

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

О. И. Седяров, О. В. Матрехина, В. В. Куранов (Москва)

Пожары являются одной из наиболее частых причин возникновения чрезвычайных ситуаций на предприятиях легкой промышленности. Как показывает пожарная практика, самым эффективным мероприятием по обеспечению безопасности людей при пожаре остается эвакуация.

Кафедрой промышленной безопасности, экологии и строительного проектирования» Московского государственного университета дизайна и технологии (МГУ ДТ), совместно с Учебно-методическим центром ГО и ЧС Москвы были проанализированы современные технологии производства обуви и используемые материалы с точки зрения возможности возникновения и развития чрезвычайных ситуаций, а также разработана обобщенная модель движения людских потоков с учетом динамики развития поражающих факторов чрезвычайных ситуаций.

В основу модели динамики развития пожара положены современные достижения в области вычислительной гидродинамики и теории горения, позволяющие моделировать динамику распространения поражающих факторов пожаров (дым, продукты горения, высокая температура и др.).

Для моделирования пожаров использована система, состоящая из уравнения неразрывности среды, трех уравнений сохранения количества движения вдоль каждой из координат, уравнения сохранения энтальпии, а также двух уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии. Для численной реализации данная система уравнений представлялась в виде следующего обобщенного уравнения переноса при решении задачи в декартовых координатах:

$$\frac{\partial(\rho\Phi_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\Phi_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\Phi_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\Phi_i)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma\phi \frac{\partial\Phi_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma\phi \frac{\partial\Phi_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma\phi \frac{\partial\Phi_i}{\partial z} \right) + S\phi, \quad (1)$$

где  $\Phi_i$  – одна из указанных выше переменных;

$S\phi, \Gamma\phi$  – источниковые члены и коэффициенты для каждой из переменных, значения которых приведены в таблице.

Плотность и смеси газов вычисляется из уравнения состояния. Давление определяется из преобразованного уравнения неразрывности для поправок давления с последующей коррекцией полей скоростей и давления для выполнения условия неразрывности.

Процессы турбулентного переноса реализуются с помощью  $k - \epsilon$  модели турбулентности с учетом эффектов плавучести.

Для оценки распространения поражающих факторов пожара используется программное обеспечение Fire Dynamics Simulator (FDS), позволяющее оценивать динамику изменения температуры, концентрации кислорода, угарного газа, сажи и др., а также, что не маловажно для моделирования эвакуации, – задымленность.

## Параметры и коэффициенты основной системы уравнений

$i$	$\Phi_i$	$\Gamma_\Phi$	$S_\Phi$
1	1	0	0
2	$u$	$\frac{\mu_{eff}}{Re_1}$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_u \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_u \frac{\partial w}{\partial x} \right)$
3	$v$	$\frac{\mu_{eff}}{Re_1}$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_v \frac{\partial w}{\partial y} \right) - (\rho - \rho_e) \frac{g r_1}{u_1^2}$
4	$w$	$\frac{\mu_{eff}}{Re_1}$	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_w \frac{\partial w}{\partial z} \right)$
5	$c_{fu}$	$\frac{\Gamma_u}{S c_{eff}}$	$\frac{1}{Re_1} R_{fu}$
6	$f$	$\frac{\Gamma_u}{S c_{eff}}$	0
7	$h_{mix}$	$\frac{\Gamma_u}{Pr}$	$S_{rad} \frac{r_1}{c_p T_1 \rho_1 u_1}$
8	$k$	$\frac{\Gamma_u}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \varepsilon$
9	$\varepsilon$	$\frac{\Gamma_u}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} [C_1 G_k (1 + R_f) - C_2 \rho \varepsilon]$
			$G_k = \frac{\mu_t}{Re_1} = \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \right.$ $\left. + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{g r_1}{u_1^2} \right\}$

Основу модели движения людских потоков составляет агентная (многоагентная) система, в которой определяется поведение на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности многих (десятков, сотен) агентов, каждый из которых следует своим собственным правилам, живёт в общей среде и взаимодействует со средой и с другими агентами.

Значение параметров функционирования элементов системы — скорости движения людей — изменяются в результате взаимодействия между элементами (агентами) и влияния внешних факторов: эмоциональных воздействий, определяемых психологической напряженностью ситуации, и физиологических воздействий, определяемых видами пути их движения. Степень взаимодействия агентов зависит от расположения соседних агентов относительно друг друга: при уменьшении свободы для передвижения (показателем чего служит рост плотности потока) скорость движения человека снижается. Любое взаимодействие между людьми в потоке происходит при определенном уровне влияния внешних факторов, поэтому наблюдаемые скорости движения людей являются результатом совместного влияния их взаимодействия и воздействия внешних факторов. В чрезвычайных ситуациях, когда психологический фактор играет большую роль, скорость движения увеличивается при тех же плотностях потока. И это понятно, так как страх, овладевающий людьми, заставляет их бежать от опасности. Это общее желание, одинаковый для всей массы людей психологический импульс, способствует согласованности движения, что позволяет увеличить (против нормальных условий) скорость движения при той же плотности потока.

Скорость движения – лишь один из показателей двигательной активности, а его интенсивность определяется уровнем эмоционального состояния. Моделирование людского потока как случайного процесса осуществляется достаточно просто лишь при свободном движении, когда движение одних людей не оказывает существенного влияния на скорость других и их взаимные перемещения могут рассматриваться как независимые.

По нашим оценкам, агентное моделирование является подходом более универсальным методом, так как оно позволяет учесть любые сложные структуры и поведения. Другое преимущество агентного моделирования заключается в том, что разработка модели возможна в отсутствии знания о глобальных зависимостях, что особенно важно при моделировании поведения в условиях чрезвычайных ситуаций: мы можем знать очень немного о взаимодействии факторов на глобальном уровне или о глобальной последовательности действий и т.п., но, понимая индивидуальную логику поведения участников процесса, можем построить агентную модель и определить по ней глобальное поведение.

Анализ результатов моделирования движения людских потоков с учетом динамики развития поражающих факторов чрезвычайных ситуаций позволит разработать более эффективные мероприятия по организации эвакуации при чрезвычайных ситуациях на предприятиях легкой промышленности.