

УДК 629.12.001.2: 656.66.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ОТКРЫТЫХ СКЛАДОВ МОРСКИХ И РЕЧНЫХ ПОРТОВ

Сикарев Сергей Николаевич¹, доцент

e-mail: ssnvgavt@yandex.ru

Тарасов Иван Сергеевич¹, доцент

e-mail: ivansptm@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В настоящей работе обоснована актуальность применения методов математического моделирования для анализа аэродинамических процессов, происходящих в районе открытых угольных складов в портовых зонах.

Ключевые слова: открытый угольный склад, пылеобразование, пыление сыпучего груза, математическая модель.

INVESTIGATION OF AIR FLOWS ON THE TERRITORY OF OPEN WAREHOUSES OF SEA AND RIVER PORTS

Sergey N. Sikarev¹, Associate Professor

e-mail: ssnvgavt@yandex.ru

Ivan S. Tarasov¹, Associate Professor

e-mail: ivansptm@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper substantiates the relevance of applying mathematical modeling methods to analyze the aerodynamic processes occurring in the area of open-pit coal depots in port areas.

Keywords: open coal storage, dust formation, dusting of bulk cargo, mathematical model.

На сегодняшний день одной из острых экологических проблем является загрязнение окружающей среды, вызванное распылением и просыпанием сыпучих материалов при выполнении погрузочно-разгрузочных операций [1, 2]. Существенное воздействие пылевого фактора ощущается жителями, проживающими в непосредственной, близости от территорий, занятых угольными складами – как в районах шахт и портов, так и вблизи временных открытых хранилищ. При ветровых порывах, превышающих 10 м/с, облака угольной пыли способны достигать жилых зон [3].

Изучение процессов пылеуноса в лабораторных условиях затруднено из-за масштабных эффектов и сложности воспроизведения реальных ветровых нагрузок. Кроме того, характер

распределения скоростей потока по высоте требует учета точечных источников и детального подхода к моделированию. В связи с этим численные методы моделирования приобретают всё большую популярность как наиболее экономически эффективный и информативный инструмент исследования подобных процессов.

Численное моделирование воздушного потока

Воздействие воздушного потока на территорию открытых портовых угольных складов приводит к процессу ветровой эрозии мелкодисперсных частиц угля, находящихся на поверхности хранимого материала [4]. После отрыва частицы продолжают движение под действием аэродинамических сил. Определённая доля частиц уносится за пределы складской зоны, вызывая загрязнение прилегающих территорий, тогда как оставшиеся оседают в пределах склада. Эффективно организованный пылеулавливающий процесс позволяет существенно снизить потери и минимизировать негативное экологическое воздействие.

Характер движения угольной пыли обусловлен сложной нелинейной кинематикой воздушного потока, включая влияние турбулентных составляющих, а также геометрию и структуру размещения складов. Кроме того, направление и интенсивность ветра, определяемые розой ветров, оказывают существенное влияние на взаимодействие между различными складами. Например, склад, эксплуатирующийся на протяжении длительного времени, может частично экранировать поток и снижать пылеобразование на соседнем, только что насыпанном складе. Учет этих взаимодействий возможен посредством построения нелинейной математической модели, описывающей физику процесса с учетом всех значимых факторов.

В основе численного моделирования лежит анализ кинематической структуры потока, обтекающего поверхность складов. Для изучения взаимодействия воздушных масс с угольными частицами исследуется движение элементарного объема воздуха в произвольной точке пространства потока. Применяется второй закон Ньютона в отношении единичной массы воздуха, на которую действуют как внешние силы (преимущественно сила тяжести), так и внутренние – вызванные изменениями давления и инерционными эффектами. В результате выводится система уравнений, описывающих движение воздуха, включающая: инерционные, гравитационные и турбулентные составляющие.

Определяющим фактором пылеуноса является кинематическая структура потока ветрового воздействия на поверхности угольных складов [5]. Для исследования этих процессов взаимодействия движения воздушных масс по территории порта с угольными частицами, рассмотрим движение точечного объема воздуха в произвольном пространстве воздушного потока, который по определению является неразрывным. В качестве объекта исследования возьмём произвольную точку А, ограниченную прямоугольной областью дифференциально малых размеров – dx, dy, dz .

По второму закону Ньютона, рассматриваемая точка воздуха, воздействующая на частицы угольной пыли, имеет единичную массу. Как и всякое инерционное тело, она перемещается под воздействием суммы сил, вызывающих ускорение $\vec{a}$:

$$\sum \vec{F}' = m * \vec{a} \quad (1)$$

где $\sum \vec{F}'$ – сумма сил, действующих на точку воздуха;

m – единичная масса воздуха в пределах дифференциально малого объема;

$\vec{a}$ – сумма ускорений, действующих на точку воздуха.

Сумма сил, действующих на точку воздуха, складывается из внешних сил, которые воздействуют на поток $\vec{F}$ и сил, которые будут удерживать рассматриваемую точку в

равновесии $\vec{F}^*$ со стороны потока [6,7]. Выражение (1) для объема единичной массы, получит вид:

$$\vec{F} + \vec{F}^* = \vec{a}_l + \vec{a}_T \quad (2)$$

Внешние силы, которые будут действовать на каждую воздушную частицу, обтекающую угольный склад, в данном случае будут сведены к одной силе – это сила тяжести. Таким образом, внутренняя сила по «х» и по «z», будет равна 0, а по оси «у» она будет равна «g»

Величина $\vec{F}^*$, рассматриваемая в равновесии точки воздуха А с размерами dx, dy, dz , находящаяся в состоянии покоя разложим на три осевых составляющих и для примера будем рассматривать одну из проекций (см. рис. 1).

Изменение давления вдоль линии MN (параллельной оси ОХ) примем линейным, потому что размер точки дифференциально мал. В связи с этим, падение давления на единицу представим в виде частной производной dp/dx . В итоге давление в точках на гранях вокруг точки А можно представим в следующем виде:

$$p_M = p - \frac{1}{2} * dx * \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

$$p_N = p + \frac{1}{2} * dx * \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

где p – давление в точке А.

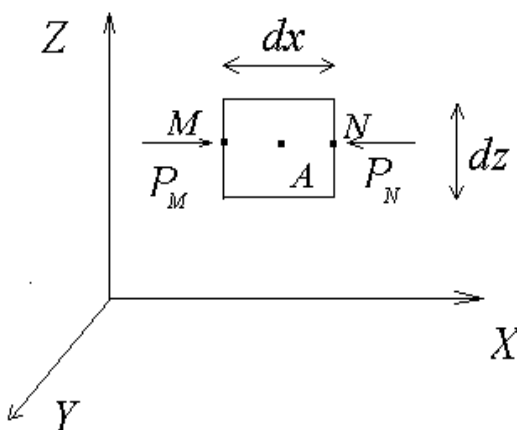


Рисунок 1 – Схема воздушного потока вокруг точки А

Объем воздуха в точках М и N :

$$m * F_x^* = F_M - F_N = (p_M - p_N) dz dy \quad (5)$$

где $m * F_x^* = F_x^* \rho dx dz dy$

Правая часть выражения (5) может быть представлена как:

$$(p_M - p_N) dz dy = \left[\left(p - \frac{1}{2} dx \frac{dp}{dx} \right) - \left(p + \frac{1}{2} dx \frac{dp}{dx} \right) \right] dz dy = - \frac{dp}{dx} dx dy dz \quad (6)$$

Подставим (6) в соотношение (5), получим:

$$F_x^* \rho dx dz dy = - \frac{dp}{dx} dx dy dz$$

$$F_x^* = - \frac{dp}{dx} \cdot \frac{1}{\rho}$$

Для получения системы уравнений Эйлера для воздуха находящегося в состоянии покоя спроецируем силы на оси Y и Z :

$$\begin{cases} F_x^* = -\frac{dp}{dx} \cdot \frac{1}{\rho} \\ F_y^* = -\frac{dp}{dy} \cdot \frac{1}{\rho} \\ F_z^* = -\frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{\rho} \end{cases} \quad (7)$$

По принципу Даламбера, величины инерционного ускорения $\vec{a}_I$ равна:

$$\vec{a}_x = \frac{dV_x}{dt} = \frac{dV_x}{dx} \frac{dx}{dt} + \frac{dV_x}{dy} \frac{dy}{dt} + \frac{dV_x}{dz} \frac{dz}{dt} + \frac{dV_x}{dt} = \frac{dV_x}{dx} V_x + \frac{dV_x}{dy} V_y + \frac{dV_x}{dz} V_z + \frac{dV_x}{dt}$$

Для определения компонента ускорений инерционной составляющей будем рассматривать компоненту ускорения на оси Y и Z, в итоге получим выражения:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{Ix} &= \frac{dV_x}{dx} V_x + \frac{dV_x}{dy} V_y + \frac{dV_x}{dz} V_z + \frac{dV_x}{dt} \\ \bar{a}_{Iy} &= \frac{dV_y}{dx} V_x + \frac{dV_y}{dy} V_y + \frac{dV_y}{dz} V_z + \frac{dV_y}{dt} \\ \bar{a}_{Iz} &= \frac{dV_z}{dx} V_x + \frac{dV_z}{dy} V_y + \frac{dV_z}{dz} V_z + \frac{dV_z}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

Для нахождения величины турбулентного ускорения $\vec{a}_T$ используем гипотезу Рейнольдса-Бусинеска:

$$\vec{a}_T = v \vec{V}'' = v \Delta^2 \vec{V}$$

В проекциях на оси данные выражения получают следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{Tx} &= v \Delta^2 \vec{V}_x = v \left(\frac{d''V_x}{dx} + \frac{d''V_x}{dy} + \frac{d''V_x}{dz} \right) \\ \vec{a}_{Ty} &= v \Delta^2 \vec{V}_y = v \left(\frac{d''V_y}{dx} + \frac{d''V_y}{dy} + \frac{d''V_y}{dz} \right) \\ \vec{a}_{Tz} &= v \Delta^2 \vec{V}_z = v \left(\frac{d''V_z}{dx} + \frac{d''V_z}{dy} + \frac{d''V_z}{dz} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

В итоге преобразования выражения (2) с учетом выражений (7-9). Также будем принимать дополнительно вертикальные плоскости, которые будут действовать на поток силой тяжести. Ее будем учитывать через ускорение свободного падения. В результате получим полную систему дифференциальных уравнений, описывающих воздушные потоки вокруг складов пылящих грузов на территории порта:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - v \cdot \left(\frac{d^2V_x}{dx^2} + \frac{d^2V_x}{dy^2} + \frac{d^2V_x}{dz^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx}; \\ \frac{dV_y}{dt} - v \cdot \left(\frac{d^2V_y}{dx^2} + \frac{d^2V_y}{dy^2} + \frac{d^2V_y}{dz^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dy}; \\ \frac{dV_z}{dt} - v \cdot \left(\frac{d^2V_z}{dx^2} + \frac{d^2V_z}{dy^2} + \frac{d^2V_z}{dz^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dz}; \\ \frac{dV_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy} + \frac{dV_z}{dz} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}, \end{aligned} \quad (10)$$

Чтобы получить окончательные численные результаты, систему уравнений (10) дополняем начальными условиями и граничными условиями. Определяем область пространства, где задача формируется в расчетную область. Когда будет решен вопрос турбулентности в потоке выбора математической модели для определения V_t получим окончательное решение системы уравнений.

Для определения коэффициента турбулентного обмена используется классическая методика $k - \varepsilon$ [8, 9]. Данный коэффициент определяется как:

$$v_m = c_\rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности;

C_ρ – турбулентная константа среды;

ε – разбрасывание турбулентной энергии.

Используя выражение (1) и учитывая активную турбулентность в центре с учётом Рейнольдсовской гипотезы, в зонах прилегания к поверхности склада и к поверхности территории порта воспользуемся формулами функций перехода ламинарно-турбулентной зоны в пристеночные области.

Пример расчёта воздушного потока, обтекающего склад с углём представлен на рисунке. Склад имеет следующие размеры

Ширина склада – 30 метров;

Высота склада – 10 метров;

Высота стенки – 12 метров;

Толщина ветрозащитного сооружения – 0,05 метров.

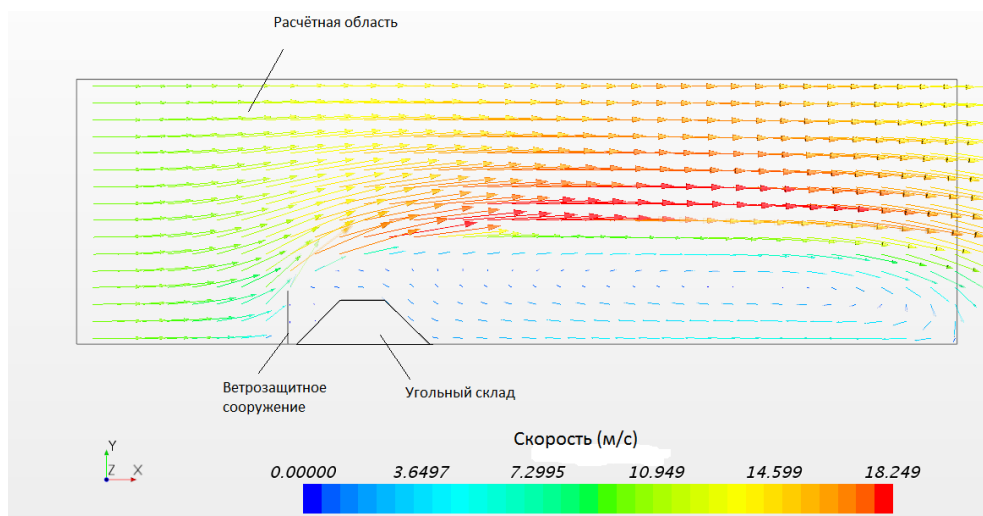


Рисунок 2 – Векторы направления воздушного потока и примерные значения скоростей

Характер расчётной области схематично представлен на рисунке 2, при этом выделяем входную область (слева), верхняя горизонталь (задаем симметрию) и нижняя часть (поверхность склада), которую мы моделируем условием не протекания. В выходной области задаётся условие развитого потока. С учётом этого, также ставится и граничное условие математической модели турбулентности.

Заключение

Реализация численного моделирования методом контрольного объема позволяет получить детальную картину структуры воздушного потока, обтекающего открытые угольные склады. Проведённый анализ даёт возможность формировать выводы о механизме пылеобразования, отрыве частиц угольной пыли и их последующем перемещении в пределах и за пределы складской территории. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации инженерных решений, направленных на снижение пылеобразования и повышения экологической безопасности портовой инфраструктуры.

Список литературы:

1. Отделкин, Н. С. Определение потерь и отрицательного воздействия на окружающую среду в результате пылеуноса при хранении навалочных грузов на открытых складах / Н.

С. Отделкин, Д. Н. Костюничев. - Материалы Международной научно-технической конференции «Транспортные и технологические машины». – НГТУ, Н. Новгород, 2004, С. 128 – 132.

2. 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», №1, 2005, С. 30 - 33 .

3. Отделкин, Н.С. Определение воздействия на окружающую среду портовых открытых складов для хранения сыпучих грузов. / Н. С. Отделкин, Д. Н. Костюничев. Тез.докладов VII Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2005». Н.Новгород, 2005, С. 56 – 57.

4. Саломатников, М. Е. Исследование вопросов обоснования емкости и схем механизации складов угля и руды на причалах речных портов: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.19/ Саломатников Михаил Евсеевич. Горький; 1970. – 17 с.

5. Адамов Е.И. Совершенствование методов определения и снижения потерь от пылеобразования при перегрузке сыпучих грузов грейферными кранами и перегружателями. Дис... канд. тех. наук. – Нижний Новгород, 2010. – 122 с.

6.Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.

7. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D.B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269-289.

8. El Tahry, S.H. k-ε equation for compressible reciprocating engine flows / S.H. El Tahry // - AIAA J. Energy, - 1983. - No. 4, pp. 345-353.

9.Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale / Rodi, W.//, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows - 1979, v. 1, pp. 25-31.

