

## РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Дмитриченко А.С., к.т.н., доцент, Полевода И.И., к.т.н., доцент,  
Осяев В.А., Красовский С.Г. \*, к.ф.-м.н., доцент, Деменчук А.К. \*, к.ф.-м.н.,  
Макаров Е.К. \*, д.ф.-м.н., профессор, Кузьмицкий В.А., д.ф.-м.н., ст.н.с.  
\*Институт математики НАН Беларуси

*The study was performed with the aim to reproduce the experimental data concerning the fire dynamic in the enclosure. Using the master equation of the integral model, that considers the energy and mass balance, we have simulated the air quality indoors. The range of matching of the calculated and experimental results have been analyzed taking into account such factors as analytical form of the time dependence for the specific mass burning rate, role of gas flows through the window openings, effect of the initial date on the position of the equal pressure level. It has been shown that, at appropriate choice of the fitting parameters, the calculated temperature results are in semi-quantitative accordance with the experimental data; however, the agreement in the gas flows outgoes through the window openings are less satisfactory.*

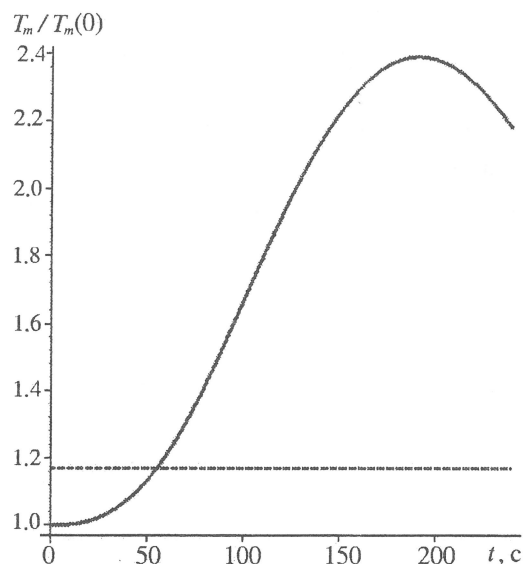
(Поступила в редакцию 30 марта 2008 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа предпринята с целью установления возможности воспроизведения основных экспериментальных результатов динамики пожара [1] расчетами в рамках интегральной модели. Эксперимент [1] относится к пожару в помещении с размерами 5,8 м × 5,8 м × 5,8 м и двумя проемами, в котором сжиганию подвергалась, в частности, древесина в виде сортных брусков и древесных отходов. Отобраны опыты с наибольшей и наименьшей шириной проемов. Используются экспериментальные данные для среднеобъемных значений температуры  $T_m$ , давления  $p_m$ , массовых расходов горячих газов  $G_r$  и свежего воздуха  $G_b$ , отходящих через проемы, а также положение плоскости равного давления (ПРД)  $z_0$ . Выбор этих величин обусловлен необходимостью предварительного исследования адекватности моделирования динамики основных термодинамических параметров газовой среды в помещении при заданной интенсивности горения горючих материалов (ГМ). Для расчетов использована ведущая подсистема уравнений интегральной модели пожара, выражающая баланс энергии и массы:  $(\gamma - 1)^{-1} V \cdot dp_m / dt = E + c_p T_0 G_b - m c_p T_m G_r$  и  $V \cdot dp_m / dt = \psi + G_b - G_r$  ( $V$  – объем помещения,  $\gamma = 1,4$  – показатель адиабаты,  $E$  – часть тепловой мощности, идущая на нагревание газовой среды в помещении,  $T_0 = 293$  К – начальная температура воздуха,  $c_{pв} = c_{pг} = c_p = 1050$  Дж/кг·К – удельная изобарная теплоемкость газовой среды в помещении и наружного воздуха,  $\rho_m$  – среднеобъемная плотность воздуха,  $\psi$  – массовая скорость выгорания). Моделирование скорости выгорания ГМ осуществлялось в виде, отвечающем неограниченному круговому распространению пламени:  $\psi = \pi v_n^2 \psi_{уд} t^2$ , и в виде, учитывающем затухание пожара по мере его развития:  $\psi = \pi v_n^2 \psi_{уд} (\sin^2 \omega t) / \omega^2$  ( $v_n$  – линейная скорость горения,  $\psi_{уд}$  – удельная скорость выгорания,  $\omega = \pi / (2t_{max})$ ,  $t_{max}$  – время от начала пожара до момента его максимального разгорания). Проведено варьирование величины  $m$  от  $m = 1$  (обычная методика [2, 3]) до значения  $m = 1,15$ , при котором происходит потеря устойчивости вычислительного процесса. Положение ПРД определялось по формуле  $z_0 = (p(0) - p_m) / [g(\rho(0) - \rho_m)]$ , где  $p(0)$  и  $\rho(0)$  – давление и плотность воздуха в начальный момент времени соответственно,  $g$  – ускорение свободного падения.

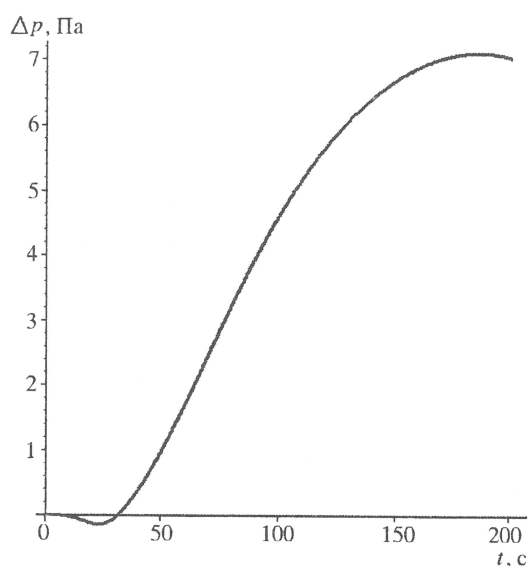
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1 и 2 приведен пример типичных результатов расчетов, выполненных по вышеописанной методике.



**Рисунок 1 – Зависимость относительной среднеемной температуры  $T_m/T_m(0)$  от продолжительности пожара,  $T_m(0) = 293$  К.**

Горизонтальная штриховая линия соответствует предельно допустимой температуре 363 К (70 °С)



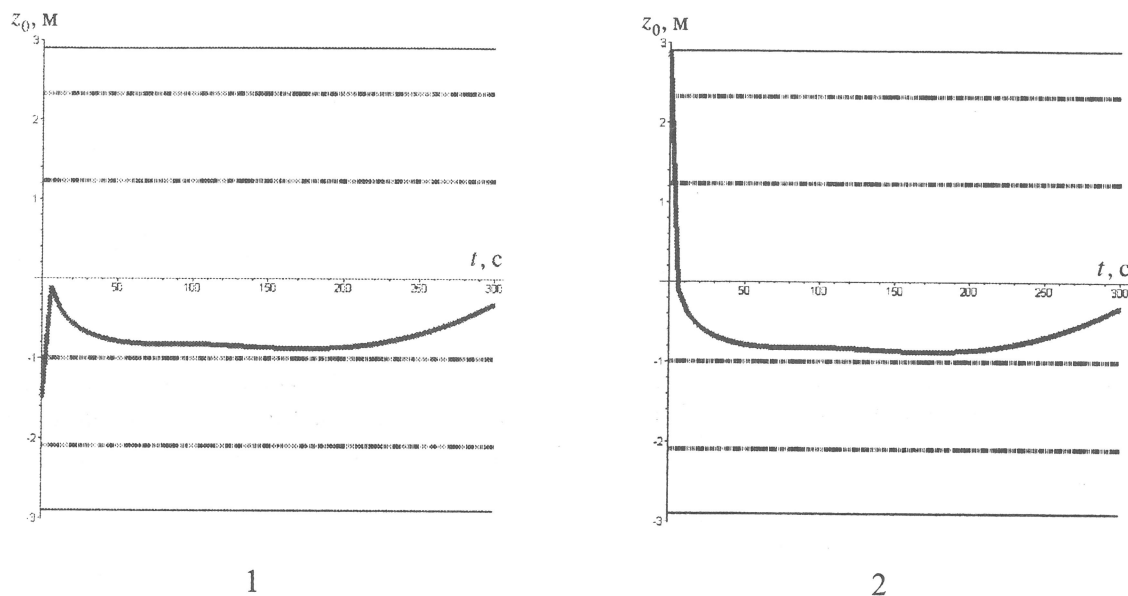
**Рисунок 2 – Зависимость отклонения среднего давления от начального  $\Delta p = [p_m - p_m(0)]$  от продолжительности пожара**

**Степень согласованности результатов расчета и экспериментальных данных.** Проведенные расчеты показывают, что при надлежащем выборе используемых значений параметров, входящих в уравнения интегральной модели пожара, имеет место определенное количественное согласие с экспериментальными данными по динамике температуры и, в меньшей степени, по расходам газовых потоков через проемы. Степень этого согласия является достаточно хорошей при малых проемах, но заметно ухудшается с их увеличением. Это в совокупности свидетельствует о неудовлетворительности существующей в рамках интегральной модели методики учета газообмена через открытые проемы.

Для давления и положения ПРД наблюдается лишь качественное согласование. Недостаточно хорошая прогнозируемость этих величин может объясняться как трудностью их измерения в натурном эксперименте, так и сложностью и неустойчивостью реальных процессов, определяющих эти величины, в том числе на начальной стадии пожара; в свою очередь, эти обстоятельства обуславливают трудности их достоверного теоретического расчета. При этом следует отметить, что расчетная динамика температуры малочувствительна к весьма значительным вариациям в определении положения ПРД.

**Влияние выбора начальных данных на положение ПРД.** Как неоднократно отмечалось в публикациях (см., например, [3]), система дифференциальных уравнений пожара является жесткой (в математическом смысле) [4]. Свойства этой системы ухудшаются также из-за неопределенности вида 0/0 для определения положения ПРД в начальный момент времени; по этой причине счет проводился при начальных условиях  $p_m(0) = p_0 + \delta p$ ,  $\rho_m(0) = \rho_0 + \delta \rho$ , где  $\delta p$  и  $\delta \rho$  – некоторые достаточно малые величины. Поскольку  $p_m(0)$  и  $\rho_m(0)$  подвергаются малым случайным вариациям, начальное положение ПРД может быть любым. Расчеты, однако, показывают, что, независимо от начальных условий за весьма малый промежуток времени, определяемый временным шагом

вычислений, ПРД устойчиво переходит к одному и тому же значению  $z^*$ , которое определяется главным образом конфигурацией имеющихся в помещении проемов (рисунок 3). При этом динамика таких величин, как температура и давление, оказывается вполне нечувствительной к описанным скачкам ПРД и не зависит от ее начального положения  $z_0(0)$ . Во все последующие моменты времени положение ПРД изменяется сравнительно медленно. В условиях рассмотренных опытов [1] ПРД  $z^*$  соответствует примерно середине перемычки между двумя проемами, несколько выше середины высоты помещения. Этот результат в определенной степени согласуется и с используемыми экспериментальными данными. С другой стороны, этот факт противоречит содержащимся в работах [2, 5] утверждениям о том, что в начальный период пожара все проемы работают в одностороннем режиме выброса газов через всю площадь проема.



$$1 - z_0(0) = -1,5 \text{ м}, 2 - z_0(0) = 2,9 \text{ м}$$

Рисунок 3 – Зависимость положения ПРД от продолжительности пожара при различных начальных положениях ПРД  $z_0(0)$

Аналогичные расчеты для помещений с одним проемом показывают, что устойчивое начальное положение ПРД для таких помещений также всегда находится на середине высоты проема.

**Роль температуры отходящих газов.** Повышение величины коэффициента  $m$ , увеличивающее температуру отходящих газов по сравнению со среднеобъемной, приводит к эффективному охлаждению газовой среды в помещении, что сопровождается также заметным снижением темпа нарастания температуры. Отдельно следует подчеркнуть, что в случае постоянного  $m$  и при  $m > 1,15$  вычисления в рамках принятой модели оказались неосуществимыми. Применение формулы вида  $m = 1 + \lambda t / t_{\max}$ , в которой  $\lambda$  выбиралась из условия наибольшего сходства температурной кривой с результатами эксперимента (что достигается при  $\lambda = 1,3$ ), позволило добиться требуемого эффекта уменьшения  $T_m$  на продвинутых стадиях пожара, т. е. при  $t \gg t_{\text{ОФП}}$ , ( $t_{\text{ОФП}}$  – время наступления опасного фактора пожара (ОФП) по температуре) за счет значительного увеличения температуры отходящих газов по сравнению со среднеобъемной температурой. В то же время на начальной стадии пожара снижение температуры оказалось не вполне достаточным для полного согласования с данными эксперимента. Это обстоятельство, по-видимому, обусловлено тем, что при малых  $t$  относительное превышение температуры выбрасываемых газов оказывается все же небольшим и поэтому не оказывает должного влияния на  $T_m$ , тогда как при больших  $t$  это

относительное превышение становится в силу жесткой структуры формулы  $m = 1 + \lambda t / t_{\max}$  чрезмерным.

Таким образом, для лучшего согласования теоретических расчетов с экспериментом представляется необходимым отыскать более реалистическую зависимость коэффициента  $m$  от переменных и параметров модели.

**Роль выбора модели динамики горения ГМ.** Один из очевидных недостатков модели выгорания ГМ связан с представлением о неограниченном круговом распространении пламени, что дает неограниченный рост во времени температуры  $T_m$ , которая достигает чрезмерных для пожара в непромышленном помещении значений  $\sim 3000$  К. При этом использование ряда обобщений интегральной модели пожара (см., например, [1]) не позволяет полностью устранить этот недостаток. Приведенные выше результаты расчета с более умеренным ростом температуры на развитой стадии пожара свидетельствуют, что такой эффект может быть связан не только с превышением температуры отходящих газов над  $T_m$ , но и со снижением интенсивности горения ГМ по мере выгорания кислорода воздуха и уменьшения его притока в связи с захватом основной площади проемов потоком горячих газов, выбрасываемых наружу. Аналогичное влияние на температуру  $T_m$  оказывает снижение выделения энергии от сгорания ГМ за счет снижения коэффициента полноты сгорания  $\eta$  при снижении концентрации кислорода внутри помещения. В целом полученные результаты указывают на необходимость выхода за рамки основной системы и добавления к ним уравнения для концентрации кислорода.

## ВЫВОДЫ

Использование ведущих уравнений интегральной модели пожара для помещения с открытыми проемами при надлежащем выборе параметров позволяет получить полуколичественный прогноз динамики развития пожара, удовлетворительно согласующийся с экспериментальными данными.

Для повышения качества прогноза состояния газовой среды в помещении, где протекает пожар, как представляется, необходима:

- разработка более адекватной модели горения ГМ;
- более глубокая разработка физических моделей образования газовых потоков через проемы.

Отдельный интерес представляет вопрос об определении устойчивого начального положения ПРД, что необходимо при выводе формул для расчета параметров ОФП, в том числе на начальной стадии пожара.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астапенко, В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков; под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
2. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Акад. ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
3. Кошмаров, Ю.А. Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара / Ю.А. Кошмаров, В.В. Рубцов. – М.: МИПБ России, 1999. – 89 с.
4. Хайрер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи / Э. Хайрер, Г. Вампер. – М.: Мир, 1999. – 468 с.
5. Астапенко, В.М. Исследование функции плоскости равных давлений на начальной стадии пожара / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров // Организация, тактика и техника тушения пожаров на объектах народного хозяйства / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1988. – С. 46–53.