техн. наук,
ФГОУ ВПО «Волжская государственная
академия водного транспорта»

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ И ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ОТКРЫТЫХ СКЛАДОВ С СЫПУЧИМИ ГРУЗАМИ

EVALUATION OF LOSSES AND NEGATIVE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF OPEN STORAGE OF BULK CARGOES

В статье представлен метод исследования на моделях процесса пылеуноса сыпучих грузов с открытых складов и результаты применения данного метода для оценки потерь и загрязнения окружающей среды.

The article presents a method of research on models of dusting of bulk materials with open storage and the results of applying this method to evaluate losses and environmental contamination.

Ключевые слова: сыпучие грузы, открытый склад, потери.

Key words: bulk cargo, outdoor storage, loss.

СЫПУЧИЕ материалы широко применяются в промышленности для различных целей. Некоторые сыпучие материалы являются природными образованиями — песок, гравий, уголь, но основная их масса — продукт деятельности человека: рудные и химические концентраты, каменный уголь, гранулированные материалы. Номенклатура сыпучих материалов, особенно сырьевых, неуклонно растет, это связано с их технологичностью в транспортных и перерабатывающих операциях.

Морские и речные порты, являясь крупными транспортными узлами по перевалке различных грузов, из которых более половины составляют сыпучие, своей эксплуатационной деятельностью оказывают отрицательное воздействие на атмосферный воздух, почву и акваторию порта. Наиболее ощутимо это влияние проявляется вследствие пыления и пылеуноса при перегрузочных операциях с сыпучими грузами и особенно при их хранении на открытых складах (как оперативных, так и накопительных). Причем открытые портовые склады с сыпучими грузами не только отрицательно воздействуют на окружающую среду, но и обуславливают невозвратные потери за счет пылеуноса груза.

Портовые открытые склады с сыпучими грузами, склонными к пылению, относят к неорганизованным источникам загрязнения, а величины пылевых выбросов с указанных складов определяют по методикам, разработанным бывшими министерствами речного и морского флота и Ленморниипроектom.

Однако указанные методики не учитывают влияние геометрических размеров открытых складов и направление ветровых потоков на величину пылевыбросов и не позволяют определять с приемлемой точностью размер потерь сыпучих грузов от пылеуноса.

В данной статье предлагается метод прогнозирования величины запыленности воздуха и размеров потерь груза от пылеуноса с открытого склада, основанный на методах подобия и анализа размерностей.

Факторы, влияющие на интенсивность пылеобразования при хранении сыпучих грузов на открытых складах, можно разбить на две группы [1, 2]:

— физико-механические и химические свойства сыпучего груза;

— параметры открытого склада и характеристика внешних воздействий.

К основным физико-механическим параметрам и химическим свойствам сыпучих грузов, которые характеризуют их пылеобразующую способность, относятся:

— фракционный состав и форма частиц;

— влажность груза и его смачиваемость;

— плотность частиц, определяющая скорость их оседания;

— насыпная плотность груза.

Решающее влияние на интенсивность пылеобразования при открытом способе хранения сыпучих грузов оказывают: геометрические размеры открытого склада; продолжительность нахождения груза на складе и характеристики ветровых потоков, воздействующих на склад.

Необходимо отметить, что процесс пылеобразования при воздействии ветровых потоков на открытый штабель с сыпучим грузом является недостаточно изученным процессом.

Прогнозирование пылевых выбросов при открытом хранении сыпучих материалов требует прежде всего разработки физической модели, подобной конкретному объекту природы.

Методы физического моделирования, основанные на теории подобия и размерностей, рассматриваются как приближенные методы анализа процессов при замещении реального объекта подобной ему моделью. Значимость этих методов возрастает при решении поисковых и прогнозных задач, когда структура и состав уравнений, описывающих процесс, не точны или недостаточно надежны. К числу таких задач относится образование пылевоздушных потоков при открытом хранении сыпучих грузов.

Процесс пылеобразования при открытом хранении сыпучих грузов следует рассматривать как систему, включающую следующие процессы:

— сдувание груза с поверхности штабеля открытого склада;

— распространение взвешенных частиц пыли ветровыми потоками.

В общем случае эти процессы не могут рассматриваться как независимые, но решение задачи в таком виде является сложным и трудоемким. Поэтому будем считать, что указанные процессы системы независимы друг от друга, то есть решение задачи пылеобразования будем основывать на отдельном

моделировании, которое апробировано в работе [3].

Для определения критериев подобия необходимо выявить все параметры, характеризующие изучаемые процессы. Определяющие параметры, характеризующие процесс пылеуноса сыпучего материала с поверхности открытого склада, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Совокупность определяющих параметров процесса пылеуноса пылящего материала с поверхности штабеля открытого склада

Наименование параметров	Обозначение величины	Единица измерения	Формула размерности	Обозначение масштаб подобия
Размеры открытого склада (штабеля):				
длина	l	м	L	k_l
ширина	b			k_b
высота	h			k_h
Скорость ветра	v	м/с	LT^{-1}	k_v
Направление ветра относительно продольной оси штабеля	φ	рад	-	k_φ
Вес частицы	σ	Н	LMT^{-2}	k_σ
Количество унесенной пыли в единицу времени	q	кг/с	MT^{-1}	k_q
Время ветрового воздействия	t	с	T	k_t

Осуществление модели процесса пылеуноса сыпучего материала с поверхности штабеля требует выполнения следующих условий подобия:

- геометрического;
- взаимодействия ветра с поверхностью штабеля склада;
- однозначности граничных условий.

Геометрическое подобие означает, что отношение всех соответствующих длин в модели и натуре должны быть одинаковы. Поэтому геометрическое подобие имеет вид:

$$\frac{l_n}{l_m} = k_l, \quad (1)$$

где: l_n, l_m — соответствующие длины соответственно в натуре и модели, м;

k_l — константа или масштаб геометрического подобия.

Процесс сдувания сыпучего груза с поверхности штабеля открытого склада можно описать уравнением

$$q = f(l, b, h, v, \varphi, t, \sigma). \quad (2)$$

Согласно π -теореме, количество критериев подобия можно образовать из системы определяющих параметров:

$$N = n - r = 8 - 3 = 5, \quad (3)$$

где: n — общее количество определяющих параметров;

r — количество основных единиц измерения, содержащихся в определяющих параметрах (м, кг, с).

Вид критериев подобия определяется с помощью анализа размерностей, который позволяет находить критерии подобия, не имея математического описания физического явления, зная только, от каких параметров оно зависит.

Для исследуемого явления критерии подобия имеют вид:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{q \cdot v}{\sigma} = inv; \quad \Pi_2 = \frac{b}{\ell} = inv; \\ \Pi_3 &= \frac{h}{\ell} = inv; \quad \Pi_4 = \varphi = inv; \\ \Pi_5 &= \frac{t \cdot v}{\ell} = inv. \end{aligned} \quad (4)$$

На основе полученных критериев подобия, из которых Π_1 является определяемым, можно составить критериальное уравнение процесса сдувания сыпучего груза с поверхности штабеля открытого склада и соответствующие им индикаторы подобия:

$$\begin{aligned} \frac{q \cdot v}{\sigma} &= f\left(\frac{b}{\ell}; \frac{h}{\ell}; \varphi; \frac{t \cdot v}{\ell}\right); \\ I_1 &= \frac{k_q \cdot k_v}{k_\sigma} = 1; \quad I_2 = \frac{k_b}{k_\ell}; \\ I_3 &= \frac{k_h}{k_\ell} = 1; \\ I_4 &= \frac{k_{\varphi n}}{k_{\varphi m}} = 1; \quad I_5 = \frac{k_z \cdot k_v}{k_\ell} = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Из полученных критериев подобия для процесса сдувания пылящего материала с поверхности штабеля открытого склада критерий $\Pi_1 = \frac{q \cdot v}{\sigma}$ указывает на то, что необходимо моделировать натуральный материал, то есть создавать для модельных исследований эквивалентный натурному материал.

Процесс изготовления эквивалентных материалов весьма трудоемок и сложен. Поэтому предлагается в модельных исследованиях применить натуральный груз — так называемое неполное моделирование.

Таким образом, при использовании в модельных исследованиях натурального груза значение масштаба подобия k_σ необходимо принимать равным единице, то есть $k_\sigma = 1$.

Учитывая, что $k_\sigma = 1$, характеристики ветрового воздействия на склад в модели и натуре также должны быть одинаковыми, по-

этому принимаем значения масштабных коэффициентов

$$k_v = k_\varphi = 1. \quad (7)$$

Для построения модели примем отношение модели к натуре равным масштабному коэффициенту k_ℓ . Тогда процессы сдувания сыпучего груза с поверхности штабеля открытого склада в модели и натуре будут подобны при следующих значениях масштабных коэффициентов:

$$k_\ell = k_b = k_h = k_t. \quad (8)$$

Таким образом, основные положения метода прогнозирования процесса пылеуноса сыпучих грузов с поверхности штабеля открытого склада можно сформулировать следующим образом:

- выполнять модель геометрически подобной натурному объекту;
- использовать при модельных исследованиях натуральный сыпучий груз;
- соблюдать в модели и натуре одинаковыми режимы перемещения окружающего воздуха (скорость и направление ветровых потоков);
- соблюдать в модели и натуре одинаковыми температуру и влажность окружающей среды.

Потери груза M_{ck} (т) в результате пылеуноса при его хранении на открытых складах рекомендуется определять по формуле

$$\begin{aligned} M_{ck} &= \sum_{i=1}^n M_{ck_i} \cdot S_{ck_i} \cdot t_{xp_i} + \\ &+ \sum_{g=1}^{12-n} M_{ck_g} \cdot S_{ck_g} \cdot t_{xp_g}, \end{aligned} \quad (9)$$

где: M_{ck_i} — количество груза, унесенного с одного квадратного метра поверхности штабеля за i -й месяц навигационного периода, т/м²сут;

S_{ck_i} — площадь поверхности штабеля склада в i -й месяц навигационного периода, м²;

S_{ck_g} — площадь поверхности штабеля склада в g -й месяц межнавигационного периода, м²;

t_{xp_i}, t_{xp_g} — время хранения груза на складе соответственно в i -й месяц навигационного и g -й месяц межнавигационного периодов, сут;

$M_{скg}$ — количество груза, унесенного с одного квадратного метра поверхности штабеля за g -й месяц межнавигационного периода, т/м²сут.

Величины $M_{скi}$ и $M_{скg}$ для натуральных условий определяются как

$$M_{скi} = M_{скi}^M \cdot k_l^2; M_{скg} = M_{скg}^M \cdot k_l^2. \quad (10)$$

Величины $M_{скi}^M$ и $M_{скg}^M$ находят при модельных исследованиях с учетом преобладающих скоростей и направлений ветровых потоков, где планируется расположить или располагается открытый склад грузового причала для перегрузки сыпучего груза, по месяцам навигационного и межнавигационного периодов.

При модельных исследованиях процесса пылеуноса из штабеля открытого склада и запыленности воздуха следует применять двухфакторный эксперимент (ПФЭ), в котором управляемыми независимыми факторами являются скорость v и направление φ ветровых потоков, воздействующих на модели открытых складов.

Так были получены математические модели процессов пылеуноса (потерь) M^n и запыленности q^3 воздуха для угля при его хранении на открытых складах, которые имеют вид:

штабель с поперечным сечением в форме призмы

$$M_{np}^M = 73,875 + 8,275 \cdot x_1 + 73,625 \cdot x_2 + 8,225 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (11)$$

$$q_{np}^3 = 101,65 - 53,35 \cdot x_1 + 100,35 \cdot x_2 - 52,65 \cdot x_1 \cdot x_2;$$

штабель с поперечным сечением в форме обелиска

$$M_{ог}^M = 220,625 + 11,125 \cdot x_1 + 213,375 \cdot x_2 + 10,875 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (12)$$

$$q_{ог}^3 = 642 - 347 \cdot x_1 + 630,5 \cdot x_2 - 340,5 \cdot x_1 \cdot x_2,$$

где: x_1 — скорость v ветрового потока в относительных единицах;

x_2 — относительное направление φ ветрового потока.

Используя предлагаемый метод исследования на моделях процесса пылеуноса сыпучего груза, аналогичные математические модели можно получить и для других сыпучих грузов.

Подставляя в выражения (11) и (12) соответствующие каждому месяцу навигационного и межнавигационного периода значения v и φ , определяют значения соответствующих величин потерь сыпучего груза и запыленности воздуха по месяцам при модельных исследованиях.

Величины $M_{скi}$, $M_{скg}$ по месяцам навигационного и межнавигационного периода для натуральных условий находят по выражению (10). Величины $q_{скi}$ и $q_{скg}$ для натуральных условий — по выражению

$$q_{скi} = q_{скi}^M \cdot k_l^2, \quad q_{скg} = q_{скg}^M \cdot k_l^2. \quad (13)$$

Экспериментальные исследования влияния масштабного фактора на адекватность модели натуре показали, что значения линейного масштабного коэффициента не должны превышать 100, то есть $k_l \leq 100$.

В табл. 2 приведены результаты сравнения величин запыленности воздуха и пылеуноса, полученные при натуральных замерах и с помощью математических моделей (11) и (12).

Таблица 2

Результаты сравнения величин запыленности воздуха и пылеуноса

Форма поперечного сечения штабеля	Месяц проведения эксперимента	Запыленность воздуха, мг/м ³		Величина пылеуноса, мг/с	
		При натуральных замерах	Полученный с помощью мат. модели	При натуральных замерах	Полученный с помощью мат. модели
Призма	июнь 2005 г.	17,0	15,5	6,7	6,1
	июль 2005 г.	118,1	73,9	35,6	31,8
	август 2005 г.	22,7	21,6	9,6	8,7
Обелиск	июнь 2005 г.	113,5	102,8	28,1	25,3
	июль 2005 г.	604,6	473,9	117	104,5
	август 2005 г.	146,4	142,2	36,7	33,4

Из данных табл. 1 видно, что расхождение сравниваемых величин лежат в пределах: по запыленности воздуха — 3–21 %; пылеуноса — не превышают 10 %, что дает их удовлетворительную сходимостью, достаточную для данных исследований.

Кроме этого, были выполнены исследования влияния геометрических параметров склада, формы поперечного сечения штабеля и направления ветрового потока на величину пылеуноса груза и запыленность воздуха. Результаты этих исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследования влияния геометрических параметров склада и формы поперечного сечения штабеля на пылеунос груза и запыленность воздуха

Поперечное сечение штабеля	Длина штабеля l , м	Пылеунос с 1 м ² , мг/с		Запыленность воздуха, мг/м ³	
		Направление ветрового потока со скоростью 5 м/с			
		вдоль штабеля	поперек штабеля	вдоль штабеля	поперек штабеля
Призма	0,23	4,5	6,5	48	40
	0,43	4,1	6,0	65	35
	0,8	3,4	4,7	80	25
Обелиск	0,4	51	16,0	62	52
	0,6	46	15,2	78	46
	0,8	38	14,0	95	35

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать следующие выводы:

— при направлении ветрового потока вдоль штабелей с увеличением их длин размер пылеуноса уменьшается;

— для штабеля с поперечным сечением в форме призмы размер пылеуноса при направлении ветрового потока поперек штабеля на 28–32 % больше, чем при направлении ветрового потока вдоль штабеля;

— для штабеля с поперечным сечением в форме обелиска размер пылеуноса при направлении ветрового потока поперек штабеля на 31–37 % меньше, чем при направлении ветрового потока вдоль штабеля;

— для обоих штабелей с увеличением

их длин при направлении ветрового потока вдоль штабеля запыленность воздуха увеличивается, а при направлении ветра поперек штабеля — уменьшается;

— для штабеля с поперечным сечением в виде призмы запыленность воздуха при соответствующих направлениях ветрового потока меньше на 15–25 % по сравнению со штабелем с поперечным сечением в виде обелиска.

Ни одна из существующих методик не учитывает влияния размеров склада, формы поперечного сечения штабеля и направления ветровых потоков на размер пылевыбросов, хотя указанные факторы существенным образом влияют на процесс пылеуноса.

Список литературы

1. Биргер М. И. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 312 с.
2. Бланк Ю. И. Борьба с пылеобразованием в морских портах. Экспресс-информация / Ю. И. Бланк, В. Я. Зилдман, В. А. Чикановский. — М.: Транспорт, 1984. — Вып. 552. — 24 с.
3. Отделкин Н. С. Эколого-экономическое обоснование параметров открытых складов навалочных грузов путем прогнозирования процесса пылеуноса / Н. С. Отделкин, Д. Н. Костюничев // Экологические системы и приборы. — 2005. — № 1. — С. 30–33.