

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРОЦЕССА УСТАНОВКИ ВОДНЫХ ЗАВЕС  
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР**

**С.А. Вамболь**

Национальный университет гражданской защиты Украины

ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, 61070, Украина. E-mail: [k106@mail.ru](mailto:k106@mail.ru)

Разработана математическая модель газовой фазы процесса установки дисперсных водных завес, используемых в системах управления экологической безопасностью. Рассмотрена газовая фаза трехмерного квазистационарного турбулентного течения в рабочей зоне. Модель трехмерного течения среды качественно верно описывает основные особенности процесса формирования водной завесы. Результаты работы являются основой для создания комплексных мероприятий, обеспечивающих эффективную систему управления экологической безопасностью.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, водная завеса, газовая фаза, математическое моделирование.

**МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОВОЇ ФАЗИ ПРОЦЕСУ ВСТАНОВЛЕННЯ ВОДЯНИХ ЗАВІС  
У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКОЮ  
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДИСПЕРСНИХ СТРУКТУР**

**С. О. Вамболь**

Національний університет цивільного захисту України

вул. Чернівська, 94, м. Харків, 61070, Україна. E-mail: [k106@mail.ru](mailto:k106@mail.ru)

Розроблена математична модель газової фази процесу створення дисперсних водних завіс, що використовуються в системах управління екологічною безпекою. Розглянуто газову фазу тривимірної квазістационарної турбулентної течії в робочій зоні. Модель тривимірного перебігу середовища якісно вірно описує основні особливості процесу формування водної завіси. Результати роботи є основою для створення комплексних заходів, що забезпечують ефективну систему управління екологічною безпекою.

**Ключові слова:** екологічна безпека, водна завіса, газова фаза, математичне моделювання.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Водные завесы (ВЗ) широко применяются в современных стационарных системах обеспечения техногенной безопасности, например, в системах противопожарной защиты, а также являются одним из средств защиты людей и техники во время тушения пожаров. Постановка ВЗ и завес из нейтрализующих растворов является основным способом ограничения распространения и нейтрализации облаков, образующихся при выбросе (проливе) аварийно и химически опасных веществ (АХОВ) (аммиак, хлор, окислы азота, сернистый газ, хлористый и фтористый водород, окись этилена, фосген и др.) (ГОСТ Р 22.1.10–2002). Создание систем управления техногенно-экологической безопасностью неизменно связано с адекватным математическим моделированием газодинамических процессов, происходящих в экологической среде.

Целью работы является математическое моделирование газовой фазы в процессе формирования и постановки водных завес атомайзером.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

До настоящего времени отсутствуют теоретически обоснованные методики расчета режимов формирования водных завес, которые бы позволили определить расчетным путем их основные параметры: геометрические размеры в различных условиях, пространственное распределение концентрации капель, взаимодействие с воздушными и тепловыми потоками, влияние технических параметров, методы их оптимизации [1]. Опыт проектирования систем постановки ВЗ показывает необходимость углубленного исследования процессов доставки диспергиро-

ванной воды и ее дальнейшего осаждения с целью организации необходимой пространственной структуры водного аэрозоля и выработки на этой основе эффективных конструктивных решений.

*Объектом исследования* служит процесс формирования газовой фазы при постановке ВЗ атомайзером.

*Предмет исследования* – математическая модель газовой фазы трехмерного квазистационарного течения в рабочей зоне. В дальнейшем математические зависимости позволяют рассчитать возможность доставки диспергированной воды на необходимые высоту и дальность при различных режимах подачи воды системой постановки ВЗ на основе атомайзера.

Основой для описания процесса постановки ВЗ являются законы сохранения массы и количества движения к неоднородной по фазовому составу среде, включающей атмосферный воздух и водяные капли. Газовая составляющая описывается уравнениями Навье–Стокса. В качестве допущений принято следующее:

- течение несущей газовой фазы несжимаемое, изотермическое, турбулентное;
- турбулентность изотропная.

Модель газовой фазы трехмерного квазистационарного турбулентного течения в рабочей зоне основана на системе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса.

Уравнения сохранения массы и количества движения в векторной форме записи имеют вид [2]:

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

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

где  $\rho$  – плотность;  $\vec{u}$  – вектор скорости;  $p$  – статическое давление;  $S_f$  – источник количества движения, обусловленный межфазным взаимодействием;  $\tau$  – тензор напряжений, определяемый выражением

$$\tau = (\mu + \mu_T) \left( \nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right),$$

где  $\mu$  – молекулярная вязкость;  $\mu_T$  – турбулентная вязкость.

Для замыкания системы осредненных по Рейнольдсу уравнений (1)–(2) использована  $k$ - $\epsilon$  – модель турбулентности Лаундера–Сполдинга [3]. Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\epsilon$  имеют вид

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}, \quad (4)$$

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;  $\epsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  – эмпирические коэффициенты;  $G$  – член, характеризующий генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений и определяемый выражением

$$G = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}.$$

Турбулентная вязкость определяется по формуле Колмогорова–Прандтля:

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

где  $C_\mu$  – эмпирический коэффициент.

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

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

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия непрерывной фазы: на выходе сопла атомайзера – скорость воздуха, на границе, соответствовавшей 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 необходимая 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 (точке  $P$ ) со значениями соответствующих переменных на стенке и базирующихся на предположении Лаундера и Сполдинга [4].

Закон стенки для осредненной скорости имеет вид:

$$U^* = \begin{cases} y^* & \text{при } y^* \leq 11,225, \\ \frac{1}{K} \ln(Ey^*) & \text{при } y^* > 11,225, \end{cases} \quad (6)$$

где  $K$  – постоянная Кармана;  $E$  – эмпирическая постоянная.

Безразмерные параметры  $U^*$  и  $y^*$  определяются выражениями

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho}, \quad (7)$$

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} U_P}{\mu}, \quad (8)$$

где  $U_P$  – осредненная скорость газа в точке  $P$ ;  $k_P$  – кинетическая энергия турбулентности в точке  $P$ ;  $\tau_w$  – напряжение трения на стенке;  $\rho$  – плотность

газа;  $U_p$  – расстояние точки  $P$  от стенки;  $\mu$  – динамическая вязкость.

Уравнение (4) переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  решается во всей расчетной области, включая пристеночные ячейки. Граничное условие для  $k$ , задаваемое на стенке, имеет вид

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

где  $n$  – локальная координата, нормальная к стенке.

Генерация кинетической энергии турбулентности  $G$  и скорость ее диссипации  $\varepsilon$ , которые входят в источникный член уравнения (4), в пристеночных ячейках рассчитываются на основе гипотезы о локальном равновесии. При этом допущении генерация кинетической энергии турбулентности и скорость ее диссипации в пристеночном контрольном объеме полагаются одинаковыми. В результате уравнение (5) для  $\varepsilon$  в пристеночных ячейках не решается, вместо этого  $\varepsilon$  определяется по формуле:

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{K \cdot U_p}, \quad (10)$$

где  $K$  – эмпирическая постоянная.

Таким образом, используя полученные результаты возможно численное моделирование газовой фазы трехмерного квазистационарного турбулентного

течения в рабочей зоне формирования водяной завесы атомайзером.

**ВЫВОДЫ.** Разработана математическая модель газовой фазы процесса установки дисперсных водных завес на основе классических уравнений газодинамики. Модель трехмерного течения среды качественно верно описывает основные особенности процесса формирования водной завесы. Результаты работы являются основой для создания комплексных мероприятий управления экологической безопасностью, использующих многофазные дисперсные структуры. Такие системы позволят обеспечить необходимые технические, геометрические и физические параметры безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование процесса пылеподавления при погрузке, разгрузке и транспортировке сыпучих материалов / Н.В. Кобрина, В.Е. Костюк, В.Н. Кобрин, С.А. Вамболь // Сборн. науч. трудов Национального аэрокосмического университета "ХАИ" «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии». – 2010. – Вып. 48. – С. 248–252.
2. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский – М.: Наука, 1978. – 736 с.
3. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. – London: Academic Press, England, 1972.
4. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – № 3. – PP. 269–289.

### MODELLING OF GASEOUS PHASE OF WATER CURTAIN FORMING IN ECOLOGICAL SAFETY CONTROL SYSTEMS WITH DISPERSED STRUCTURES

**S. Vambol**

National University of Civil Defence of Ukraine

vul. Chernyshevskaja, 94, Kharkiv, 61070, Ukraine. E-mail: [k106@mail.ru](mailto:k106@mail.ru)

The mathematical model of gaseous phase of water curtain forming, used in ecological safety control systems, is developed. The gaseous phase of three-dimensional quasi-stationary turbulent current in operation zone is considered. The model of three-dimensional medium flow describes the key peculiar features of water curtain forming with high accuracy. The research results form the background for complex measures arrangement for effective control system for ecological safety maintenance.

**Key words:** ecological safety, water curtain, gaseous phase, mathematical modelling.

#### REFERENCES

1. Modelling of dust suppression at loading, unloading and transporting of friable materials N.V. Kobrina, V.E. Kostuk, V.N. Kobrin, S.A. Vambol // *Open informative and computer integrated technologies: Collected works.* – Kharkiv: National Aerospace University "KhAI", 2010. – Iss. 48. – PP. 248–252. [in Russian]
2. *Mechanics of liquid and gas* / L.G. Loytchyansky. – Moscow: Nauka, 1978. – 736 p. [in Russian]
3. Launder B.E., Spalding D.B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence.* – London: Academic Press, England, 1972.
4. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* – 1974. – № 3. – PP. 269–289.

Стаття надійшла 20.10.2012.

Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Бахаревим В.С.