

УДК 656.6

**Отделкин Николай Станиславович**<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теории конструирования инженерных сооружений,

e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

**Адамов Евгений Иванович**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта

e-mail: studvgu.sp@gmail.com

**Сикарев Сергей Николаевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта,

e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ПЫЛЕВЫХ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ПЫЛЕЗАБОРНУЮ СЕТКУ

*Аннотация.* 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 точно учитывать все метеорологические особенности обдувания: скорость ветра, турбулизация потока, различные геометрические параметры склада, а так же взаимное местоположение между несколькими складами.

*Ключевые слова:* математическая модель, воздушный поток, угольная пыль, перегрузка, сыпучий груз, пылезаборная сетка.

Борьба с потерями от распыления и просыпи при погрузочно-разгрузочных работах, непосредственно с углём и другими сыпуче-пылящими грузами, а также хранением угля на открытых портовых складах является одной из важнейших задач в общей проблеме охраны природы. Процесс потерь угольных частиц имеет достаточно сложный нелинейный характер, так как определяется и кинематической структурой движения воздушного потока, и турбулентными процессами, которые сопровождают обдувание склада для хранения сыпучих грузов. Для исследования этих процессов взаимодействия движения воздушных масс по территории порта с частицами угля, рассматривается движение точечного объема воздуха в произвольном пространстве воздушного потока, который является неразрывным.

В общем виде система аэродинамических уравнений позволяет описывать поведение любого потока в произвольной геометрической области. Отправной точкой для математического моделирования аэродинамического воздействия потока на пылезаборную стенку со стороны потока можно применить решение трехмерной системы аэродинамических уравнений движения вязкой жидкости в формуле, предложенной Навье и Стоксом, дополненную уравнением неразрывности:

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

где  $t$  – время;

$V_x, V_y, V_z$  – компоненты абсолютной скорости движения жидкости (пылевых частиц);

$F_x, F_y, F_z$  – компоненты массовых сил;

$p$  – пьезометрическое давление;

$\rho$  – плотность;

$\nu$  – эффективная вязкость

Принимая во внимание то, что моделирование процесса обтекания пылезаборной стенки связано с математическим моделированием поведения двухфазной среды (воздух-вода), для уравнений (1) используем дискретизацию расчетной области с помощью метода контрольного объёма [1].

Главная цель этого метода состоит в следующем:

Расчётная область разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объёмов так, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объёме. Дифференциальные уравнения (1) интегрируются по каждому контрольному объёму. Для вычисления интегралов используют отдельные профили, которые описывают изменение исследуемой величины между узловыми точками. В результате находится дискретный аналог дифференциального уравнения, в который входят значения исследуемой величины в нескольких узловых точках.

Главное преимущество метода контрольного объёма является то, что в нём заложено точное интегральное сохранение таких величин, как: масса частицы, скорость движения и энергия для любого объёма, группы объёмов и всей расчётной области. Это свойство справедливо при любом количестве узловых точек, а не только для предельного случая их очень большого числа. Поэтому даже решение на грубой сетке будет удовлетворять точным интегральным балансам [2].

Для окончательной практической реализации численной математической модели необходимо описать расчетную область интегрирования, в которой движение потока определяется соответствующими граничными и начальными условиями. Необходимость в последних возникает в результате того, что для каждого стационарного местоположения пылезаборной сетки при соответствующем открытии предполагается моделирование уноса пылевых частиц до тех пор, пока поток не достигнет стационарного состояния.

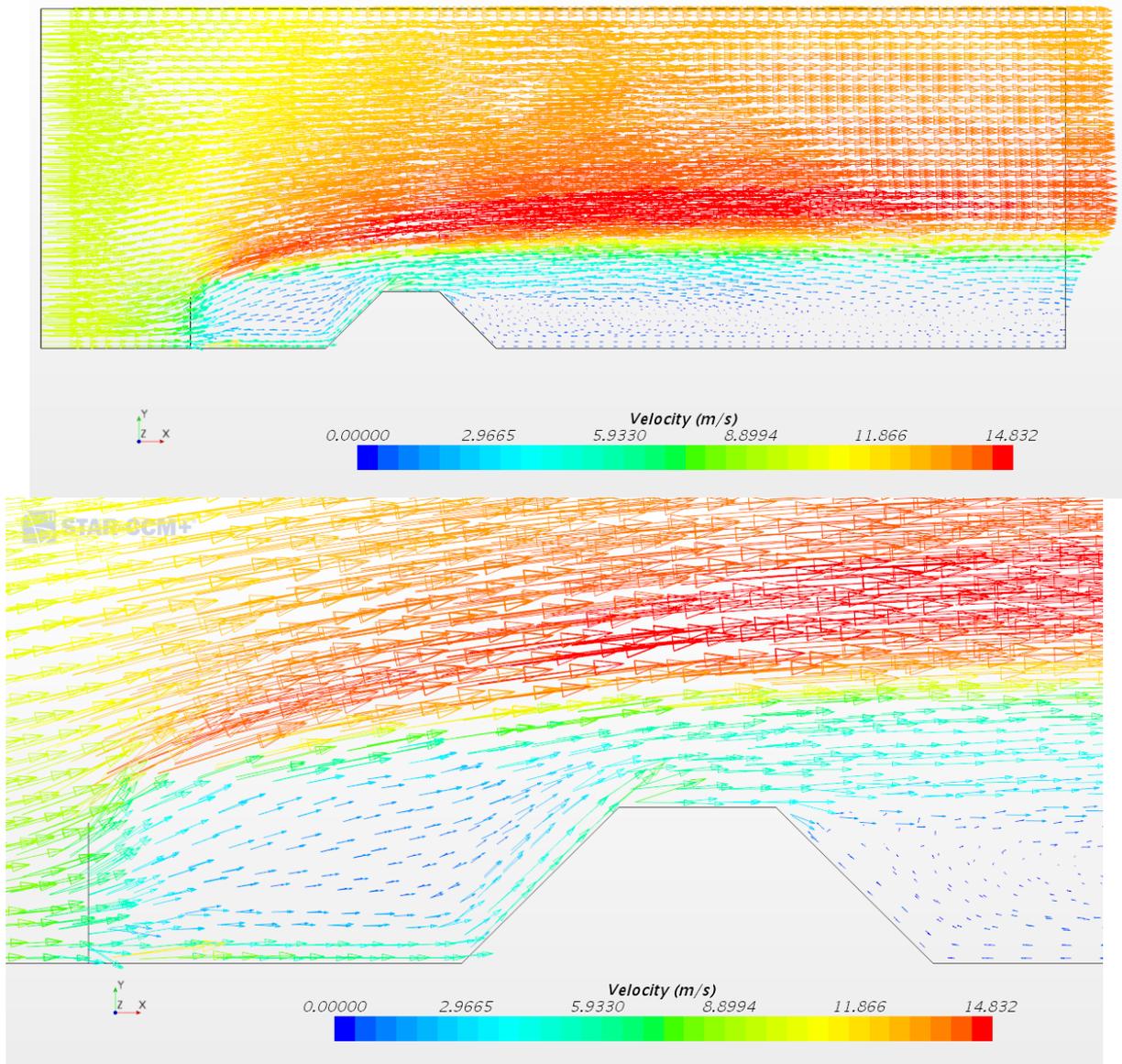


Рис. Векторы направления воздушного потока и примерные значения скоростей.

Для исследования динамики изменения характера взаимодействия воздушного потока и пылевого потока при столкновении с пылезаборной стенкой весь путь движения последних разбивается на несколько интервалов по времени. Каждый интервал соответствует определенной высоте поднятия пылезаборной стенки. Математическая модель стартует, и счет по ней ведется до тех пор, пока поток не установится в стационарное состояние.

Имея область интегрирования и сформулированные граничные и начальные условия, мы пока не можем перейти к численной реализации задачи, так как окончательно еще не решена проблема пылеуноса, то есть не закрыт вопрос об учете турбулентности пылевых угольных частиц в потоке. С этой целью используются математические модели турбулентности, определяющие дополнительные касательные напряжения, возникающие в пылевом потоке. Они включают дополнительные дифференциальные или

алгебраические уравнения, которые в соответствии с гипотезой Рейнольдса связывают касательные напряжения с осредненными параметрами потока. В случае необходимости дополнительно используются специальные модели для описания потоков вблизи сплошных стенок, где имеется сложный переход режима движения от ламинарного режима к турбулентному потоку пылевых угольных частиц.

В настоящее время наиболее доступными для применения, являются варианты классической  $k - \varepsilon$  модели [3, 4, 5], каждый из которых включает уравнения переноса для энергии турбулентности  $k$  и ее величины диссипации  $\varepsilon$ . Модели отличаются друг от друга по форме уравнений, расчету в переходной зоне, соотношению между турбулентными напряжениями и величинами скорости пылевых частиц.

Все существующие модели турбулентности, включая вышеупомянутые подходы, дают приближенное представление о физике внутренних явлений турбулентности пылевых угольных частиц. Это общепризнанный факт, который, тем не менее, заслуживает упоминания. Также надо заметить, что степень приближения и точность данной модели зависит от природы пылевого потока, к которому она применяется, и что выбор характеристик, которые вызывают «хорошее» и «плохое» приближение, должен быть основан на опыте.

Окончательный выбор моделей турбулентности делается прежде всего на основе универсальности, эффективности по затратам счетного времени, а также доступности исходных данных. Всем этим требованиям несомненно соответствуют варианты  $k - \varepsilon$  модели, что подтверждается их широко распространенным использованием. Стандартная, Чэна и RNG модели - наиболее экономичные по причине их простой обработки пристеночной области потока и требуют минимальной счетной разрешающей способности. Однако их точность ухудшается в обстоятельствах, когда основное представление о пристеночной области не имеет силы.

Таким образом, оптимально корректным путем окончательного замыкания математической модели турбулентности пылевых угольных частиц является постановка расширенных лабораторных исследований с целью качественной оценки разработанной модели и оценки ее адекватности реальным данным.

#### **Список литературы:**

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар С. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
2. Harlow, F.H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flows of fluid with free surface / F.H. Harlow, J.E. Welch, // - Phys. Fluids, 1982, № 8, pp 2182-2187.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

## **DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF AERODYNAMIC IMPACT OF A FLOW OF DUST COAL PARTICLES ON A DUST INTAKE WALL**

Nikolay S. Otdelkin, Evgeny .I. Adamov, Sergey .N. Sikarev

*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 and the dynamics of the behavior of coal dust. This approach makes it possible to more accurately take into account all the meteorological features of blowing: wind speed, flow turbulence, various geometric parameters of the warehouse, as well as the mutual location between several warehouses.

*Keywords:* mathematical model, air flow, coal dust, reloading, bulk cargo, dust mesh.