



УДК 624.9

С.Г.Смирнов, аспирант кафедры «ПТМ и МР», ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ОБОСНОВАНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЫЛЕЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОТКРЫТЫХ ПОРТОВЫХ СКЛАДАХ ДЛЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Ключевые слова: пылеобразование, пылеунос, ветровое воздействие, математическая модель

В статье рассматривается необходимость использования математического моделирования для исследования поведения воздушных потоков на территории портового открытого угольного склада и о динамике поведения угольной пыли. Такой подход позволяет более полно учитывать метеорологические особенности обдувания: скорость и высотное распределение скоростей ветра, турбулентность потока, геометрические параметры склада, а также взаимное месторасположение нескольких складов.

Статья посвящена разработке методов оценки пылеобразования и пылеуноса при перегрузке и хранении сыпучих грузов в портах на основе моделирования этих процессов.

В связи с достаточно сложным техногенным характером данного явления попытки его лабораторного исследования не приводят к успеху, что связано с масштабным эффектом и сложностью воспроизведения ветровых воздействий. Помимо этого, смоделировать сам характер эпюры скоростей по высоте воздушного потока крайне затруднительно, потому что приходится иметь дело с точечными источниками воздушного потока. Поэтому для решения подобных задач, в последнее время стало достаточно активно применяться численное моделирование как наиболее дешевый и максимально информативный способ исследования. Численное моделирование подразумевает собой формальную реализацию некоторой физической постановки того или иного процесса или явления [2].

Воздействие воздушного потока на открытый портовый угольный склад с сыпучим грузом провоцирует появление ветровой эрозии мелких пылеватых частиц груза с поверхности склада. Оторвавшись от поверхности склада, частицы груза начинают двигаться под действием воздушного потока. Некоторое количество частиц транзитом уносятся за пределы склада, нанося экологический ущерб прилегающей территории. Другие частицы оседают в границах склада.

Процесс пылеуноса имеет сложный нелинейный характер, так как определяется и кинематической, и турбулентной структурами движения воздушного потока, которые сопровождают обдувание склада. Помимо этого, существенно будет сказываться взаимное расположение складов относительно друг друга и технология их формирования при изменении «розы ветров», что требует тщательных исследований. В результате, при определённых направлениях ветров, первый склад может стать естественной защитой для

второго склада, значительно уменьшив его негативное воздействие на окружающую среду.

Как видно из вышесказанного, определяющим фактором пылеуноса становится кинематическая структура потока ветрового воздействия на поверхности угольных складов [3]. 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.

На данном этапе исследований было изучено обдувание с одной стороны открытого портового склада, где потоки воздуха более интенсивны, но не учитывались другие препятствия.

В качестве объекта исследования возьмём произвольную точку A , ограниченную прямоугольной областью дифференциально малых размеров – dx, dy, dz .

Согласно второму закону Ньютона, эта 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, в свою очередь, складывается из внешних сил, действующих на поток \vec{F} и сил, удерживающих исследуемую точку в равновесии \vec{F}^* со стороны потока [1]. Вектор ускорения, который получает частица угольной пыли, складывается из инерционной составляющей \vec{a}_I и ускорения, сообщаемого частице турбулентным характером потока \vec{a}_T . Таким образом, выражение (1) для объема единичной массы, перепишем следующим образом:

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

Внешние силы, которые будут действовать на каждую воздушную частицу, обтекающую наш 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»

Для определения величины \vec{F}^* рассмотрим равновесие точки воздуха A с размерами dx, dy, dz , находящейся в состоянии покоя. Для удобства вектор силы \vec{F}^* разложим на три осевых составляющих и для примера рассмотрим одну из проекций (см. рис. 1).

Так как размер точки дифференциально мал, то изменение давления вдоль линии MN (параллельной оси OX) можно принять линейным. Таким образом, падение давления на единицу можно представить в виде частной производной dp/dx . Тогда давления в точках на гранях вокруг точки A можно записать 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 A .

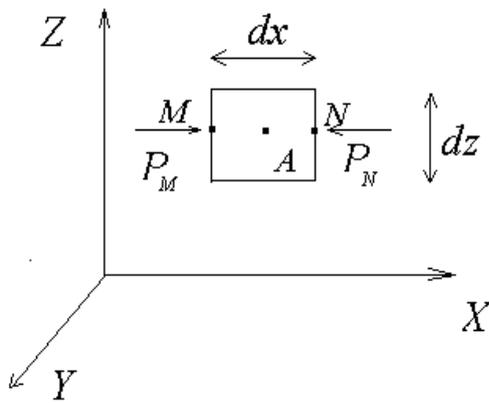


Рис. 1 Расчетная схема воздушного потока вокруг точки A

Исследуемый объем воздуха вокруг точки A находится в равновесии под воздействием разности сил, приложенных в точках M и N, и внутренней силы \vec{F}^* – уравнивающей разность сил. Таким образом имеем:

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

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:

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

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

Аналогично рассматривая проекции сил на оси Y и Z, получим систему уравнений Эйлера для покоящегося воздуха:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_x^* = - \frac{dp}{dx} * \frac{1}{\rho} \\ F_y^* = - \frac{dp}{dy} * \frac{1}{\rho} \\ F_z^* = - \frac{dp}{dz} * \frac{1}{\rho} \end{array} \right. \quad (7)$$

Для определения величины инерционного ускорения \vec{a}_i , примем во внимание то, что согласно принципу Даламбера, эта величина равна полной производной скорости по времени, то есть в проекции на ось X имеем:

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

Рассматривая по аналогии компоненту ускорения на оси Y и Z, получим следующие выражения для определения компонент ускорений инерционной составляющей:

Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов

Секция IV Техническая диагностика и ресурс подъемно-транспортной техники портов и транспортных терминалов

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

Для определения величины турбулентного ускорения \bar{a}_T воспользуемся гипотезой Рейнольдса-Бусинеска о пропорциональной зависимости турбулентных напряжений от скорости или линейной зависимости турбулентной составляющей ускорения от производной величины скорости движения:

$$\bar{a}_T = \nu \vec{W}'' = \nu \Delta^2 \vec{V}$$

В проекциях на оси эти выражения примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
\bar{a}_{T_x} &= \nu \Delta^2 \vec{V}_x = \nu \left(\frac{d'' V_x}{dx} + \frac{d'' V_x}{dy} + \frac{d'' V_x}{dz} \right) \\
\bar{a}_{T_y} &= \nu \Delta^2 \vec{V}_y = \nu \left(\frac{d'' V_y}{dx} + \frac{d'' V_y}{dy} + \frac{d'' V_y}{dz} \right) \\
\bar{a}_{T_z} &= \nu \Delta^2 \vec{V}_z = \nu \left(\frac{d'' V_z}{dx} + \frac{d'' V_z}{dy} + \frac{d'' V_z}{dz} \right)
\end{aligned} \quad (9)$$

Величина коэффициента пропорциональности ν называется коэффициентом эффективной вязкости и имеет размерность кв.м/с. Эта величина является суммой кинематической вязкости ν_k и турбулентной ν_t (коэффициент турбулентного обмена).

Преобразуем (2) с учетом (7) – (9) и дополним полученную систему уравнением неразрывности. Дополнительно примем во внимание то, что в вертикальной плоскости на поток действует сила тяжести. Ее присутствие учтем через ускорение свободного падения. В результате получаем полную систему дифференциальных уравнений, пригодную для описания воздушных потоков вокруг складов пылящих грузов на территории порта:

$$\begin{aligned}
\frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \\
\frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}; \\
\frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}; \\
\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt},
\end{aligned} \quad (10)$$

Согласно уравнениям математической физики, для получения окончательных численных результатов систему уравнений (10) необходимо дополнить граничными (краевыми) условиями и начальными условиями (в случае решения нестационарной задачи). Помимо этого, определяют область пространства, для которой решается задача, то есть формируют расчетную область задачи. Окончательное замыкание системы дифференциальных уравнений происходит после того, как будет решен вопрос об учете присутствия турбулентности в потоке посредством выбора математической модели для определения коэффициента турбулентного обмена ν_t .

Многочисленные эксперименты и исследования турбулентной структуры потока показывают, что наиболее доступным способом определения коэффициента турбулентного обмена является использование классического $k - \varepsilon$ подхода. Согласно этому подходу коэффициент турбулентной вязкости (коэффициент турбулентного обмена) определяется как:

$$v_t = c_p \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

где: k – кинетическая энергия турбулентности;

c_p – турбулентная константа среды;

ε – диссипация турбулентной энергии.

При использовании выражения (1) мы учитываем, что в центре хорошо развитая, активная турбулентность, поэтому для неё мы используем высокую Рейнольдсовскую гипотезу, а 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;

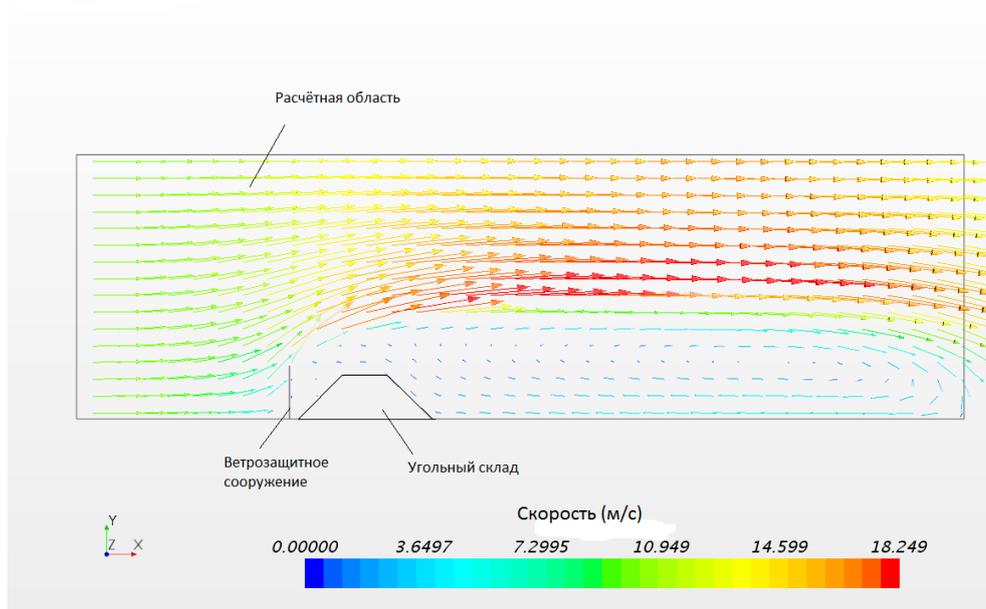


Рис. 2 Векторы направления воздушного потока и примерные значения скоростей

Характер расчётной области схематично представлен на рисунке 1.2, при этом выделяем входную область (слева), верхняя горизонталь (задаем симметрию) и нижнюю часть (поверхность склада), которую мы моделируем условием непротекания. В выходной области задаётся условие развитого потока. С учётом этого также ставится и граничное условие математической модели турбулентности. В результате численной реализации этой модели методом контрольного объёма мы получаем возможность анализировать структуру потока, обтекающего угольный склад, и делать выводы о характере пылеобразования, отрыва частиц угольной пыли, смещения частиц угольной пыли и т.д.

Список литературы:

[1]. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1982. – 223 с.

Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов

Секция IV Техническая диагностика и ресурс подъемно-транспортной техники портов и транспортных терминалов

[2]. Отделкин, Н. С. Теоретические основы оценки потерь и защиты окружающей среды от пылеобразования при перегрузке и хранении сыпучих грузов: дис... докт. техн. наук: 05.22.19, 03.00.16: защищена 2009 г.: утв. 2009 / Отделкин Николай Станиславович. – Н. Новгород, 2009. – 355 с.

[3]. 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.

THE RATIONALE FOR THE LOCATION OF THE DUST SCREENS ON THE OPEN PORT WAREHOUSES FOR BULK GOODS

S.G. Smirnov

Key words: dust formation, dust removal, wind impact, mathematical model

The article considers the need to use mathematical modeling to study the behavior of air flows in the port open coal warehouse and the dynamics of the behavior of coal dust. This approach allows to take into account more fully the meteorological features of blowing: speed and altitude distribution of wind speeds, flow turbulence, geometric parameters of the warehouse, as well as the mutual location of several warehouses.