

¹ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

²Институт тепло- и массообмена
имени А.В. Лыкова НАН Беларуси



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ И ФОКУСИРОВКЕ УДАРНЫХ ВОЛН

Стамов Л.И.¹, Смирнов Н.Н.¹, Никитин В.Ф.¹, Пенязьков О.Г.², Севрук К.Л.²

XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву

Москва, 29 ноября — 4 декабря 2020 г.

Математическая модель

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_k \mathbf{u} - D_{eff} \nabla \frac{\rho_k}{\rho} \right) = \dot{\omega}_k \quad \rho = \sum_k \rho_k$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} - \boldsymbol{\tau}) + \nabla p = 0$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u} + p \mathbf{u} - \lambda_{eff} \nabla h - \mu_{eff} \nabla K - \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}) = 0$$

$$\boldsymbol{\tau} = -\frac{2}{3} \rho K \mathbf{I} + \mu_{eff} \left(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right)$$

$$D_{eff} = \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_T}{Sc_T} \quad p = R_G T \sum_k \frac{\rho_k}{W_k}$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T \quad e = R_G T \sum_k \frac{\rho_k}{\rho W_k} (\hat{H}_k - 1)$$

$$\lambda_{eff} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \quad E = e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} + K$$

$K - \omega$ модель турбулентности Уилкокса

$$\dot{\omega}_k = W_k \hat{\omega}_k \quad \hat{\omega}_k = \sum_r \nu_{rk} \omega_r \quad k_r^D = A_r T^{B_r} \exp \left[\frac{-\Theta_r}{T} \right] \quad K_r = \exp \left(-\sum_k \nu_{rk} (\hat{g}_k - 1) \right) \left(\frac{p_b}{R_G T} \right)^{\sum_k \nu_{rk}}$$

$$\omega_r = M_r \left[k_r^D \prod_k X_k^{\alpha_{r,k}} - k_r^R \prod_k X_k^{\beta_{r,k}} \right] \quad k_r^R = k_r^D K_r^{-1}$$

Модернизированная кинетика Мааса-Варнаца

ρ_k плотность k -го компонента

ρ плотность смеси

$\dot{\omega}_k$ интенсивность образования k -го компонента

\mathbf{u} вектор скорости

E полная энергия единицы массы смеси

K турбулентная энергия единицы массы смеси

p давление смеси

h энтальпия единицы массы смеси

$\boldsymbol{\tau}$ тензор напряжений

λ_{eff} μ_{eff} D_{eff} коэффициенты переноса

e внутренняя энергия единицы массы смеси

R_G универсальная газовая постоянная

T температура смеси

W_k молярная масса k -го компонента

μ молекулярная вязкость смеси

μ_T турбулентная вязкость смеси

Pr число Прандтля

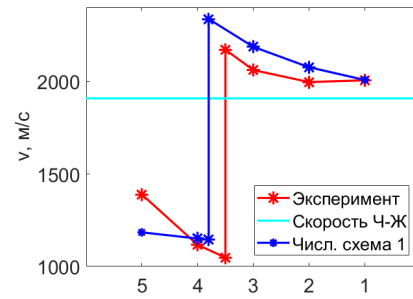
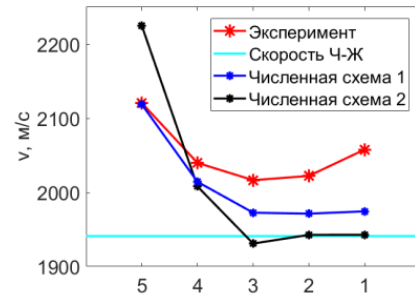
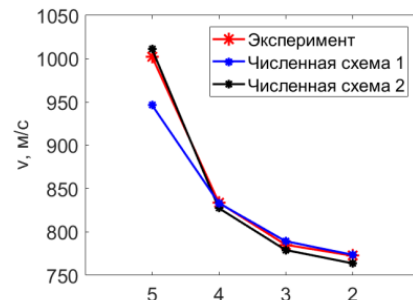
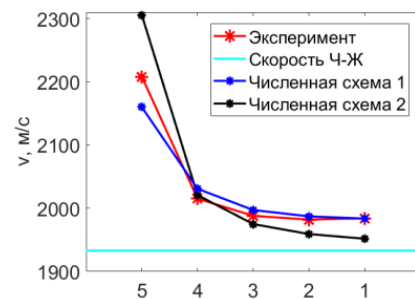
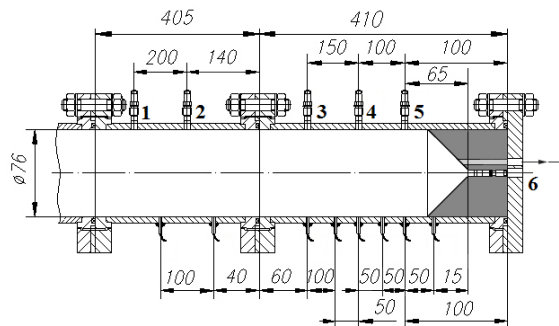
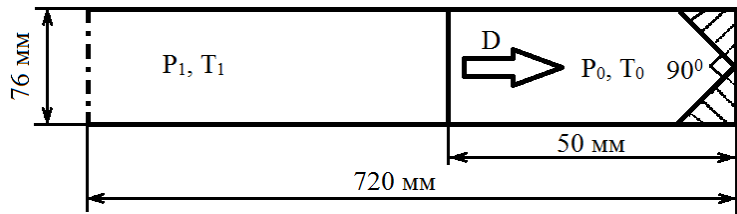
Sc число Шмидта

Pr_T турбулентное число Прандтля

Sc_T турбулентное число Шмидта

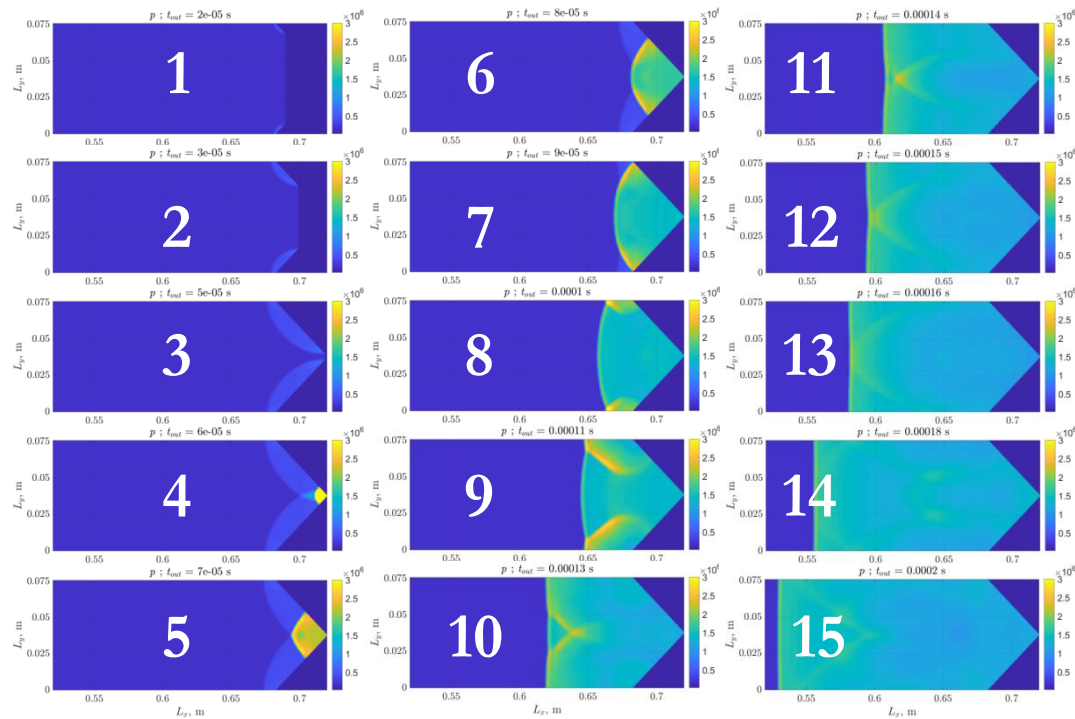
\hat{H}_k безразмерная энтальпия k -го компонента

Постановка задачи и результаты моделирования



Датчики

Датчики



№	1	2	3	4
Вставка	W02R	W19Q	C19R	W08P
T_0 , К	294	293	294	295
P_0 , бар	0.28	0.37	0.35	0.12
T , К	593	421	491	559
P , бар	1.85	1.13	1.55	0.66
v_x , м/с	672	362	501	617
D , м/с	969	675	803	915
V_{CH} , м/с	1933	1942	1941	1908
P_{CH} , бар	14.47	12.36	14.59	5.35
T_{CH} , К	2978	2913	2948	2879

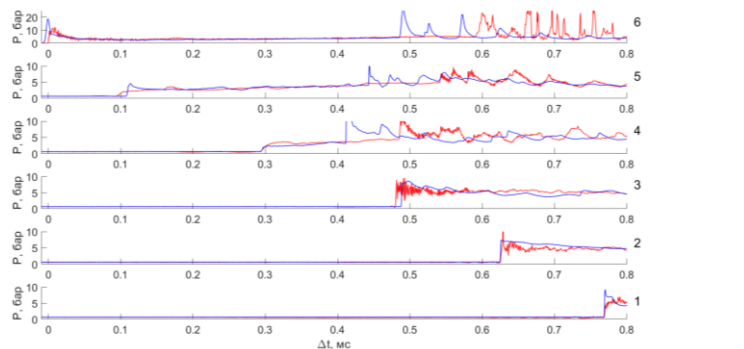
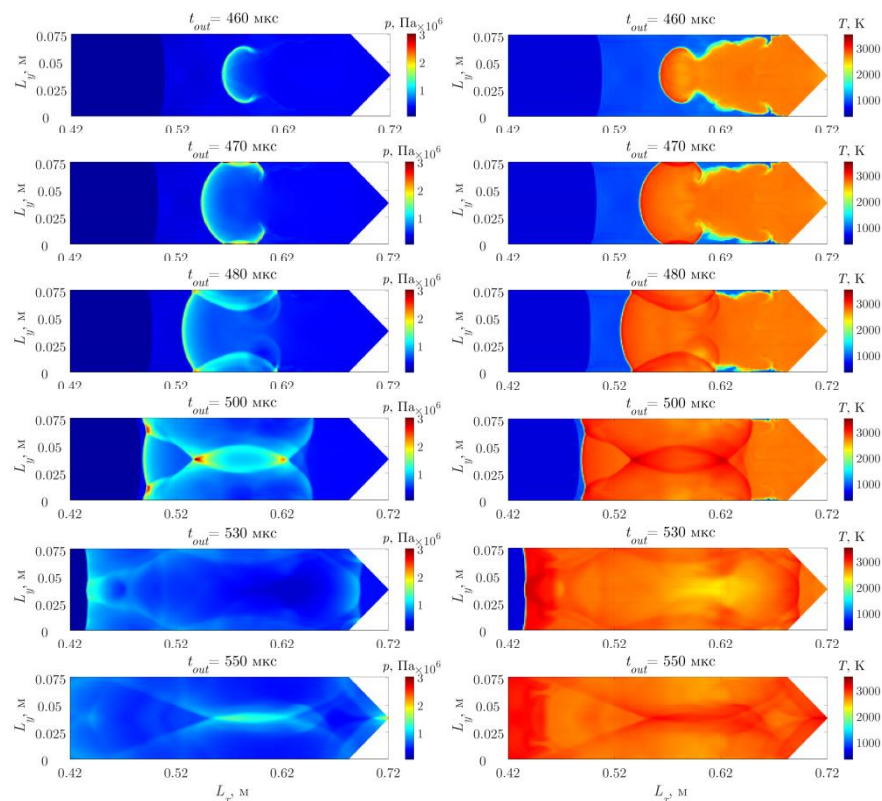
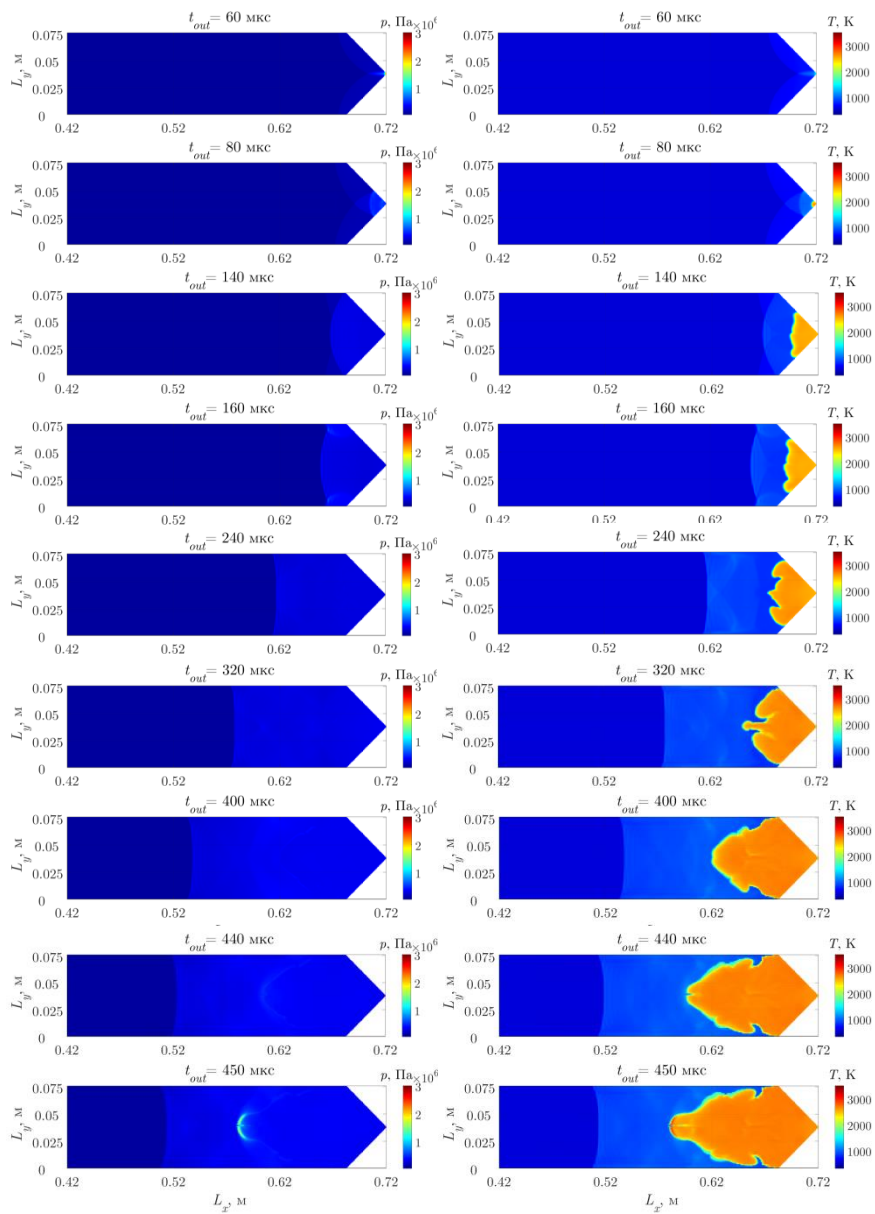
Случай возникновения перехода в клине

Давление

Температура

Давление

Температура



Заключение

- В ходе сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными из базы данных для тестирования переходных процессов в горючих газовых смесях было получено, что при отражении ударных волн от внутренней поверхности конуса или клина в зависимости от интенсивности падающих ударных волн может происходить как простое отражение падающей волны, так и воспламенение горючей смеси и возникновение волн детонации в ходе фокусировки отраженных волн.
- В результате сравнения данных теоретического расчета по двум вариантам расчетных схем и экспериментальных данных для нестационарной задачи отражения ударной волны в детонирующем газе от внутренней поверхности клина или конуса получено, что при одинаковом способе обработки полученных результатов данные по давлению за волной и скорости волны в теоретических расчетах и экспериментах отличаются менее, чем на 10%. При этом с течением времени скорости волн выходят на равновесные значения, и отличие теоретических и экспериментальных данных уменьшается и составляет при отражении ударной волны не более 3%, а при возникновении детонации в результате отражения отклонение не превосходит 5%.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!