

УДК 519.6 + 536.46 + 614.841

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О РАЗВИТИИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

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

*Для воспроизведения экспериментальных данных динамики пожара в помещении проведено его моделирование на основе решения дифференциальных уравнений интегральной модели, выражающих баланс массы и энергии газовой среды в рассматриваемом помещении. Степень согласованности результатов расчета и эксперимента проанализирована с учетом таких факторов, как аналитический вид зависимости массовой скорости выгорания, роль газовых потоков через проемы, влияние начальных данных на положение плоскости равного давления. Показано, что при надлежащем выборе подгоночных параметров расчетные данные по температуре находятся в полуколичественном соответствии с экспериментальными, однако согласие по расходам газовых потоков через проемы менее удовлетворительно.*

(Поступила в редакцию 15 ноября 2007 г.)

Цель настоящей работы состоит в установлении возможности воспроизведения основных результатов исследования динамики пожара, полученных в ходе эксперимента [1], расчетами на основе интегральной модели пожара в помещении.

### 1. Описание используемых экспериментальных данных

Результаты натурного эксперимента [1, с. 15–58] относятся к пожару в помещении с размерами 5,8 м × 5,8 м × 5,8 м, общим объемом 195,11 м<sup>3</sup>. Помещение имело два проема, расположенных друг над другом посередине одной из стен. Высота каждого проема составляла 1,1 м. Нижний срез нижнего проема находился на уровне 0,8 м от пола, верхний срез верхнего проема находился на уровне 5,23 м от пола. Оба проема имели одинаковую ширину, которая варьировалась в ходе опытов от 1,35 м до 0,36 м.

В каждом из опытов горючие материалы (ГМ) укладывались плотным штабелем в несколько слоев в центре помещения. В первой серии опытов (№ 1, 2, 3) сжиганию подвергалась древесина в виде сортных брусков, а также древесных отходов (обрезки досок). Во второй серии опытов (№ 4, 5, 6) применялся полиметилметакрилат (оргстекло). Для сравнения с результатами расчетов в настоящей работе использованы опыты из первой серии, по характеру пожарной нагрузки в большей мере соответствующие пожару в непроизводственном помещении [2]. Внутри этой серии отобраны опыты № 1 и № 3 с наибольшей и наименьшей величиной ширины проемов.

В ходе экспериментов [1] измерялось значительное количество разнообразных величин, характеризующих процессы в помещении, охваченном пожаром. Для сравнения с результатами расчетов в дальнейшем нами будут использоваться лишь вычисленные по экспериментальным данным зависимости среднеобъемных значений температуры и давления от времени, массовые расходы газовых потоков через проемы, а также данные, относящиеся к положению плоскости равных давлений (ПРД) над уровнем пола помещения. Такой выбор обусловлен недостаточной ясностью вопроса об учете влияния состояния газовой среды на интенсивность горения ГМ и вытекающей отсюда необходимости предварительного исследования адекватности моделирования динамики основных ее термодинамических параметров при заданной интенсивности горения ГМ.

Необходимо отметить, что результаты натурных экспериментов опубликованы в [1, с. 56–57] в виде графиков достаточно низкого качества, в связи с чем числовые значения многих величин доступны лишь с небольшой точностью.

## 2. Методика расчетов

При проведении расчетов были приняты следующие значения физических констант, а также величин, определяющих условия проведения эксперимента:

$T_0 = 293 \text{ К}$  – начальная температура воздуха;

$\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$  – начальная плотность воздуха;

$\gamma = 1,4$  – показатель адиабаты;

$R = 8314 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$  – универсальная газовая постоянная;

$\mu = 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$  – усредненная молярная масса воздуха;

$c_{рв} = c_{рг} = c_p = 1050 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$  – удельная изобарная теплоемкость газовой среды в помещении и наружного воздуха; их различием, а также зависимостью от температуры пренебрегаем;

$\eta = 0,97$  – коэффициент полноты сгорания;

$\phi = 0,6$  – коэффициент теплопотерь в ограждающие конструкции;

$\xi = 0,8$  – расходный коэффициент проема.

В численных расчетах, проводившихся авторами [1] для сравнения данных эксперимента, использовалась зависимость скорости выгорания ГМ от времени, которая определялась в этом же эксперименте. В настоящей работе в связи с отсутствием в [1] точных данных об этой величине моделирование скорости выгорания ГМ осуществлялось первоначально в виде, отвечающем неограниченному круговому распространению пламени, а затем также и в виде, учитывающем затухание пожара по мере его развития, при этом время затухания задавалось модельным образом. В первом случае массовая скорость выгорания  $\psi$  определялась по формуле

$$\psi = \pi v_{л}^2 \psi_{уд} t^2,$$

приведенной в [2, 3],

где  $v_{л}$  – линейная скорость горения (распространения фронта пламени), м/с;

$\psi_{уд}$  – удельная скорость выгорания.

Во втором случае использовалось выражение

$$\psi = \pi v_{л}^2 \psi_{уд} \sin^2 \omega t / \omega^2,$$

где  $\omega = \pi / (2t_{\max})$ ,  $t_{\max}$  – время от начала пожара до момента его максимального разгорания (т. е. до начала его затухания).

Для расчетов использовались взятые из экспериментальных данных значения  $t_{\max} = 250 \text{ с}$  для опыта № 1 и  $t_{\max} = 90 \text{ с}$  для опыта № 3.

Использование в опытах плотного штабеля ГМ имело своим следствием достаточно высокую интенсивность выгорания пожарной нагрузки, в связи с чем были приняты следующие значения основных ее характеристик:

$Q_n^p = 1,5 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$  – низшая удельная теплота сгорания ГМ (указана в [1] при описании данных эксперимента);

$v_{л} = 0,0585 \text{ м/с}$  – линейная скорость горения;

$\psi_{уд} = 0,0063 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$  – удельная скорость выгорания в опыте № 1;

$\psi_{уд} = 0,0145 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$  – удельная скорость выгорания в опыте № 3.

Указанные величины удельной скорости выгорания  $\psi_{уд}$  соответствуют штабелю древесины хвойных пород в опыте № 1 и древесины смешанного состава (сосна + лиственные породы дерева) в опыте № 3. Отметим, что, судя по имеющимся графикам в [1], процесс горения значительно отличался от кругового распространения пламени.

В условиях обоих опытов [3] величина критерия проемности  $\Pi$ , вычисленная по суммарной площади и общей высоте проемов без учета перемычки, не превосходит 5. В соот-

ветствии с рекомендациями [3] это означает, что в рамках интегральной модели пожара условия опытов мало отличаются от случая помещения без проемов.

Для расчетов использовалась система уравнений

$$V \frac{d\rho_m}{dt} = \psi + G_B - G_\Gamma, \quad (1)$$

$$(\gamma - 1)^{-1} V \frac{dp_m}{dt} = E + c_p T_0 G_B - m c_p T_0 G_\Gamma, \quad (2)$$

где  $\rho_m, p_m$  – среднеобъемные плотность и давление газа в помещении,

$G_\Gamma$  – массовый расход газов, отходящих через проемы,

$G_B$  – расход свежего воздуха,

$m$  – коэффициент, учитывающий превышение температуры отходящих газов над среднеобъемной,

$E$  – часть тепловой мощности, идущая в результате сгорания ГМ на нагревание газовой среды в помещении. Ее можно считать ведущей подсистемой полной системы уравнений интегральной модели пожара [1–3].

Уравнения (1) и (2) выражают баланс массы и энергии. Согласно предположениям одного из упрощенных вариантов интегральной модели [2] о характере теплоотдачи в ограждающие конструкции, эта величина задается формулой

$$E = (1 - \phi) Q_H^p \eta \psi.$$

Дополнительно предполагалось, что газовая среда в помещении и вне его удовлетворяет уравнению состояния Менделеева–Клапейрона

$$p = \rho RT / \mu. \quad (3)$$

В частности, атмосферное давление на уровне середины высоты помещения, равное  $p_0 = 100751,6$  Па, в ходе расчетов вычислялось по уравнению состояния, исходя из принятых выше значений плотности и температуры. Уравнение состояния (3) предполагалось также выполненным и для среднеобъемных значений температуры, плотности и давления (см. подробнее [1]) и применялось для вычисления величины  $T_m$ , входящей в уравнение (2).

Для вычисления потоков горячих газов и свежего воздуха применялись формулы

$$G_\Gamma = 2/3 \zeta b (2\rho_m (\rho_0 - \rho_m) g)^{1/2} \cdot g_\Gamma,$$

$$G_B = 2/3 \zeta b (2\rho_0 (\rho_0 - \rho_m) g)^{1/2} \cdot g_B,$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$b$  – ширина проемов;

$g_\Gamma = 0,$

$z_0 > z_4;$

$F(z_4),$

$z_4 > z_0 > z_3;$

$F(z_4) - F(z_3),$

$z_3 > z_0 > z_2;$

$F(z_2) + F(z_4) - F(z_3),$

$z_2 > z_0 > z_1;$

$F(z_4) - F(z_3) + F(z_2) - F(z_1),$

$z_1 > z_0;$

$$\begin{aligned}
 g_B &= 0, & z_0 < z_4; \\
 F(z_1), & & z_1 < z_0 < z_2; \\
 F(z_1) - F(z_2), & & z_3 < z_0 < z_2; \\
 F(z_1) + F(z_2) + F(z_3), & & z_2 < z_0 < z_3; \\
 F(z_1) - F(z_2) + F(z_3) - F(z_4), & & z_4 < z_0,
 \end{aligned}$$

где  $F(z) = |z - z_0|^{3/2}$ ,  $z$  – вертикальная координата, отсчитываемая от середины высоты помещения вверх,

$z_0$  – координата положения ПРД, определяемая по формуле  $z_0 = (p_0 - p_m) / (g(\rho_0 - \rho_m))$ ,

$z_1, z_2$  – координаты нижнего и верхнего срезов нижнего проема,

$z_3, z_4$  – координаты нижнего и верхнего срезов верхнего проема.

Как неоднократно отмечалось в публикациях (см., например, [3]), система обыкновенных дифференциальных уравнений (1), (2) плохо пригодна для численного решения, особенно вблизи начального момента времени, поскольку она, во-первых, является жесткой (в математическом смысле) [4], и во-вторых, в ней в начальный момент времени при естественных начальных условиях  $p(0) = p_0$ ,  $\rho(0) = \rho_0$  имеет место неопределенность вида 0/0 для определения положения ПРД. Кроме того, начальное условие  $\rho(0) = \rho_0$  находится на границе области определения правой части уравнения, что дополнительно ухудшает его свойства. В связи с указанными обстоятельствами решение системы уравнений (1), (2) осуществлялось специальными методами, ориентированными на решение жестких систем [4], причем счет проводился при начальных условиях

$$p(0) = p_0 + \delta p, \quad \rho(0) = \rho_0 + \delta \rho, \quad (4)$$

где  $\delta p$  и  $\delta \rho$  – некоторые достаточно малые величины. Влияние этих возмущений на результаты вычислений обсуждается ниже в пункте 3б.

В работе [1] отмечается, что температура газов, отходящих через проем, заметно выше, чем среднеобъемная температура в помещении. Поскольку это обстоятельство должно приводить к замедлению разогрева помещения, расчеты проводились при различных значениях коэффициента  $m$ , варьирувавшихся от  $m = 1$ , соответствующего обычной методике [2, 3], до значения  $m = 1,15$ , при котором происходит потеря устойчивости вычислительного процесса. При значениях  $m$ , больших 1,1, вблизи начального момента времени наблюдается разбалансировка системы, выражающаяся в появлении резких колебаний вычисляемых величин со значительными амплитудами. В частности, имеет место резкое падение, а затем повторный подъем среднеобъемной температуры и потока отходящих газов. Это может свидетельствовать о том, что величина коэффициента  $m$  должна быть переменной величиной, равной 1 в начальный момент времени и возрастающей в ходе развития пожара вместе с прогревом газовой среды и ограждающих конструкций. В связи с этим для расчетов была принята формула

$$m = 1 + \lambda t / t_{\max}, \quad (5)$$

в которой величина  $\lambda$  выбиралась из условия наибольшего схождения температурной кривой с результатами эксперимента, что было достигнуто при  $\lambda = 1,3$ .

### 3. Результаты расчетов и обсуждение результатов

На рисунках 1–8 приведены основные результаты расчетов, выполненных в соответствии с описанной выше методикой.

*3а. Степень согласованности результатов расчета и экспериментальных данных.*

Приведенные выше результаты расчетов показывают, что при надлежащем выборе исполь-

зуемых значений параметров, входящих в уравнения интегральной модели пожара, результаты расчетов демонстрируют 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 (опыт № 3), но заметно ухудшается с их увеличением (опыт № 1). Эти результаты в совокупности свидетельствуют о неудовлетворительности существующей в рамках интегральной модели методики учета газообмена через открытые проемы.

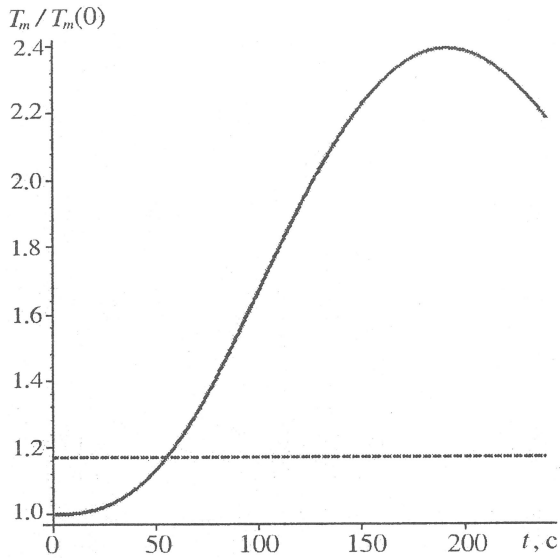


Рисунок 1 – Моделирование опыта № 1. Зависимость относительной среднеемной температуры  $T_m / T_m(0)$  от продолжительности пожара,  $T_m(0) = 293$  К – температура среды перед пожаром. Горизонтальная штриховая линия соответствует предельно допустимой температуре 363 К (70 °С)

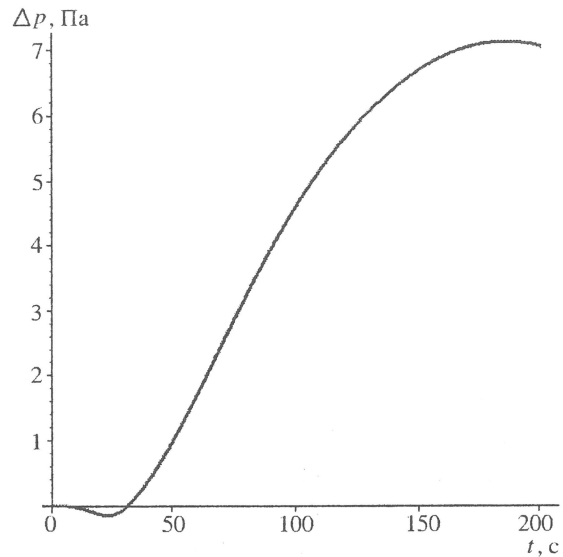


Рисунок 2 – Моделирование опыта № 1. Зависимость отклонения среднеемного давления от начального  $\Delta p = (p_m - p_m(0))$  от продолжительности пожара

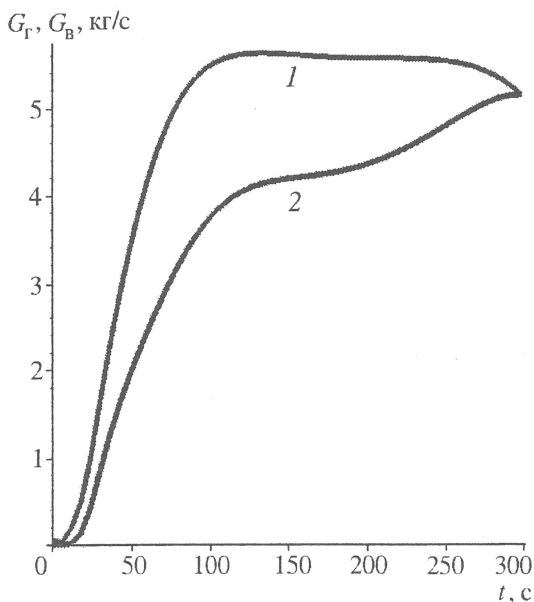


Рисунок 3 – Моделирование опыта № 1. Зависимость газовых потоков горячих газов  $G_g$  (кривая 1) и холодного воздуха  $G_v$  (кривая 2) от продолжительности пожара

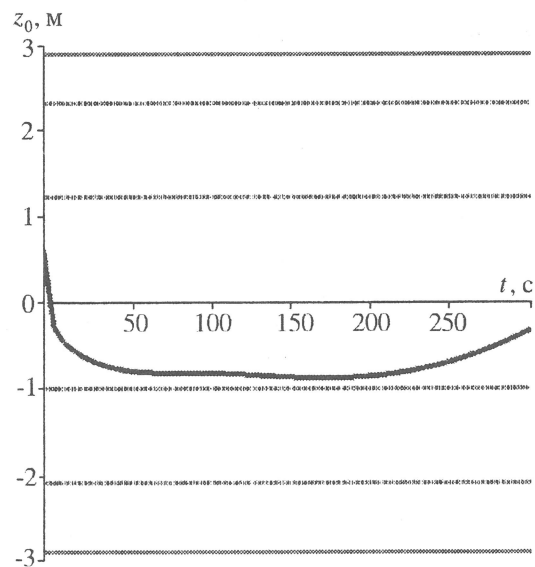


Рисунок 4 – Моделирование опыта № 1. Зависимость положения ПРД  $z_0$  от продолжительности пожара. Нуль отвечает половине высоты помещения, нижняя и верхняя сплошные линии уровня соответствуют полу и потолку, штриховые линии уровня — краям проемов

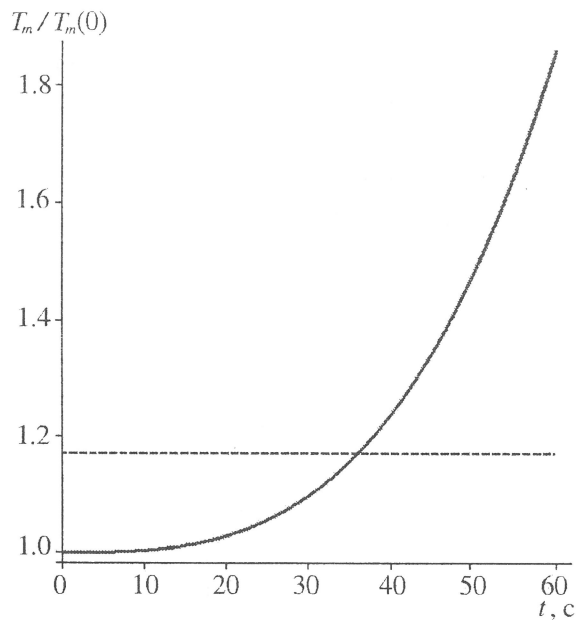


Рисунок 5 – Моделирование опыта № 3. Зависимость относительной среднеобъемной температуры  $T_m / T_m(0)$  от продолжительности пожара,  $T_m(0) = 293$  К – температура среды перед пожаром. Горизонтальная штриховая линия соответствует предельно допустимой температуре 363 К (70 °С)

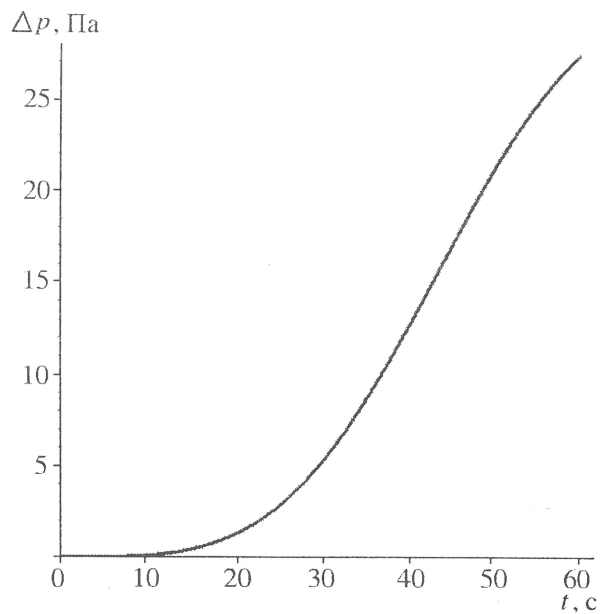


Рисунок 6 – Моделирование опыта № 3. Зависимость отклонения среднеобъемного давления от начального  $\Delta p = (p_m - p_m(0))$  от продолжительности пожара

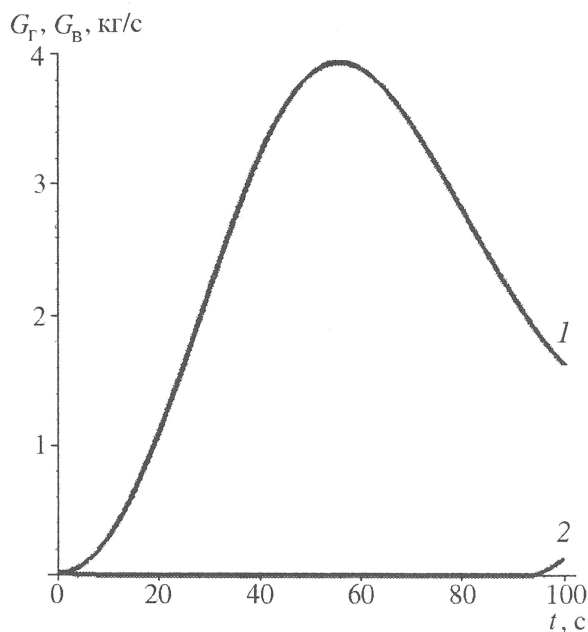


Рисунок 7 – Моделирование опыта № 3. Зависимость газовых потоков горячих газов  $G_G$  (кривая 1) и холодного воздуха  $G_B$  (кривая 2) от продолжительности пожара

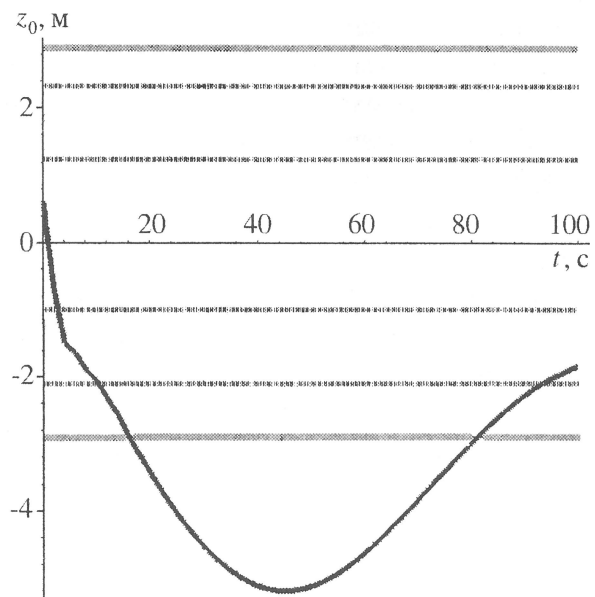


Рисунок 8 – Моделирование опыта № 3. Зависимость положения ПРД  $z_0$  от продолжительности пожара. Нуль отвечает половине высоты помещения, нижняя и верхняя сплошные линии уровня соответствуют полу и потолку, штриховые линии уровня – краям проемов

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 довольно мало чувствительна к весьма значительным вариациям в определении положения ПРД (также ниже).

*3б. Влияние выбора начальных данных на положение ПРД.* В начальный момент времени положение ПРД в соответствии с формулой (4) полностью определяется начальными значениями среднеобъемного давления  $p_m(0)$  и плотности  $\rho_m(0)$

$$z_0 = (p_0 - p_m(0)) / (g(\rho_0 - \rho_m(0))).$$

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 (см. рисунок 9). При этом динамика таких величин, как температура и давление, оказывается вполне нечувствительной к описанным скачкам ПРД и не зависит от ее начального положения  $z_0$ . Во все последующие моменты времени положение ПРД изменяется сравнительно медленно. В условиях рассмотренных опытов расчетное устойчивое значение ПРД  $z^*$  соответствует примерно середине перемишки между проемами, несколько выше середины высоты помещения. Этот результат в определенной степени согласуется и с используемыми экспериментальными данными [1]. 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.

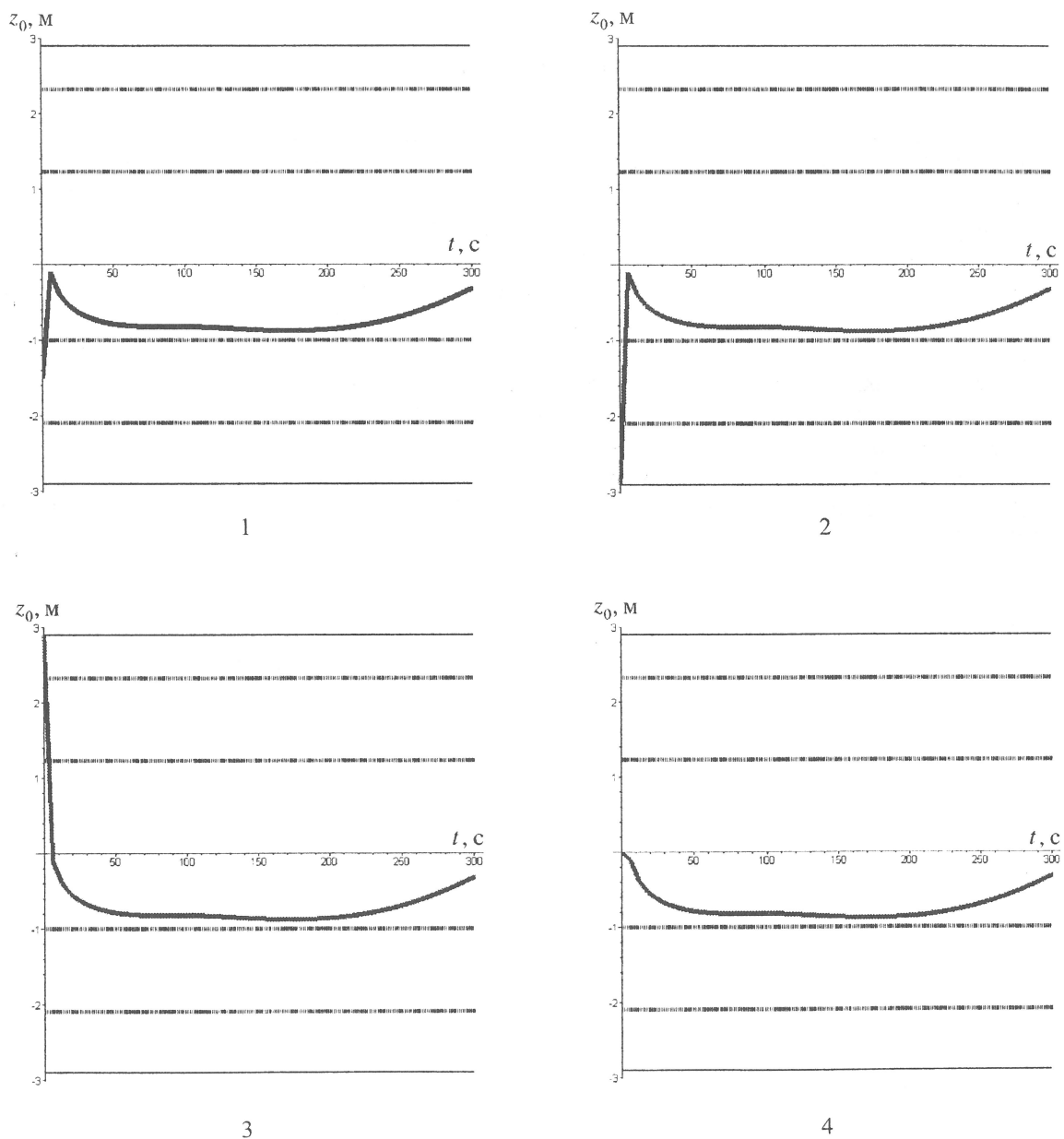
Необходимо отметить, что аналогичные расчеты для помещений с одним проемом показывают, что устойчивое начальное положение ПРД для таких помещений также всегда находится на середине высоты проема.

*3в. Роль температуры отходящих газов.* Повышение величины коэффициента  $m$ , увеличивающее температуру отходящих газов по сравнению со среднеобъемной, приводит к эффективному охлаждению газовой среды в помещении, сопровождающемуся 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 (5) 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 (практически двукратного) 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 среднеобъемную температуру, тогда как при больших  $t$  это относительное превышение становится в силу жесткой структуры формулы (5) чрезмерным.

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

*3г. 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 непроизводственном помещении значений  $\sim 3000$  К. При этом ис-

пользование ряда обобщений интегральной модели пожара (предположенных, например, в [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, вообще говоря, на необходимость выхода за рамки основной системы уравнений (1), (2) и добавления к ним уравнения для концентрации кислорода (см., например, [1, 2]).



$$1 - z_0 = -1,5 \text{ м}; \quad 2 - z_0 = -2,9 \text{ м}; \quad 3 - z_0 = 2,9 \text{ м}; \quad 4 - z_0 = 0$$

Рисунок 9 – Моделирование опыта № 1. Зависимость положения ПРД от продолжительности пожара при различных начальных положениях ПРД  $z_0$



#### 4. Выводы

Использование ведущих уравнений (1) и (2) интегральной модели пожара для помещения с открытыми проемами при надлежащем выборе параметров позволяет получить приемлемый полуколичественный прогноз динамики развития пожара, удовлетворительно согласующийся с экспериментальными данными.

Для повышения качества прогноза изменения 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.