

УДК 534.222.2

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАНА В ОБЛАСТЯХ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

М. Козубкова<sup>1</sup>, Я. Крутиль<sup>2</sup>, В. Неврлий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Оставский технический университет, CZ-708 33 Острава, Чешская Республика  
miladak.ozubkova@vsb.cz

<sup>2</sup>Технологический университет Брно, CZ-616 69 Брно, Чешская Республика, krutil@fme.vutbr.cz

Проведено моделирование турбулентного горения метана в областях со сложной геометрией. Подобраны параметры для одностадийной и двухстадийной моделей химической кинетики. Параметры химической кинетики существенно влияют на корректность математической модели горения, используемой для расчета характеристик взрыва метановоздушной смеси в жилом доме. Проведено сравнение с результатами экспериментальных измерений.

Ключевые слова: модель взрыва метана, волна давления, химические реакции, кинетика.

В работе исследуется распространение волны горения метановоздушной смеси в пространстве со сложной геометрией.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

### Математическая модель переноса массы, импульса и тепла для сжимаемой жидкости

Рассматривается режим турбулентного течения. Для решения трехмерной задачи применялся метод конечных элементов, реализованный в пакете ANSYS Fluent. Уравнения сохранения импульса и энергии в трехмерном нестационарном случае имеют вид [1]:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

уравнение Навье — Стокса

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(\bar{p})}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \rho \delta_{iz} g + \rho f_C \varepsilon_{ijz} \bar{u}_j + \bar{u}_j f_i, \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\rho \bar{E}] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \bar{u}_j \bar{E}] = \\ = \rho \bar{u}_j f_j - \frac{\partial(p \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\tau_{jl} \bar{u}_j)}{\partial x_l} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} + S^h. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $E$  — энергия,  $S^h$  — объемный источник тепла,  $T$  — абсолютная температура,  $g$  — ускорение свободного падения,  $p$  — давление,  $u$  — скорость волны,  $u_i, u_j$  — компоненты скорости,  $x_i, x_j$  — компоненты координаты,  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера,  $\varepsilon$  — скорость диссипации,  $\mu_t$  — турбулентная вязкость,  $\rho$  — плотность,  $\tau$  — тензор напряжений,  $f_C$  — параметр Корриолиса,  $c^{-1}$ ,  $f_i, f_j$  — сила, Н; индексом  $i$  обозначены компоненты вектора,  $j, k, l$  — индексы суммирования, чертой сверху обозначены осредненные по времени величины. Считая поток одномерным и нестационарным, вышеприведенные уравнения можно проинтегрировать и привести к виду уравнения Гюгонио. Кроме того, для идеального газа применимы другие известные выражения:

$$p_1 = \rho_1 R T_1, \quad p_2 = \rho_2 R T_2, \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R. \quad (5)$$

Здесь  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $c_p, c_v$  — удельная теплоемкость при постоянных давлении и объеме,  $R$  — универсальная газовая постоянная, индекс 1 соответствует начальному

© М. Козубкова<sup>1</sup>, Я. Крутиль<sup>2</sup>, В. Неврлий<sup>3</sup>, 2014.

<sup>1</sup>VŠB — Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, CZ-708 33 Ostrava — Poruba, Czech Republic. <sup>2</sup>Brno University of Technology, Institute of Power Engineering, CZ-616 69, Brno, Czech Republic.

<sup>3</sup>VŠB — Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, CZ-700 30 Ostrava 3 — Vyskovice, Czech Republic.

состоянию потока, индекс 2 — состоянию за волной горения. Окончательно получаем следующее уравнение Гюгонио:

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) - \frac{1}{2} (p_2 - p_1) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = q. \quad (6)$$

Оно используется для построения кривой Гюгонио, отображающей зависимость  $p_2$  от  $1/\rho_2$  при фиксированном тепловыделении на единицу массы  $q$ .

Отношение Гюгонио также можно выразить в терминах полной энтальпии  $h$ :

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (p_2 - p_1) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right). \quad (7)$$

Кривая Гюгонио указывает области дефлаграции и детонации в одномерном пространстве. Поскольку рассматриваемая задача является трехмерной и давление распространяется во всех направлениях, кривая Гюгонио представляет информацию только о срыве взрыва. Из экспериментов и расчетов получено, что наш случай соответствует режиму дефлаграции.

### Модель переноса компонентов с учетом химических реакций

Пусть  $\bar{Y}_{i'}$  — локальные массовые концентрации компонентов, описываемые уравнением баланса, которое аналогично уравнению энергии и в консервативной форме имеет вид [2–4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\rho \bar{Y}_{i'}] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \bar{u}_j \bar{Y}_{i'}] = \\ = - \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{J}_{i',j} + R_{i'} + S_{i'}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\bar{J}_{j,i'}$  — диффузионный поток компонента  $i'$ ,  $R_{i'}$  — скорость производства компонента  $i'$  в реакции,  $S_{i'}$  — скорость производства тепла при добавлении  $i'$ -го компонента из дисперсной фазы.

Уравнение (8) справедливо для  $N - 1$  компонентов, где  $N$  — общее число компонентов в системе. Распределение компонентов можно выполнить на основе различных предположений (для ламинарного, переходного и турбулентного течений) [2–4].

В турбулентном потоке массовая диффузия компонента  $i'$  записывается в виде

$$\begin{aligned} \bar{J}_{i',j} = - \left( \rho D_{i',m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{Y}_{i'} - \\ - D_{T,i'} \left( \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{T} \right) / \bar{T}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $D_{i',m}$  — коэффициент диффузии  $i'$ -й химической составляющей смеси,  $D_{T,i'}$  — температурный коэффициент диффузии (коэффициент Сорэ),  $Sc_t$  — турбулентное число Шмидта ( $Sc_t = \mu_t / \rho D_t$ , по умолчанию  $Sc_t = 0.7$ ) [3, 4].

Скорость генерации компонента  $i'$  в результате химических реакций рассчитывается как сумма источников реакций для этого компонента:

$$R_{i'} = M_{i'} \sum_{k=1}^{N_R} R_{i',k}, \quad (10)$$

где  $M$  — молекулярная масса,  $N_R$  — число источников членов реакции,  $R_{i',k}$  выражается на основе кинетической теории газов.

### Стехиометрия и химическая кинетика окисления метана

Набор констант для одной необратимой реакции окисления метана определен в работах [5] (где предэкспоненциальный множитель заимствован из [6]) и [7]. Эти модели являются одностадийными. Механизмы двухстадийного окисления выбраны и сконструированы на основе исследований [8] (константы скорости реакции взяты из [9]) и [10]. Кинетические параметры (предэкспоненциальный множитель  $A$  и энергия активации  $E_a$ ) даны в системе единиц СГС (см, г, с). При переводе этих параметров в систему СИ нужно быть очень осторожными, чтобы получить верный порядок реакции [11, 12].

Стехиометрические и соответствующие кинетические константы глобальных механизмов приведены в таблице. Эти константы добавлены в уравнение Аррениуса:

$$k = AT^\beta \exp(-E_a/RT). \quad (11)$$

Влияние параметров одно- и двухстадийной кинетических моделей протестировано на примере стационарного ламинарного противоточного (встречного) пламени неперемешанной

Одно- и двухстадийные модели окисления метана

Модель	Реакция и стехиометрия	$A$	$\beta$	$E_a$	Порядок реакции
[7]	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$1.35 \cdot 10^{20}$	0	$3.00 \cdot 10^4$	$[\text{CH}_4][\text{O}_2]^2$
[5]	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$3.00 \cdot 10^{22}$	0	$4.50 \cdot 10^4$	$[\text{CH}_4][\text{O}_2]^2$
[8]	$\text{CH}_4 + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1.59 \cdot 10^{13}$	0	$4.78 \cdot 10^4$	$[\text{CH}_4]^{0.7}[\text{O}_2]^{0.8}$
	$\text{CO} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$3.98 \cdot 10^{12}$		$4.07 \cdot 10^4$	$[\text{CO}][\text{O}_2]^{0.25}[\text{H}_2\text{O}]^{0.5}$
	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1.5\text{O}_2$	$5.00 \cdot 10^8$		$4.07 \cdot 10^4$	$[\text{CO}_2]$
[10]	$\text{CH}_4 + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	$2.00 \cdot 10^{15}$	0	$3.50 \cdot 10^4$	$[\text{CH}_4]^{0.9}[\text{O}_2]^{1.1}$
	$\text{CO} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$2.00 \cdot 10^9$		$1.20 \cdot 10^4$	$[\text{CO}][\text{O}_2]^{0.5}$
	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1.5\text{O}_2$	$8.11 \cdot 10^{10}$		$7.72 \cdot 10^4$	$[\text{CO}_2]$

Примечание. Размерность констант скорости реакции — см, с, кал, моль.

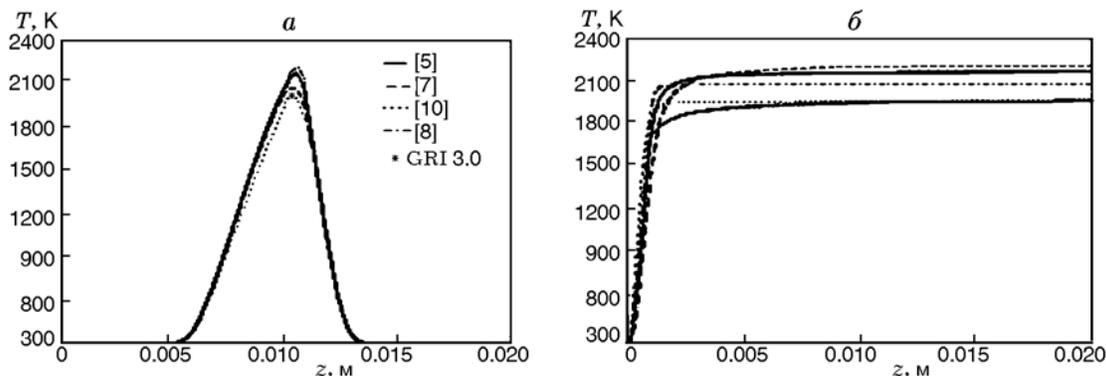


Рис. 1. Расчетные профили температуры в противоточном пламени неперемешанной смеси  $\text{CH}_4/\text{воздух}$  (а) и в плоском пламени предварительно перемешанной смеси  $\text{CH}_4/\text{воздух}$  (б) [11]

смеси и стационарного плоского пламени предварительно перемешанной смеси [11]. Кроме того, для каждой химической модели кинетики и выбранных условий оценена скорость ламинарного пламени (скорость горения) предварительно перемешанной смеси. Основные уравнения сохранения массы, энергии, компонентов и импульса решались в цилиндрических (относительно оси  $Z$ ) координатах с использованием программы Cantera 1.7 [13, 14], а в трехмерном пространстве или в плоской системе координат (оси  $X$  и  $Y$ ) — с использованием модели вычислительной газодинамики (ANSYS Fluent). Моделирование механизма окисления метана (GRI-Mech 3.0 [15]) выполнено с использованием Cantera. Этот химико-кинетический механизм был тщательно верифицирован на основе экспериментальных данных. Профили температуры в пламенах неперемешанной и предварительно перемешанной смесей, рассчитанные по глобальным химическим моделям (с ис-

пользованием программы Cantera), показаны на рис. 1 [11].

Результаты численных расчетов по различным моделям (одно- и двухстадийным) с использованием программ Cantera и Fluent мало отличаются. Большое различие наблюдалось лишь в расчетах полного времени и числа итераций. Поэтому для численного моделирования взрыва выбрана простая одностадийная модель.

## ВЗРЫВ В ЖИЛОМ ДОМЕ

### Эксперимент

Эксперимент проводился в старом заброшенном жилом доме в Каменне, около города Милин [16]. Дом одноэтажный, отдельно стоящий, размером  $1290 \times 800$  см. Взрыв и последующий пожар конструировались на основе реального взрыва в жилом доме в Рымарове. Раз-

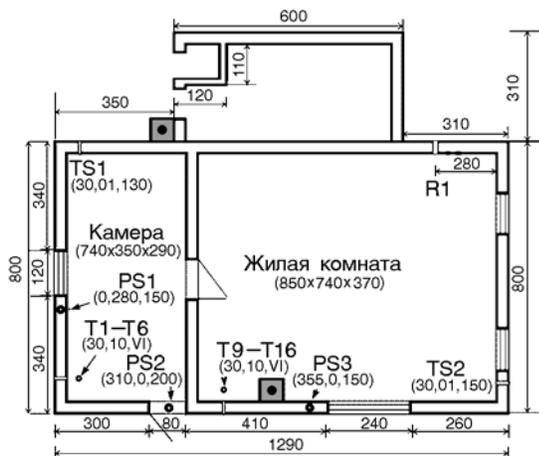


Рис. 2. План здания и схема датчиков [16]:  
 T — термодары, R — радиометр, PS — датчики давления, TS — датчик измерения продуктов горения, размеры указаны в сантиметрах

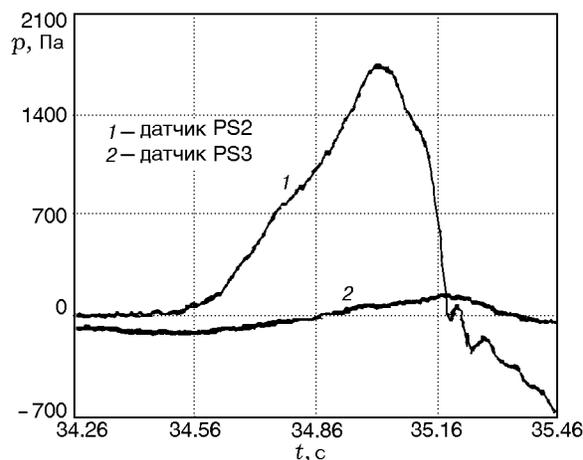


Рис. 3. Запись сигналов датчиков давления [16]

меры дома и информация о расположении датчиков представлены на рис. 2.

Причиной взрыва была утечка природного газа (4.03 кг метана) из двух газовых баллонов, расположенных вне области пожара в камере (комнате размером 740 × 350 × 290 см). Общая концентрация метана в камере составляла 8 % от объема. Камера была полностью изолирована (окно застеклено, двери закрыты).

Система измерения регистрировала поле давления (датчик давления Kistler 701), поле температуры (термопара К-типа — TJ72-CAIN-316U-24-CC-XCIB), показания тепловизоров (FLIR thermalCAM S65), плотность потока тепла (GTW 5-32-485A), концентрации некоторых реагентов и продуктов (O<sub>2</sub>, CO, NO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), скорость воздуха (трубка Пито). Помимо этого, измеряли температуру окружающей среды и скорость ветра [16].

Инициатором воспламенения взрывоопасной смеси служил дистанционно управляемый электрический переключатель. Под действием результирующей волны давления были разбиты окна в камере и жилой комнате, разрушены все двери в здании, поднята и повреждена крыша камеры [16].

Результаты эксперимента использовались для верификации математической модели применительно к проблеме взрывного горения метана. Изменение давления было существенным только в камере (датчик PS2), давление в жилой комнате не представляет интереса (рис. 3). Это позволило упростить объект моделирова-

ния и моделировать давление и температуру только внутри камеры.

### Модели, описывающие скорость производства компонентов

На основании данных эксперимента установлено, что течение было турбулентным. Скорость реакции, являющаяся источником членом в уравнении переноса компонентов, рассчитывалась для ламинарного течения с использованием отношения Аррениуса, а для турбулентного потока — по модели диссипации вихрей [3, 4, 17].

Для описания скорости производства компонента  $i'$  в химических реакциях использовались следующие модели из комплекса ANSYS Fluent [3, 4]:

— модель, в которой влияние флуктуаций турбулентного потока не учитывается, а скорости реакций определяются по кинетическому уравнению Аррениуса:

$$R_{i'k} = \Gamma(v'_{i',k} - v''_{i',k}) \left( k_{f,k} \prod_{j'=1}^N [C_{j'}]^{\eta'_{j',k}} - k_{b,k} \prod_{j'=1}^N [C_{j'}]^{\eta''_{j',k}} \right); \quad (12)$$

— модель диссипации вихрей, в которой скорости реакций полагаются зависящими от турбулентности, что позволяет избежать

дорогостоящих расчетов химической кинетики Аррениуса, но для получения реалистичных результатов следует использовать только одно- или двухстадийный механизм тепловыделения:

$$R_{i'k} - M_{i'} \sum_{k=1}^{N_R} \min \left\{ v'_{i',k} A \rho \frac{\varepsilon}{E_t} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,k} M_{i'} R} \right), v'_{i',k} A B \rho \frac{\varepsilon}{E_t} \sum_P Y_P / \sum_{j'}^N v''_{j',k} M_{j'} \right\}; \quad (13)$$

— модель скорости реакции/диссипации вихрей — комбинация двух предыдущих моделей;

— модель диссипации вихрей, включающая очень детальную кинетику горения:

$$R_{i'} = (Y_{i'}^* - Y_{i'}) \left\{ \rho C_\xi^2 \left( \frac{\nu \varepsilon}{E_t^2} \right)^2 / \left( C_r \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}} \left[ 1 - C_\xi^3 \left( \frac{\nu \varepsilon}{E_t^2} \right)^{2.25} \right] \right) \right\}, \quad (14)$$

если химические реакции слишком быстрые, в модели применяется вспомогательный механизм STIFF, в который входят постоянная энергия активации и предэкспоненциальный множитель.

Здесь  $C_{j'}$  — молярная концентрация  $j'$ -го компонента,  $C_\xi$  — постоянная объемной концентрации,  $C_r$  — постоянная масштаба времени,  $E_t$  — турбулентная кинетическая энергия,  $Y_P$  — массовая концентрация продукта реакции,  $Y_R$  — массовая концентрация компонента реакции,  $Y_{i'}^*$  — массовая концентрация компонента  $i'$  для мелкомасштабной сетки,  $\eta'_{j',k}$  — экспонента скорости для реагирующего компонента  $j'$  в реакции  $k$ ,  $\eta''_{j',k}$  — экспонента скорости для компонента  $j'$  продукта реакции  $k$ ,  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $v'_{i',k}$  — стехиометрический коэффициент для реагирующего компонента  $i'$  в реакции  $k$ ,  $v''_{i',k}$  — стехиометрический коэффициент для продукта  $i'$  в реакции  $k$ .

## ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Геометрия жилого дома и сетка созданы в среде Workbench 13.0 (рис. 4). Сетка для модели сгенерирована исключительно из прямоугольных ячеек. Геометрия математической модели упрощена. Наличие мебели в доме не учитывалось. В модели созданы специальные области вдоль окон, дверей и крыши для моделирования их разрушения, эти области задавали как пористые зоны с переменной проницаемостью (путем введения коэффициентов, соответствующих пористым зонам, см. [3, 18, 19]).

Значения коэффициента пористости в расчетах по времени соответствуют степени разрушения стен и окон в зависимости от достигнутого давления.

Для трех выходных сечений (окно, входная дверь, дверь в жилую комнату) задаются граничные условия по давлению. На остальных твердых стенках заданы граничные условия «Стенка». Температура  $T = 283$  К определена из информации о погодных условиях и задана на всех выходных сечениях и внутри жилого дома. Рабочей средой является метановоздушная смесь — 72.68 %  $N_2$ , 19.32 %  $O_2$  и 8 %  $CH_4$ . Для привязки смеси газов к нужной области использовалась инициализирующая функция. Данная задача решалась в нестационарной постановке. Полное время моделирования соответствует полному времени эксперимента (60 с). Шаг по времени в расчетах составлял 0.001 с.

Были рассчитаны поля давления, температуры и скорости распространения пламени за период моделирования. Для иллюстрации на рис. 5 и 6 показаны поля давления и температу-

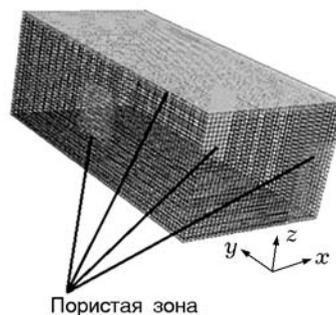


Рис. 4. Геометрия и сетка для математической модели

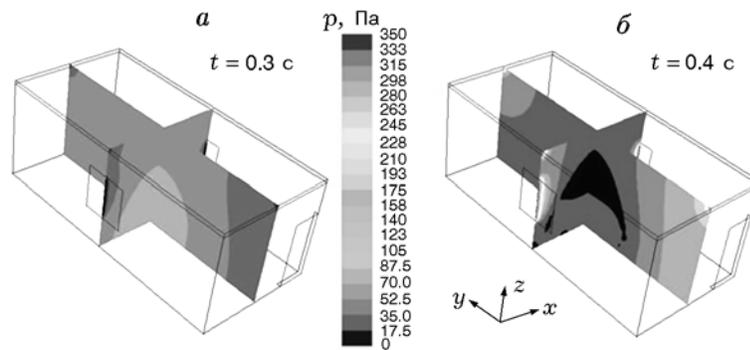


Рис. 5. Поле давления в моменты времени 0.3 и 0.4 с

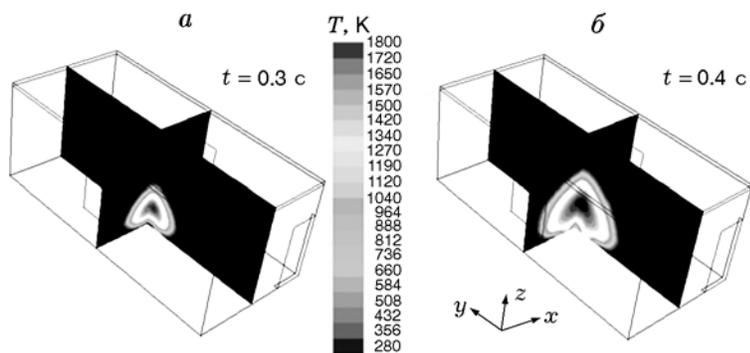


Рис. 6. Поле температуры в моменты времени 0.3 и 0.4 с

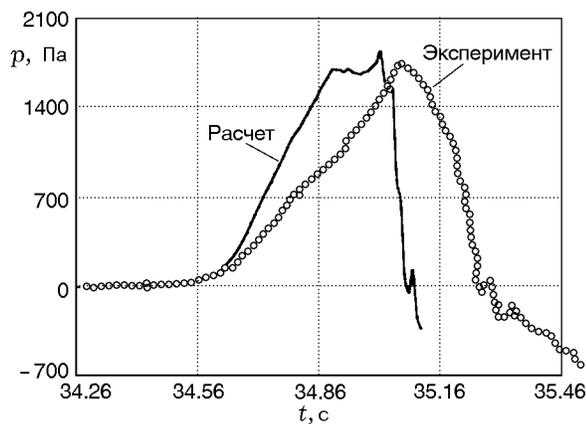


Рис. 7. Изменение избыточного давления по показаниям датчика PS2

представлены на рис. 7. Видно очень хорошее согласование по абсолютным значениям времени и избыточного давления. В эксперименте пик давления 1 800 Па достигается в момент времени 35.05 с, а в численной модели — это пик 1 834 Па в момент времени 34.95 с. Рост избыточного давления очень хорошо отслеживается данной моделью. Быстрый спад избыточного давления в конце волны, обусловленный разрушением комнаты, также предсказан очень хорошо.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ры в сечениях, расположенных поперек моделируемой области, в моменты времени 0.3 и 0.4 с. В этом временном интервале наблюдаются существенные градиенты указанных величин.

Расположение датчиков давления в численной модели идентично экспериментальному [16]. Для сравнения давлений выбраны показания датчика PS2. Результаты численного моделирования давления и данные эксперимента

Вопрос генерации взрывных волн давления трудноразрешим. Он требует детальных знаний о физике течения, термофизических свойствах и параметрах вещества. Однако основным в решении подобных задач является правильное определение констант химических реакций, таких как энергия активации и предэкспоненциальный множитель. Эти константы оказывают существенное влияние на скорость химических реакций между газовым топливом и окислителем. Определяют их в основном для моделей горения, работающих в ламинарном

режиме течения, но включают также в модели горения турбулентных потоков.

Работа поддержана Министерством образования, юношества и спорта Чешской Республики (проекты LD11012 и LD12020 в рамках деятельности COST CM0901), а также Технологическим университетом Брно (проект CZ.1.07/2.3.00/30.0005).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot N. N.** Transport Phenomena. — 2002.
2. **Kozubkova M.** Numerical modeling of flow FLUENT I. — VSB-TU Ostrava, 2003.
3. **Ansys Inc., ANSYS FLUENT 13.0** — Theory Guide. — 2011.
4. **Ansys Inc., ANSYS FLUENT 13.0** — User's Guide. — 2011.
5. **Puri I. K., Seshadri K.** Extinction of diffusion flames burning diluted methane and diluted propane in diluted air // Combust. Flame. — 1986. — V. 65, N 2. — P. 137–150.
6. **Renner J. E.** Numerical and experimental studies of the dynamics of diffusion flame sheets: Ph. D. thesis. — Northwestern Univ., 2008.
7. **Zambon A. C., Chelliah H. K.** Self-sustained acoustic-wave interactions with counterflow flames // J. Fluid Mech. — 2006. — V. 560. — P. 249–278.
8. **Westbrook C. K., Dryer F. L.** Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames // Combust. Sci. Technol. — 1981. — V. 21. — P. 31–43.
9. **Dryer F. L., Glassman I.** High-temperature oxidation of CO and CH<sub>4</sub> // Proc. Combust. Inst. — 1973. — V. 14. — P. 987–1003.
10. **Bibrzycki J., Poinso T.** Reduced chemical kinetic mechanisms for methane combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere. — Silesian Univ. of Technology, 2010.
11. **Kozubkova M., Kozubek E., Nevrlý V., Bitala P., Stepanek O., Dlabka J., Vasinek M., Vojko M., Zelinger Z., Kubat P., Grigorova E.** The effect of nitrogen and argon dilution on methane oxidation in laminar flames // Procedia Eng. — 2012. — V. 42. — P. 1826–1839.
12. **Старик А. М., Титова Н. С.** Кинетика образования ионов при объемной реакции метана с воздухом // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 3. — С. 3–19.
13. **Goodwin D. G.** Cantera User's Guide. — Division of Engineering and Applied Science California Institute of Technology, Pasadena, 2001.
14. **Goodwin D. G.** An open-source, extensible software suite for CVD process simulation // Proc. of CVD XVI and EuroCVD Fourteen. — 2003. — P. 155–162.
15. **Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., Moriarty N. W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C. T., Hanson R. K., Song S. H., Gardiner W. C., Jr, Lissianski V. V., Qin Z. W.** GRI-MECH 3.0. — [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
16. **Dvorak O., Dudacek A.** Report on results of fire test in a house in Kamenná dated 8. 10. 2010. — Praha, Ostrava, 2010.
17. **Carnogurska M., Prihoda M., Kosko M., Pyszko R.** Verification of pollutant creation model at dendromass combustion // J. Mech. Sci. Technol. — 2012. — V. 26, N 12. — P. 4161–4169.
18. **Kozubkova M., Krutil J., Dvorak O., Vojko M.** Mathematical modelling explosion methan in family house in Kamenna using Fluent software // The Sci. for population protection. — 2012. — V. 4, N 2. — P. 65–89.
19. **Браверман Б. Ш., Зиятдинов М. Х., Максимов Ю. М.** О горении пористых образцов в условиях неоднородной фильтрации // Физика горения и взрыва. — Т. 38, № 4. — С. 49–52.

*Поступила в редакцию 5/VI 2013 г.,  
в окончательном варианте — 9/IX 2013 г.*