

И.В. Костерин¹, В.И. Присадков², В.В. Лицкевич³
(¹Ивановский институт ГПС МЧС России, ²ВНИИПО МЧС России;
e-mail: kosteriniv@gmail.com)

АПРОБАЦИЯ ЗОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В АТРИУМЕ ПОЛНОМАСШТАБНЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ

Описан ряд экспериментальных исследований, посвященных изучению закономерностей развития пожара в атриуме здания. Приведено описание математической модели стохастического имитатора оценки высоты незадымляемой зоны при пожаре в зданиях с многосветными пространствами на основе модифицированной зональной модели.

Ключевые слова: эксперимент, зональная модель, массовый расход, конвективная колонка, атриум.

I.V. Kosterin, V.I. Prasadkov, V.V. Litskevich
**APPROBATION AREA MODELS OF FIRE
IN THE ATRIUM OF FULL-SCALE TEST**

Describes a series of experimental studies examining the patterns of development of a fire in the atrium of the building. The description of the mathematical model of the stochastic simulator of estimates height of the zone is not filled with smoke during a fire in buildings with clerestory spaces on the basis of a modified zonal model.

Key words: experiment, zonal model, mass flow, convective column, atrium.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 13 ноября 2013 г.

Экспериментальные исследования распространения дыма в атриуме здания являются важнейшей составляющей изучения закономерностей развития пожара на подобных объектах. К сожалению, по данному направлению в России на сегодняшний день выполнен весьма небольшой объём экспериментальных исследований, в отличие от ряда зарубежных стран.

Показательным является, к примеру, строительство в Гонконге специального полигона с атриумом объёмом более 28000 м³ с целью проведения экспериментальных исследований распространения дыма по его объёму [1, 2]. Предварительные исследования процесса заполнения дымом были проведены на испытательном оборудовании, схема которого показанном на рис. 1. Очаг пожара дизельного топлива в противне диаметром 1 м находился в центре пола атриума. Все вентиляционные проемы в покрытии и окна вдоль каждого коридора атриума были закрыты, в то время как три двери на первом этаже были открыты. Высота границы слоя дыма фиксировалась по визуальным наблюдениям и показаниям термопар.

В начальной стадии скорость тепловыделения пожара в противне быстро увеличивалась. Конвективная колонка приняла форму перевернутого конуса, далее её диаметр быстро увеличивался до 15 м. Воздействие на потолок началось, когда её диаметр был 10 м, что сравнимо с шириной атриума. Подпотолочная струя формировалась, имея скорость от 1 до 2 м·с⁻¹.

Устойчивый слой дыма сформировался за две минуты и позже становился всё толще. Когда нижняя граница дыма была на высоте 20 м, толщина слоя дыма варьировалась на 2 м. До окон четвертого этажа (~12 м выше уровня земли) слой дыма снижался шесть минут.

Когда слой дыма достиг окон второго этажа (6 м над уровнем земли), далее он не снижался. Эти экспериментальные данные по высоте нижней границы слоя дыма показаны на рис. 2. Для вышеупомянутых экспериментов по заполнению атриума дымом, средняя мощность тепловыделения была равна 650 кВт.

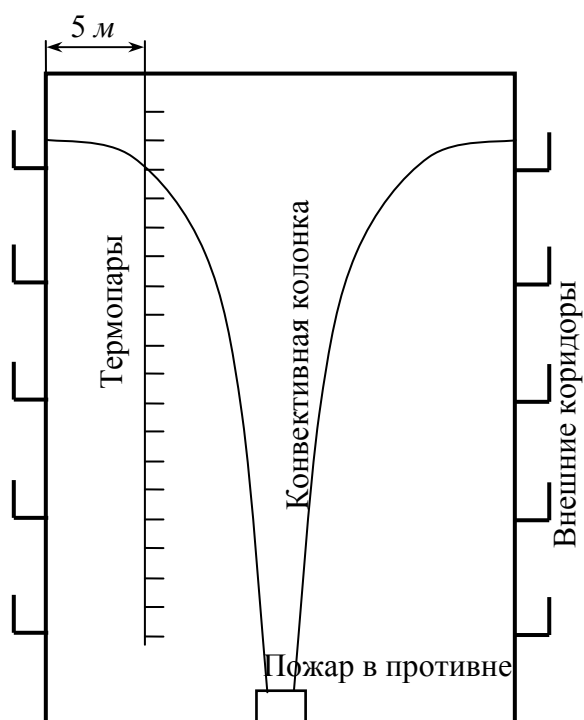


Рис. 1. Схема эксперимента

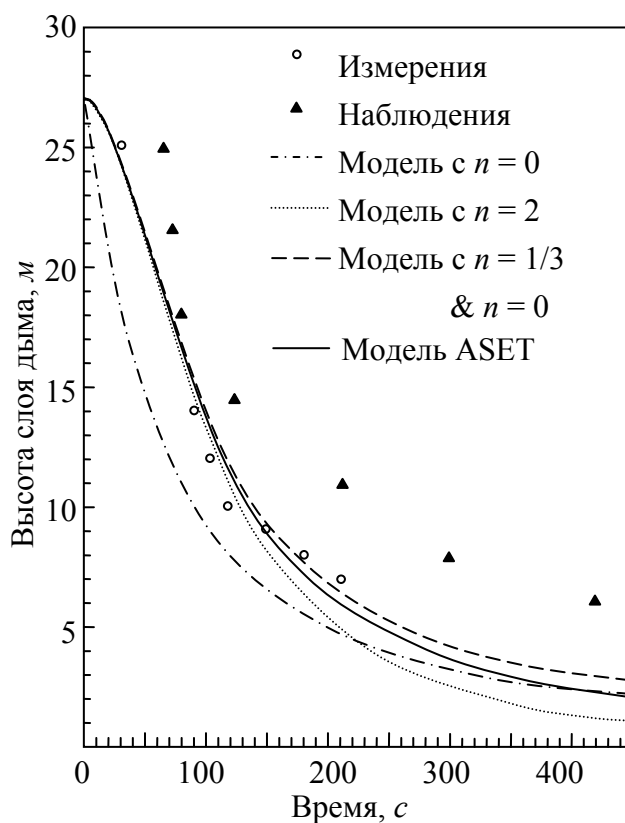


Рис. 2. Сравнение эксперимента с расчётами

В 2008 г. эксперименты по исследованию распространения пожара в атриуме проводил С. Gutierrez-Montes с учениками в Испании. Общий вид атриума приведен на рис. 3. Этот полномасштабный комплекс имеет призматическую структуру размерами 19,5 м × 19,5 м × 17,5 м и пирамидальную крышу высотой 2,5 м в центре. Стены и крыша сделаны из 6-миллиметровой стали, а пол — из бетона. Также имеются 4 вытяжных вентилятора на крыше, каждый из которых имеет диаметр 0,56 м, а номинальный расход — 3,8 м³/с. Также имеются 8 отверстий в нижней части стен. Каждое отверстие имеет размеры 4,88 м × 2,5 м.



Рис. 3. Общий вид атриумного здания (г. Мурсия, Испания)

На рис. 4 изображён очаг пожара в проводимых опытах; **тест 1**: 0,92 м – диаметр бассейна; 1,32 МВт – мощность пожара; **тест 2**: 1,17 м – диаметр бассейна; 2,28 МВт – мощность пожара; **тест 3**: 1,17 м – диаметр бассейна; 2,34 МВт – мощность пожара.

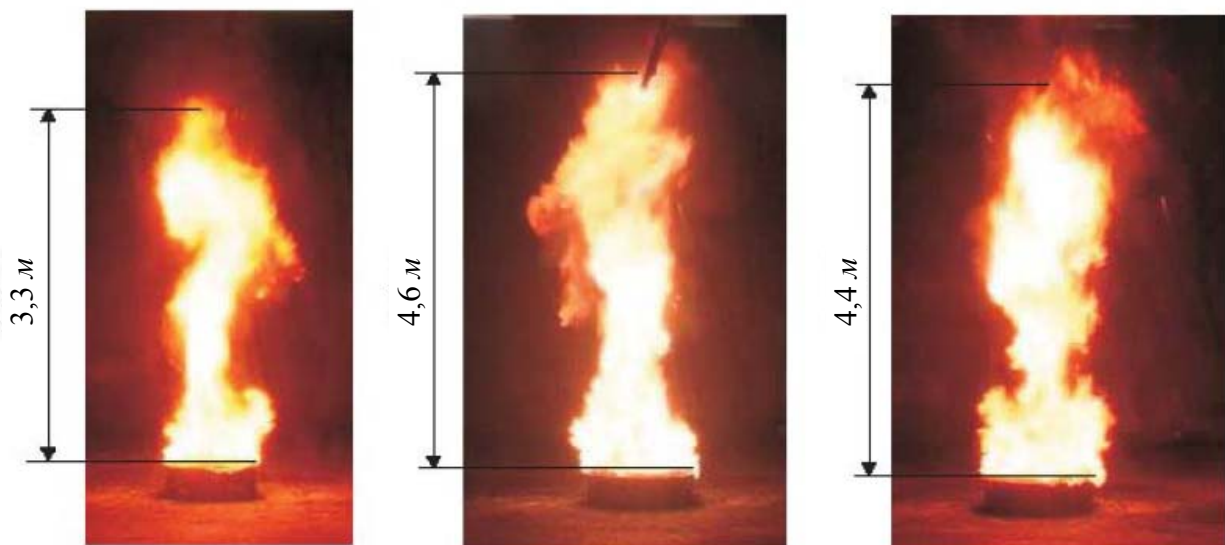


Рис. 4. Высота пламени в стационарных испытаниях

Экспериментальные исследования по изучению закономерностей распространения дыма в атриуме проводятся также в Канаде, Испании, Англии, Дании.

Результаты экспериментальных исследований распространения дыма в атриуме использованы авторами при разработке стохастического имитатора для оценки высоты незадымляемой зоны при пожаре в зданиях с многосветными пространствами для двух случаев [3]:

1. Неустановившийся пожар (распространение горения по твёрдой "плоской" пожарной нагрузке).

2. Пожар с установившимся горением (горение ЛВЖ, ГЖ).

Основой использовавшейся зональной модели является модель конвективной колонки:

$$\dot{m} = 0,21 \left(\frac{\rho_0^2 g}{T_0 C_p} \right)^{1/3} Q_c^{1/3} Z^{5/3}, \quad (1)$$

где \dot{m} – приток массы в задымлённую зону через конвективную колонку;

ρ_0 – начальная плотность газовой среды, $кг/м^3$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

T_0 – начальная температура, $К$;

C_p – теплоёмкость газовой среды, $Дж/(кг·К)$;

Q_c – конвективная составляющая мощности пожара Q , установленная $Q_c = 0,7 \cdot Q$, $кВт$;

Z – высота конвективной колонки, $м$.

Ведущим фактором модели является мощность пожара, которую в инженерных расчётах часто моделируют потенциальной функцией времени $Q = a \cdot t^n$.

Такая форма в зависимости от значения n может задавать динамику различных стадий пожара, а константа a – определять его масштаб.

Так, значению $n = 2$ соответствует так называемый круговой пожар с распространением горения радиально от точки первичного загорания:

$$Q = \Psi_{уд} Q_p^n \pi v^2 t^2, \quad (2)$$

где $\Psi_{уд}$ – удельная скорость выгорания, $кг/м^2$;

Q_p^n – низшая теплота сгорания, $Дж/кг$;

v – скорость распространения фронта пламени, $м/с$.

В этом случае, как видно из формулы (1), значение параметра $a = \Psi_{уд} Q_p^n \pi v^2$.

Значению $n = 1$ соответствует полосовой пожар с распространением горения от места первичного загорания вдоль полосы, занятой горючими материалами:

$$Q = \Psi_{уд} Q_p^n b v t, \quad (3)$$

где b – ширина полосы, $м$.

При полосовом пожаре масштабный параметр $a = \Psi_{уд} Q_p^n b v$.

Значению $n = 1/3$ соответствует горение жидкостей на начальной стадии пожара от момента воспламенения до выхода мощности на стационар:

$$Q = \left(\frac{t}{t_{\text{ст}}} \right)^{1/3} \Psi_{\text{уд}} Q_p^n S, \quad (4)$$

где S – площадь розлива ГЖ, м^2 ;

$t_{\text{ст}}$ – характерное для данной жидкости время стабилизации скорости выгорания.

$$\text{Масштабный параметр } a = \frac{\Psi_{\text{уд}}}{t_{\text{ст}}^{1/3}} Q_p^n S.$$

Значению $n = 0$ соответствует пожар с установившимся горением на постоянной площади:

$$Q = \Psi_{\text{уд}} Q_p^n S, \quad (5)$$

где S – площадь горения, м^2 .

В случае установившегося горения масштабный параметр равен мощности пожара.

Отметим, что массовый расход дыма увеличивается с высотой за счёт вовлекаемого в конвективную колонку воздуха.

Так как в экспериментах массовый расход непосредственно не измерялся, в моделях перешли от массовых к объёмным параметрам по соотношению $V = m/\rho$ между объёмом V , массой m и плотность газа ρ .

Тогда скорость изменения объёма задымлённой зоны равна

$$\dot{V} = \frac{Q_c}{\rho T C_p} + \frac{\dot{m}}{\rho_0}, \quad (6)$$

где первый член – скорость увеличения объёма дыма из-за теплового расширения, вызванного притоком тепла Q_c , приносимого конвективной колонкой, а второй член – объёмный расход воздуха, вовлекаемого в конвективную колонку.

Пользуясь тем, что для идеальных газов $\rho T = \rho_0 T_0$, а скорость увеличения объёма дыма в атриуме площадью A связана со скоростью уменьшения высоты незадымляемой зоны как $V = -y A$, получим известную зональную модель *ASET*

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{Q_c}{A \rho_0 T_0 C_p} - \frac{0,21}{A} \left(\frac{g}{\rho_0 T_0 C_p} \right)^{1/3} Q_c^{1/3} Y^{5/3}, \quad (7)$$

Уравнение (7) решалось численно.

Как следует из (1), массовый расход с высотой колонки растёт почти квадратично. При большой высоте колонки, что характерно для атриумов, массовый расход относительно большой, а избыточная температура дыма при этом, за счёт подмешивания воздуха, соответственно низкая. Поэтому увеличение объёма дыма из-за теплового расширения много меньше объёма вовлечённого в колонку воздуха. Сделав допущение о том, что объём задымлённой зоны

растёт в основном за счёт вовлекаемого воздуха, пренебрежём первым членом в уравнении (7) и, рассматривая Q_c как функцию времени $Q_c = 0,7a \cdot t^n$, получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$Y^{5/3} dy = -\frac{0,21}{A} \left(\frac{g}{\rho_0 T_0 C_p} \right)^{1/3} Q_c^{1/3} dt, \quad (8)$$

С учётом начального условия $Y(0) = H$, уравнение (8) можно проинтегрировать как:

$$\frac{3}{2}(Y^{-2/3} - H^{-2/3}) = \frac{0,21}{A} \left(\frac{g}{\rho_0 T_0 C_p} \cdot 0,7a \frac{3}{n+3} \right)^{1/3} t^{n/3+1}, \quad (9)$$

где H – высота атриума.

Решение уравнения (9) относительно Z даёт динамику высоты незадымлённой зоны:

$$Y = \left(\frac{0,18}{A} \left(\frac{g}{\rho_0 T_0 C_p} \cdot \frac{a}{n+3} \right)^{1/3} t^{n/3+1} + H^{-2/3} \right)^{-3/2}, \quad (10)$$

а его решение относительно t (время задымления атриума до высоты Z)

$$t = \left(\frac{A}{0,18} \left(\frac{\rho_0 T_0 C_p}{g} \cdot \frac{n+3}{a} \right)^{1/3} (Y^{-2/3} - H^{-2/3}) \right)^{\frac{3}{n+3}}. \quad (11)$$

Модификация используемой модели заключается в том, что в одном расчёте модель учитывает 2 стадии пожара: вначале – стадию развития и в дальнейшем – стадию стационарного горения, в то время как стандартная модель учитывает только одну стадию: либо стационар, либо стадию развития.

Направлением дальнейших исследований является апробация стохастического имитатора и повышение точности и достоверности получаемых выходных данных.

Литература

1. **Chow W.K., R. Huo, M.K. Fong, Fan Weicheng, Cui E, Li Yuanzhou, P.L. Ho, Yuan Liming, L.T. Wong** PolyU/USTC Atrium: A full-scale burning facility – Preliminary experiments // Journal of Applied Fire Science, Vol. 8, No. 3. P. 229-241 (1999).
2. **Chow W.K.** Atrium hot smoke tests in evaluating performance of smoke exhaust systems, paper accepted to present at International Congress "Smoke Control in Buildings and Tunnels", School of Industrial and Telecommunication Engineers, Santander (Spain), October 15-17, 2008.
3. **Костерин И.В.** Стохастическое моделирование процесса развития пожара в уникальных зданиях и сооружениях // Матер. XVIII междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2013. С. 103,104.