

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ОТКРЫТЫХ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ

**С.Н. Сикарев**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Е.И. Адамов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**С.Г. Смирнов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**И.В. Липатов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**М.М. Людмили**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. В статье рассматривается необходимость использования математического моделирования для исследования поведения воздушных потоков на территории портового открытого угольного склада. Для исследования этих процессов взаимодействия движения воздушных масс по территории порта с угольными частицами было рассмотрено движение точечного объема воздуха в произвольном пространстве воздушного потока, который является неразрывным. Такой подход позволяет более точно учитывать все метеорологические особенности обдувания: скорость ветра, высотное распределение скоростей, турбулизацию потока, различные геометрические параметры склада. В результате численной реализации этой модели методом контрольного объема мы получаем возможность анализировать структуру потока обтекающего угольный склад и сделать выводы о характере пылеобразования, отрыва частиц угольной пыли, смещения частиц угольной пыли.*

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

### Введение

В настоящее время существует большая проблема с загрязнением окружающей среды в результате распыления и просыпей при погрузочно-разгрузочных работах [1,2].

Нельзя забывать и про жителей, живущих в домах, находящихся в непосредственной близости от территории угольных складов (будь это шахты, угольные терминалы в порту или просто открытые склады для хранения сыпучих грузов). При порывах ветра от 10 м/с пылевое облако достигает и жилых районов [3].

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 воздушного потока

Воздействие воздушного потока на открытый портовый угольный склад, провоцирует появление ветровой эрозии мелких пылеватых частиц угля с поверхности склада [4]. Оторвавшись с поверхности склада, частицы, начинают двигаться под действием воздушного потока. Часть частиц транзитом уносится за территорию склада, нанося экологический ущерб прилегающей территории. Вторая часть оседает в границах территории угольного склада. Как показала практика, при организации достаточно адекватного пылеуловительного процесса объем уносимых частиц можно существенно уменьшить и тем самым минимизировать загрязнение прилегающей территории и окружающей среды.

Процесс пылеуноса имеет достаточно сложный нелинейный характер, так как определяется и кинематической структурой движения воздушного потока, и турбулентными процессами, которые сопровождают обдувание склада. Помимо этого кардинально будет сказываться взаимное влияние складов друг на друга при изменении «розы ветров», что требует тщательных исследований. Это позволит учесть влияние процесса формирования складов и технологической части их постройки. Так, например, один склад был создан два месяца назад и пыление от него не настолько интенсивное, в отличие от склада, который был

создан день или два назад. В результате, при определённых направлениях ветров, первый склад станет естественной защитой для второго склада. Такая нелинейная математическая модель будет учитывать эти сложные и весомые факторы.

Как видно из вышесказанного, определяющим фактором пылеуноса становится 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:

$$\vec{F} + \vec{F}' = \vec{a}_t + \vec{a}_r \quad (2)$$

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»

Элементарный объем воздуха А с размерами  $dx, dy, dz$  (рис. 1) находится в состоянии покоя. Величину  $\vec{F}'$  разложим на три осевых составляющих.

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 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.

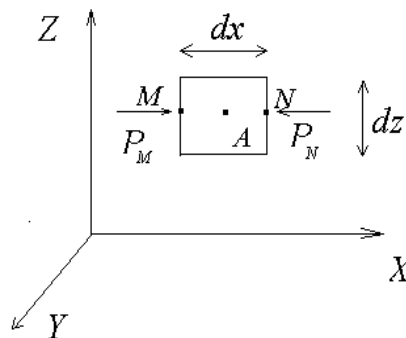


Рис. 1. Схема воздушного потока вокруг точки А

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:

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

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

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

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

Спроецировав силы на оси  $Y$  и  $Z$ , получим систему уравнений Эйлера для воздуха, находящегося в состоянии покоя:

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

По принципу Даламбера, величина инерционного ускорения  $\bar{a}_I$  равна:

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

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  $\bar{a}_T$  используем гипотезу Рейнольдса-Бусинеска:

$$\bar{a}_T = \nu \nabla^2 \vec{V}$$

В проекциях на оси данные выражения получают следующий вид:

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

Полная система дифференциальных уравнений (10), описывающих воздушные потоки вокруг складов пылящих грузов на территории порта находится путем преобразования выражения (2) с учетом выражений (7–9).

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

$$\frac{dV_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy} + \frac{dV_z}{dz} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt},$$

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  $V_i$  получим окончательное решение системы уравнений.

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

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

где:  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;

$c_p$  – турбулентная константа среды;

$\varepsilon$  – 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 2, где выделена входная область (слева) и нижняя часть (поверхность склада), моделируемая условием не протекания. В выходной области задаётся условие развитого потока. С учётом этого, также ставится и граничное условие математической модели турбулентности.

Склад имеет следующие размеры:

- ширина склада – 30 метров;
- высота склада – 10 метров;
- высота стенки – 12 метров;
- толщина ветрозащитного сооружения – 0,05 метров.

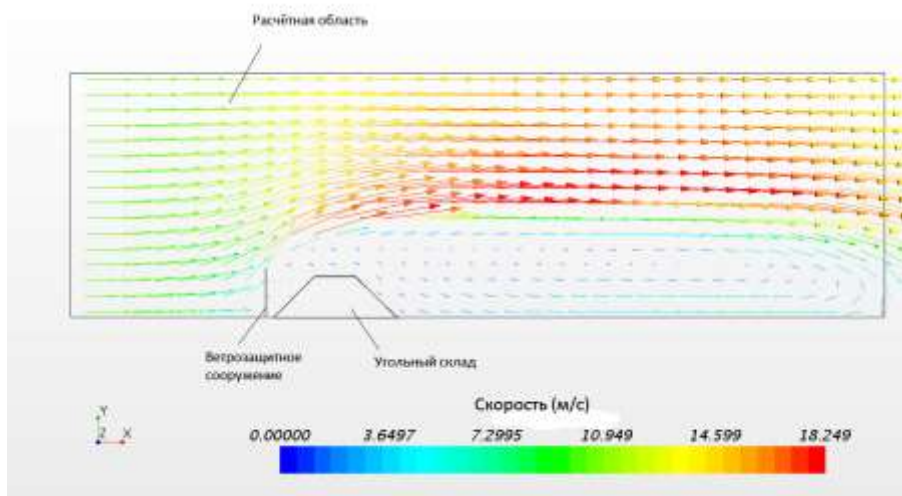


Рис. 2. Векторы направления воздушного потока и примерные значения скоростей

### Заключение

В результате численной реализации этой модели методом контрольного объёма мы получаем возможность анализировать структуру потока обтекающего угольный склад и сделать выводы о характере пылеобразования, отрыва частиц угольной пыли, смещения частиц угольной пыли.

### 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-e 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.

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF BEHAVIOR OF AIR FLOWS IN THE TERRITORY OF OPEN PORT COAL WAREHOUSES

**Sergey N. Sikarev,**

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

**Evgeny I. Adamov,**

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

**Sergey G. Smirnov,**

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

**Igor V. Lipatov,**

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

**Mark M. Lyudmilin,**

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

*Abstract. The article discusses the need to use mathematical modeling to study the behavior of air flows in the territory of a port open coal warehouse. To study these processes of the interaction of the movement of air masses on the territory of the port with coal particles, the movement of a point volume of air in an arbitrary space of the air flow, which is inextricable, was considered. This approach allows to take into account all meteorological features of blowing more accurately: wind speed, altitude distribution of speeds, flow turbulization, various geometric parameters of the warehouse. As a result of the numerical implementation of this model by the control volume method, we get the opportunity to analyze the structure of the stream flowing around the coal warehouse and draw conclusions about the nature of dust formation, separation of coal dust particles, displacement of coal dust particles.*

*Key words: open coal warehouse, dusting of bulk cargo, mathematical model.*

### References:

1. Otdelkin N.S. Determination of losses and negative environmental impact as a result of dust removal during storage of bulk cargo in open warehouses / N. S. Otdelkin, D. N. Kostyunichev. – Materials of the International Scientific and Technical Conference «Transport and Technological Machines». – NSTU, N. Novgorod, 2004, S. 128–132.
2. Otdelkin N.S. Ecological and economic justification of the parameters of open bulk cargo warehouses by predicting the dust removal process. / N. S. Otdelkin, D.N. Kostyunichev. – «Ecological systems and devices», No. 1, 2005, S. 30–33.
3. Otdelkin N.S. Determination of the environmental impact of port open warehouses for the storage of bulk cargo. / N. S. Otdelkin, D.N. Kostyunichev. Thes. reports of the VII International scientific and industrial forum «Great Rivers – 2005». N. Novgorod, 2005, S. 56–57.
4. Salomatnikov M. Ye. Study of the substantiation of capacity and mechanization schemes of coal and ore warehouses at the berths of river ports: author. dis ... cand. tech. Sciences: 05.22.19 / Salomatnikov Mikhail Evseevich. Bitter; 1970. – 17 p.
5. Adamov E.I. Improving the methods for determining and reducing losses from dust during the handling of bulk cargo with clamshell cranes and cranes. Dis ... cand. those. sciences. – Nizhny Novgorod, 2010. – 122 p.
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-e 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.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сергей Николаевич Сикарев**, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Евгений Иванович Адамов**, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Сергей Геннадьевич Смирнов**, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Игорь Викторович Липатов**, д.т.н., профессор кафедры водных путей гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Марк Михайлович Людмили**, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Sergey N. Sikarev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Evgeny I. Adamov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Sergey G. Smirnov**, graduate student of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Igor V. Lipatov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Waterways, Hydrotechnical Structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Mark M. Lyudmilin**, graduate student of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 04.10.2019 г.