

## **Моделирование процесса пылеподавления при погрузке, разгрузке и транспортировке сыпучих материалов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Разработаны численная модель трехмерного течения аэродисперсной среды, которая качественно описывает основные особенности процесса доставки диспергированной воды к пылевому облаку и ее дальнейшего осаждения в зависимости от способов и режимов подачи воды системами пылеподавления, а также численная модель экологической безопасности при использовании пылеподавления оросительной системой «брандспойт». В результате данного моделирования удалось выявить наиболее эффективные способы и режимы подачи воды системами пылеподавления при различной ветровой обстановке.

**Ключевые слова:** моделирование, пылеподавление, режимы подачи воды, диспергированная вода.

Экологическая ситуация в Украине характеризуется критической техногенной нагрузкой на компоненты геосферы. Среди факторов формирования экоопасности следует выделить пыль, загрязняющую воздушную среду в процессе технологической деятельности человека. Значительное количество пыли поступает в воздух при реализации таких технологических процессов, как разрушение горных пород, погрузка и разгрузка сыпучих пылящих материалов.

Наиболее распространенными технологиями снижения экологической нагрузки на природную среду от воздействия пыли в морских портах являются технологии, полностью или частично закрывающие рабочую зону при погрузке-выгрузке, или технологии, орошающие различными жидкостями источники возникновения пыли. В Украине значительную часть сыпучих пылящих материалов грузят на суда порталными кранами. При этом система подавления пыли на кране отсутствует.

Объектами исследования являются процесс доставки диспергированной воды к пылевому облаку, образуемому при проведении погрузочно-разгрузочных работ сыпучих материалов, и формирования в нем водного аэрозоля с дисперсностью и временем пребывания, необходимыми для эффективного улавливания пылевых частиц и их осаждения в пределах рабочей зоны с помощью двух альтернативных систем пылеподавления, - на основе брандспойта и на основе атомайзера, а также разработка численной модели экологической безопасности при использовании пылеподавления оросительной системой «брандспойт».

Полагалось, что взятие груза производится из вершины штабеля грейфером для угля. При этом образуется сферическое пылевое облако радиусом 3 м.

**Численная модель.** Наиболее универсальное теоретическое описание процесса доставки диспергированной воды к пылевому облаку и ее дальнейшего осаждения возможно на основе непосредственного применения законов сохранения массы и количества движения к неоднородной по фазовому составу среде, включающей атмосферный воздух и водяные капли. Математической формой записи законов сохранения для вязкого газа являются уравнения Навье – Стокса, для капель – уравнение баланса действующих на каплю сил,

уравнивающего ее инерцию с равнодействующей сил тяжести, и аэродинамического сопротивления. Эти уравнения в области произвольной формы с заданными краевыми условиями могут быть совместно решены современными численными методами.

**Физико-математическая постановка задачи.** При математическом описании аэродисперсной среды были приняты следующие основные допущения:

– течение несущей газовой фазы - несжимаемое, изотермическое, турбулентное;

– турбулентность - изотропная;

– капли - сферические, неиспаряющиеся;

– объемом, занимаемым компактной струей и каплями, пренебрегали.

Взаимодействие фаз учитывалось с помощью модели «капля – источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие частиц в потоке проявлялось через дополнительный источник количества движения в осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье – Стокса, замыкавшихся полуэмпирической моделью турбулентности  $k$ - $\varepsilon$  типа.

**Модель газовой фазы.** В основу математической модели трехмерного квазистационарного турбулентного течения газовой среды в рабочей зоне положена система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье - Стокса.

Уравнения сохранения массы и количества движения в векторной форме записи имеют вид [1]

$$\nabla(\rho\vec{v})=0, \quad (1)$$

$$\nabla(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla(\vec{\tau})+S_f, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность;  $\vec{v}$  – вектор скорости;

$S_m$  – источник массы, обусловленный межфазным взаимодействием;

$p$  – статическое давление;

$S_f$  – источник количества движения, обусловленный межфазным взаимодействием;

$\tau$  – тензор напряжений.

Для замыкания системы осредненных по Рейнольдсу уравнений (1) – (2) использована  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности Лаундера – Сполдинга [2]. Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G-\rho\varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_m}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G-C_{2\varepsilon}\cdot\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность;

$k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $u_i$  – проекции осредненной скорости газа на оси трехмерной прямоугольной декартовой системы координат;

$x_j$  – координаты трехмерной прямоугольной декартовой системы координат;

$\mu$  – динамическая вязкость;

$\mu_T$  – турбулентная вязкость;

$\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$  – эмпирические коэффициенты;

$G$  – член, характеризующий генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений.

Турбулентная вязкость определяется по формуле Колмогорова – Прандтля:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где  $C_\mu$  – эмпирический коэффициент.

Для определения источникового члена  $S_f$  в уравнении (2) используется модель межфазного взаимодействия.

**Граничные условия.** Система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) (1) – (4) дополняется соответствующими граничными условиями для независимых переменных.

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия непрерывной фазы: на выходе сопел брандспойта или атомайзера – скорость воздуха; на наветренной границе, соответствовавшей атмосфере, скорость ветра; на остальных границах, соответствовавших атмосфере, – статическое давление; на твердых поверхностях – условие прилипания, аппроксимируемое функцией стенки.

Непосредственное применение условия прилипания требует модификации модели турбулентности в пристеночной области, где турбулентная вязкость близка к молекулярной, и значительного измельчения расчетной сетки вблизи стенки. Опыт численного моделирования трехмерных течений показывает, что сложность геометрической формы расчетной области часто приводит к тому, что именно потребная размерность расчетной сетки становится тем критическим параметром, который определяет возможность проведения вычислительного эксперимента на располагаемой технической базе. Поэтому вместо условия прилипания для описания турбулентного пограничного слоя используются функции стенки – набор полуэмпирических функций, связывающих значения независимых переменных в центре пристеночной расчетной ячейки со значениями соответствующих переменных на стенке [3].

Разработанная численная модель трехмерного течения аэродисперсной среды качественно верно описывает основные особенности процесса доставки диспергированной воды к пылевому облаку и ее дальнейшего осаждения в зависимости от способов и режимов подачи воды системами пылеподавления.

При моделировании процесса пылеподавления методом орошения сыпучих материалов в процессе погрузки в условиях штиля, встречного и спутного ветра расчетная область охватывает зеркально-симметричный фрагмент пространства. Этот фрагмент ограничивается штабелем насыпного груза и подпорными стенками и имеет протяженность по 7,625 м в противоположные стороны от центра пылевого облака с прилегающим к нему участком атмосферы радиусом 3 м. Для моделирования орошения в условиях бокового ветра протяженность расчетной области была увеличена до 35 м (на полную длину штабеля) в подветренную сторону от центра пылевого облака.

В обоих случаях границы пылевого облака моделировались проницаемой сферической поверхностью с центром, расположенным в вершине штабеля.

Исследовано несколько вариантов орошения пылевого облака брандспойтом, различавшихся углом подачи, полным напором, скоростью и направлением ветра (см. таблицу 1).

В результате расчетов установлено, что при угле подачи 45° компактная струя достигает поверхности штабеля, не распадаясь. Поэтому для дальнейшего анализа были отобраны четыре варианта с углом подачи 60°.

Из рис. 1 видно, что в варианте № 1 большая часть капель, за исключением самых мелких и самых крупных, попадает в пылевое облако. При этом все капли осаждаются в пределах складской площадки.

Из рис. 2 видно, что в варианте № 2 все капли попадают в пылевое облако. Однако самые мелкие капли выносятся спутным ветром за пределы складской площадки.

Таблица 1. Варианты орошения пылевого облака брандспойтом

Вариант	Угол, град	Напор, м	Ветер	
			Скорость, м/с	Направление
1	60	40	0	–
2	60	25	3	спутный
3	60	40	3	встречный
4	60	40	3	боковой

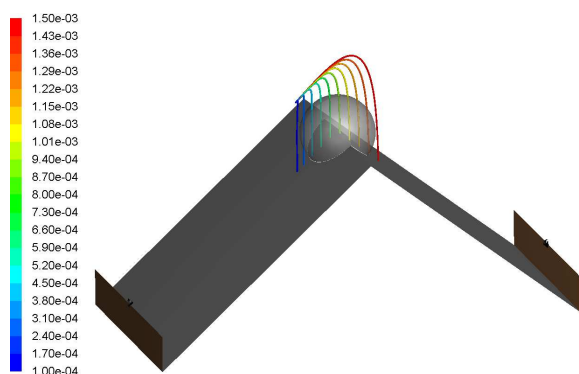


Рис. 1. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 1)

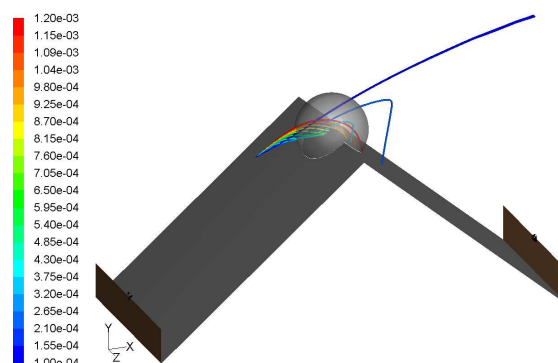


Рис. 2. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 2)

Из рис. 3 видно, что в варианте № 3 ни одна из капель не достигает пылевого облака: все они сносятся назад встречным ветром. При этом большинство капель осаждаются в пределах складской площадки. Самые мелкие капли выносятся встречным ветром за пределы складской площадки.

Из рис. 4 видно, что в варианте № 4 часть представительных капель достигает пылевого облака. При этом большинство капель осаждаются в пределах складской площадки. Самые мелкие капли выносятся боковым ветром за пределы складской площадки.

В результате разработанной численной модели удалось выявить наиболее эффективные способы и режимы подачи воды системами пылеподавления при различной ветровой обстановке

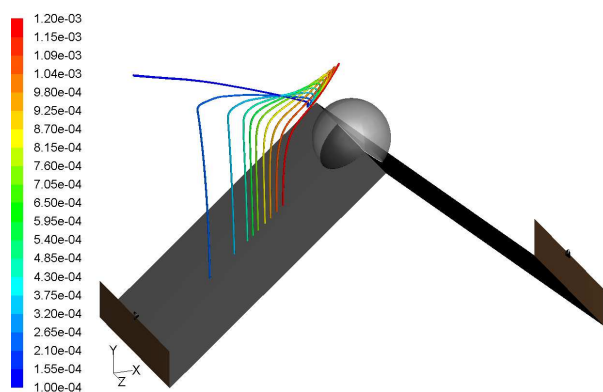


Рис. 3. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 3)

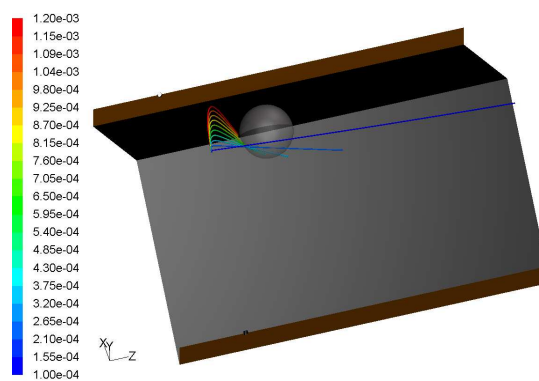


Рис. 4. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 4)

### Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа/ Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
2. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
3. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – No. 3. – P. 269 - 289.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Бетін О.В. Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.  
Поступила в редакцію 16.12.10.

### Моделювання процесу пилопозаглушення при навантаженні, розвантаженні та транспортування сипких матеріалів

Розроблено числову модель тривимірної течії аеродисперсного середовища, яка якісно описує основні особливості процесу доставки диспергованої води до пилової хмари і подальшого її осадження залежно від способів і режимів подачі води системами пилозаглушення, а також числову модель екологічної безпеки при використанні пилозаглушення зрошувальної системи «брандспойт». У результаті цього моделювання вдалося виявити найбільш ефективні способи та режими подачі води системами пилозаглушення при різних вітрових обставинах.

**Ключові слова:** моделювання, пилозаглушення, режими подачі води, диспергована вода.

### Simulation of the dust suppression loading, unloading and transportation of bulk materials

The developed numerical model of three-dimensional flow aerodisperse environment quality and correctly describes the main features of the delivery of water to the dispersed dust clouds and its further deposition, depending on the ways and modes of supply of water dust suppression system. A numerical model of ecological safety in the use of dust control irrigation system "hose". As a result of this simulation were able to identify the most effective ways and modes of water supply systems, dust suppression under different wind conditions.

**Keywords:** modeling, dust control, modes of water supply, water is dispersed.