

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН
МГУ имени М.В.Ломоносова



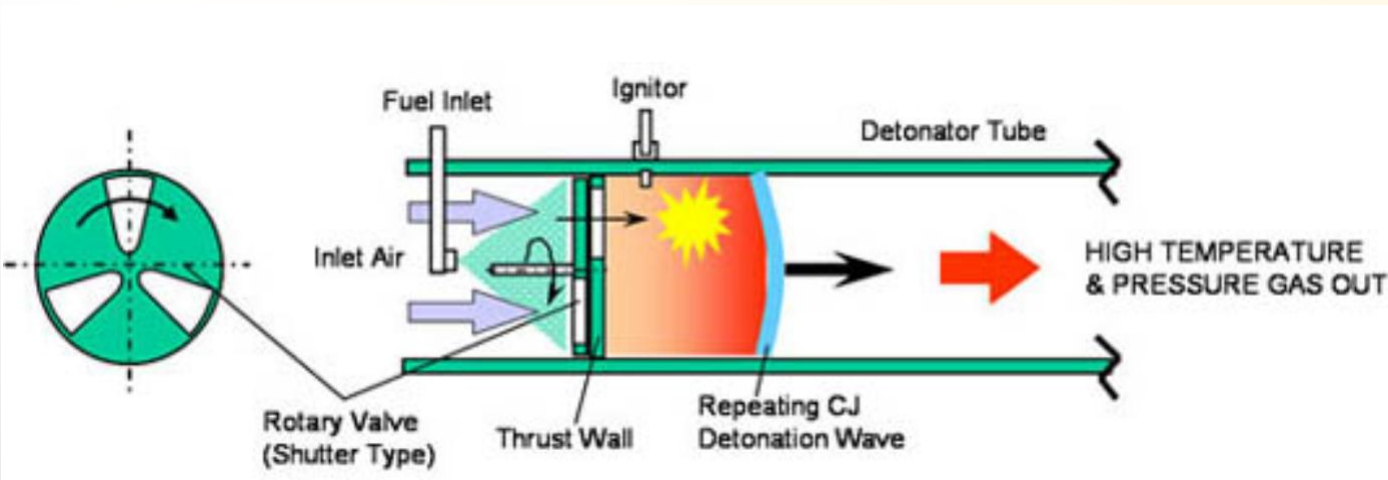
**Моделирование трехмерных
задач вращения
детонационной волны в
прямоточном двигателе на
супер ЭВМ**

*В.Ф. Никитин, Ю.Г. Филиппов, Л.И. Стамов,
Е.В. Михальченко*



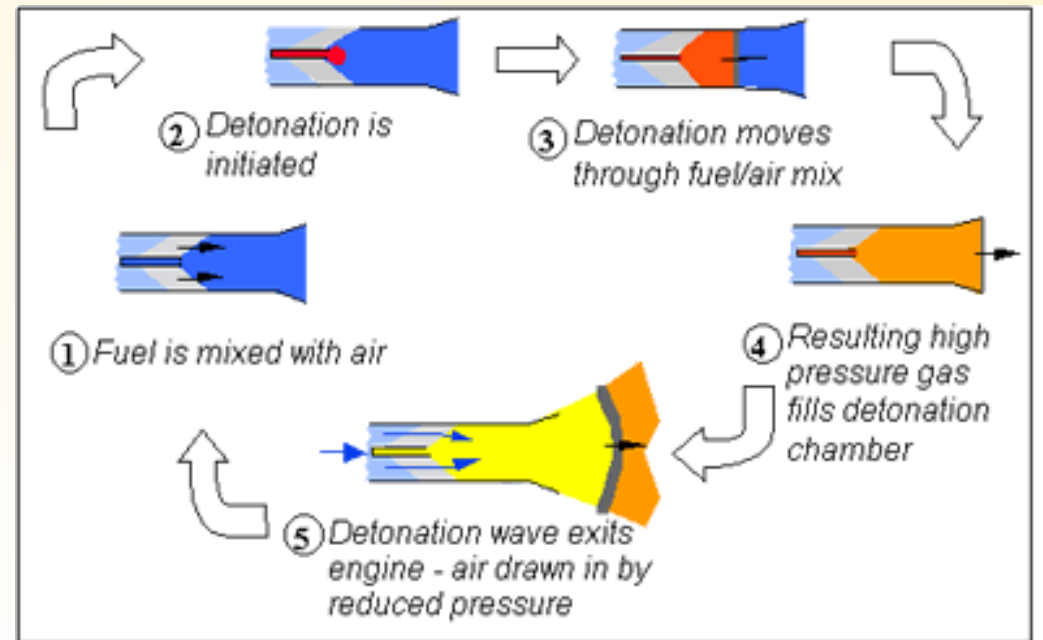
Russian Supercomputing Days

Импульсный детонационный двигатель



Configuration of a Typical PDE, Highlighting Major Features

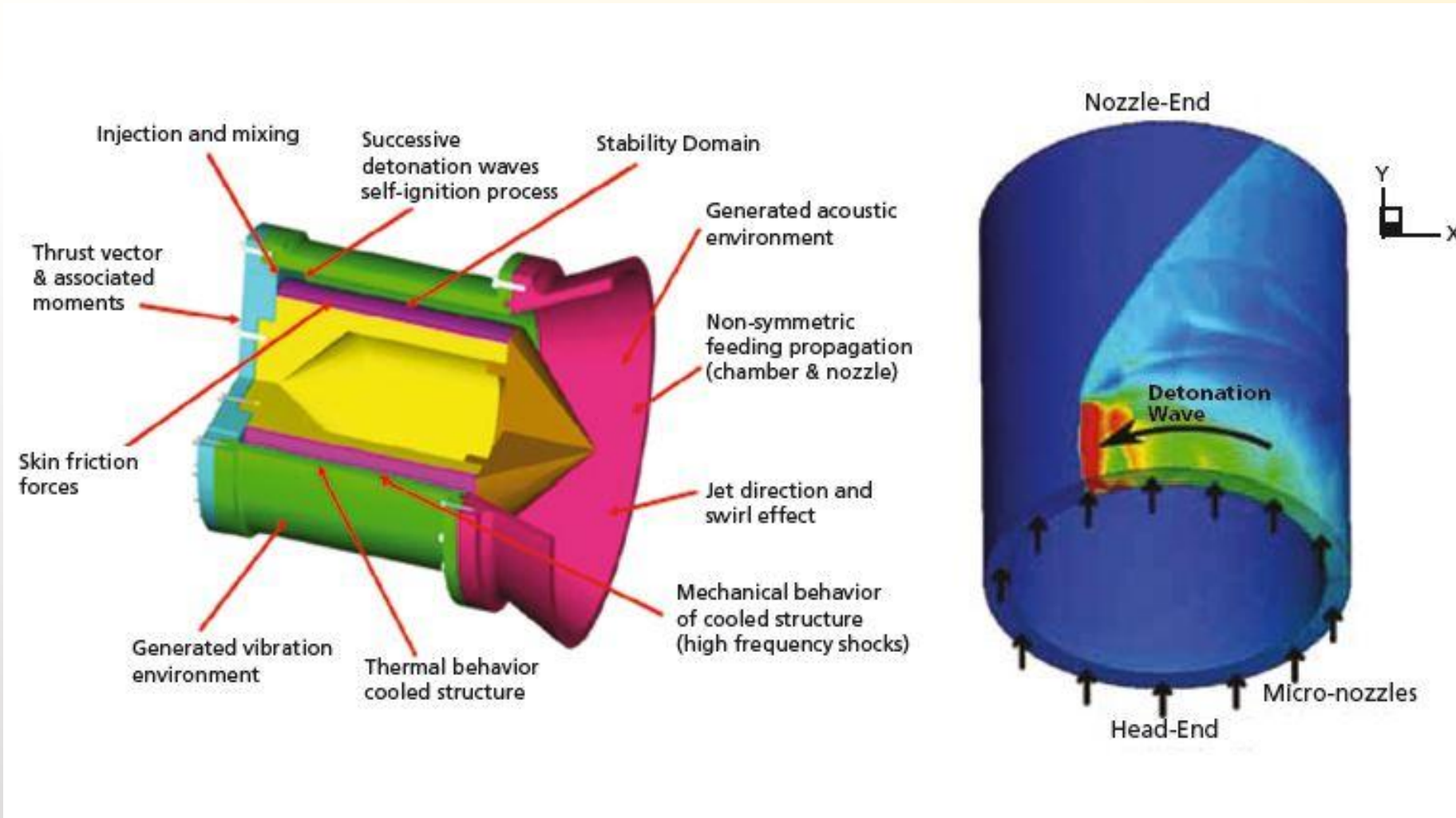
Source: UCLA Combustion Research Laboratory, Pulse Detonation Wave Engine Simulation. Retrieved November 2, 2004 from UCLA's Combustion Research Laboratory Propulsion Projects Web Site <http://www.seas.ucla.edu/combustion/projects/pulsed_detonation_wave.html>



PDE Wave Cycle

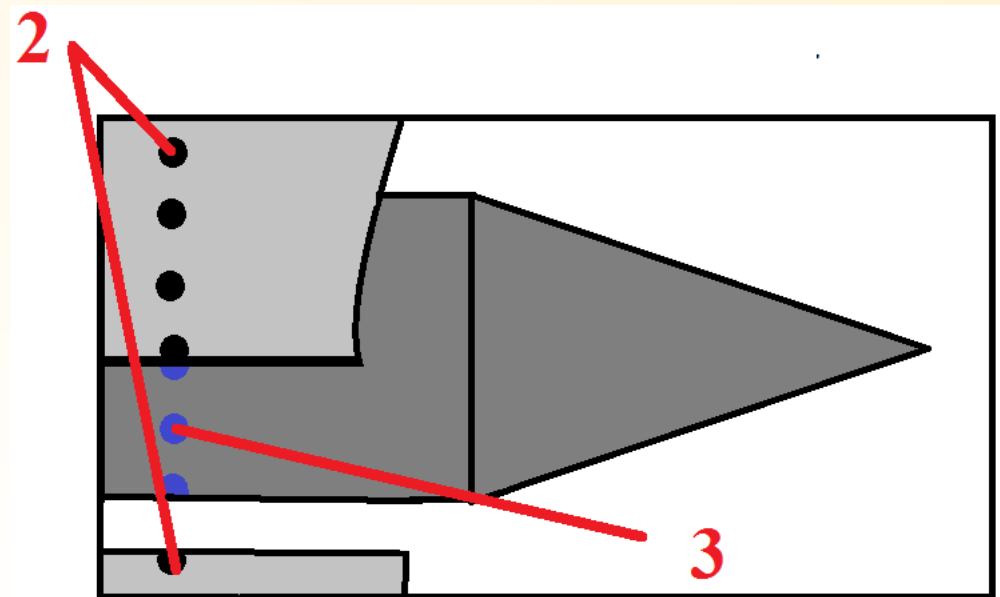
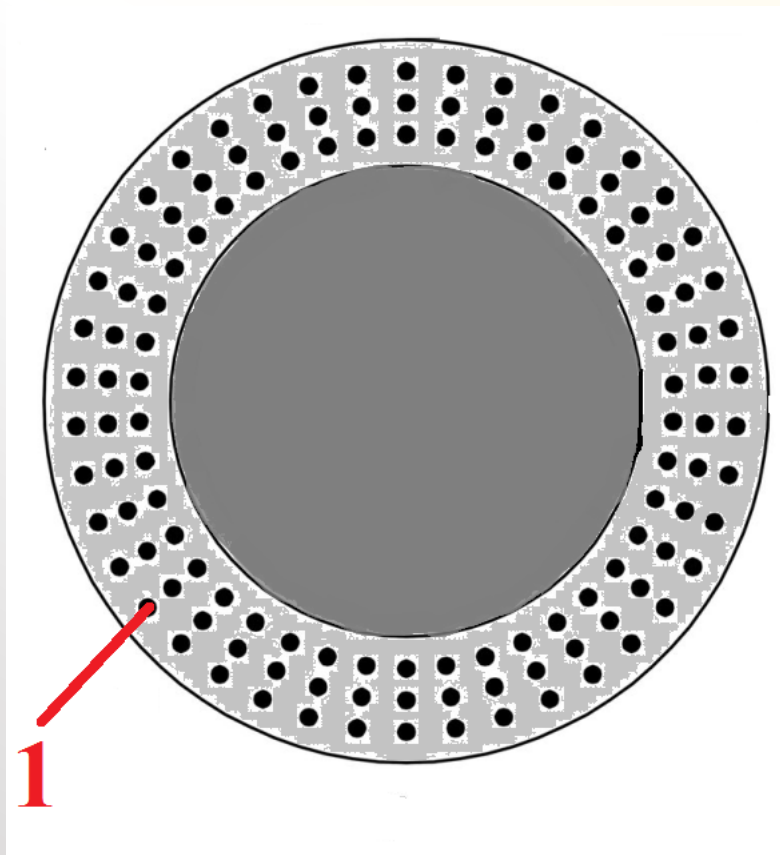
Source: NASA Glenn Research Center, Pulse detonation engine technology project. (2004, January) Retrieved October 28, 2004 from NASA's Glenn Research Center's Web site <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/AERO/base/pdet.htm>>

Двигатель с вращающейся детонационной волной



F. Falempin, "Continuous detonation wave engine," in Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft, RTO-EN-AVT-150, Paper 8, NATO, 2008.

Постановка задачи



$L=10\text{см}$, $R=5\text{см}$, (1) $N_r=72$, (2) $N_{ro}=28$, (3) $N_{ri}=24$, $r=2\text{мм}$, $r_{ign}=2.5$, $Q=20\text{кВ/мм}^3$

Подается 3 типа смеси:

1.Обедненная

$[H_2]:[O_2]=1:1$

2.Стехиометрическая

$[H_2]:[O_2]=2:1$

3.Богатая

$[H_2]:[O_2]=3:1$

Математическая модель

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_k u_j) - \frac{\partial J_{k,j}}{\partial x_j} = \mathcal{Q}_k$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial E_T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((E_T + p) u_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} (J_{T,j} + u_i \tau_{i,j}) = \mathcal{Q}$$

Уравнения состояния

$$p = p^0 + \frac{2}{3} \rho K \quad p^0 = R_G T \sum_{k=1}^{N_C} X_k$$

$$\rho = \sum_{k=1}^{N_C} \rho_k \quad Y_k = \frac{\rho_k}{\rho} \quad X_k = \frac{\rho_k}{W_k}$$

$$E_T = E + \rho \frac{u^2}{2} + \rho K \quad u^2 = u_j u_j$$

$$E = \sum_{k=1}^{N_C} X_k E_k(T) = R_G T \sum_{k=1}^{N_C} X_k \cdot \left(\hat{H}_k(T) - 1 \right)$$

Модель турбулентности ка-омега модель Уилкокса

$$\frac{\partial \rho K}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho K u_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) = \tau_{i,j}^{turb} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho K \omega$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = \alpha \frac{\omega}{K} \tau_{i,j}^{turb} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2$$

$$\alpha = \frac{5}{9} \quad \sigma = \sigma^* = \frac{1}{2} \quad \beta = \frac{3}{40} \quad \beta^* = \frac{9}{100}$$

$$\tau_{i,j}^{Turb} = \rho \frac{K}{\omega} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_s}{\partial x_s} \delta_{i,j} \right) \quad \mu_T = \frac{\rho K}{\omega}$$

$$\mu = \frac{\sum_{k=1}^{N_C} X_k \mu_k(T)}{\sum_{j=1}^{N_C} X_j \phi_{k,j}(T)}$$

$$\phi_{k,j} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{W_k}{W_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(1 + \left(\frac{\mu_k}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{W_j}{W_k} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^2$$

Потоки массы, энергии и импульса с учетом модели турбулентности

$$J_{k,j} = \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j}$$

$$J_{T,j} = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} + (\mu + \mu_T) \frac{\partial K}{\partial x_j}$$

$$\tau_{i,j} = (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_s}{\partial x_s} \delta_{i,j} \right)$$

Формулы для расчета химической кинетики

$$\mathcal{R}_k = W_k \hat{\omega}_k(T, \mathbf{X}) \quad \sum_{k=1}^{N_C} \mathcal{R}_k = 0 \quad \hat{\omega}_k = \sum_r \nu_{r,k} \omega_r$$

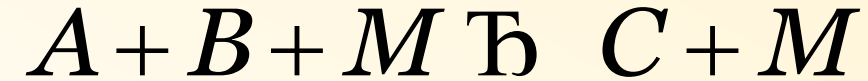
$$\omega_r = M_r(\mathbf{X}) \left[k_{F,r}(M_r, T) \prod_j X_j^{\alpha_{r,j}} - k_{R,r}(M_r, T) \prod_j X_j^{\beta_{r,j}} \right]$$

$$k_{B,r} = k_{F,r} \exp \left(\sum_{k=1}^{N_C} \nu_{r,k} \left(\hat{H}_k(T) - \hat{S}_k(T) - 1 \right) \right) \left(\frac{R_G T}{p_{ref}} \right)^{\sum_{k=1}^{N_C} \nu_{r,k}}$$

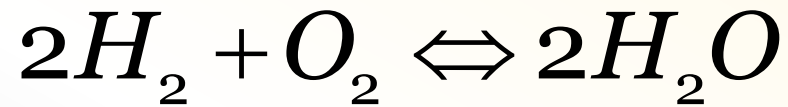
Механизм реакции горения водорода

N	Реакция	Коэффициент скорости
1.	$O_2 + H \rightleftharpoons OH + O$	$2.00 \cdot 10^{14} \cdot \exp[-70.3/R_G T]$
2.	$H_2 + O \rightleftharpoons OH + H$	$5.06 \cdot 10^4 \cdot T^{2.67} \cdot \exp[-26.3/R_G T]$
3.	$H_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + H$	$1.00 \cdot 10^8 \cdot T^{1.60} \cdot \exp[-13.8/R_G T]$
4.	$OH + OH \rightleftharpoons H_2O + O$	$1.50 \cdot 10^9 \cdot T^{1.14} \cdot \exp[-0.4/R_G T]$
5.	$H + H + M \rightleftharpoons H_2 + M$	$1.80 \cdot 10^{18} \cdot T^{-1.00}$
6.	$O + O + M \rightleftharpoons O_2 + M$	$2.90 \cdot 10^{17} \cdot T^{-1.00}$
7.	$H + OH + M \rightleftharpoons H_2O + M$	$2.20 \cdot 10^{22} \cdot T^{-2.00}$
8.	$H + O_2 + M \rightleftharpoons HO_2 + M$	$2.30 \cdot 10^{18} \cdot T^{-0.80}$
9.	$HO_2 + H \rightleftharpoons OH + OH$	$1.50 \cdot 10^{14} \cdot \exp[-4.2/R_G T]$
10.	$HO_2 + H \rightleftharpoons H_2 + O_2$	$2.50 \cdot 10^{13} \cdot \exp[-2.9/R_G T]$
11.	$HO_2 + H \rightleftharpoons H_2O + O$	$3.00 \cdot 10^{13} \cdot \exp[-7.2/R_G T]$
12.	$HO_2 + O \rightleftharpoons OH + O_2$	$1.80 \cdot 10^{13} \cdot \exp[+1.7/R_G T]$
13.	$HO_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + O_2$	$6.00 \cdot 10^{13}$
14.	$HO_2 + HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2 + O_2$	$2.50 \cdot 10^{11} \cdot \exp[+5.2/R_G T]$
15.	$OH + OH + M \rightleftharpoons H_2O_2 + M$	$3.25 \cdot 10^{22} \cdot T^{-2.00}$
16.	$H_2O_2 + H \rightleftharpoons H_2 + HO_2$	$1.70 \cdot 10^{12} \cdot \exp[-15.7/R_G T]$
17.	$H_2O_2 + H \rightleftharpoons H_2O + OH$	$1.00 \cdot 10^{13} \cdot \exp[-15.0/R_G T]$
18.	$H_2O_2 + O \rightleftharpoons OH + HO_2$	$2.80 \cdot 10^{13} \cdot \exp[-26.8/R_G T]$
19.	$H_2O_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + HO_2$	$5.40 \cdot 10^{12} \cdot \exp[-4.2/R_G T]$
20.	$O + H + M \rightleftharpoons OH + M$	$4.71 \cdot 10^{18} \cdot T^{-1.0}$

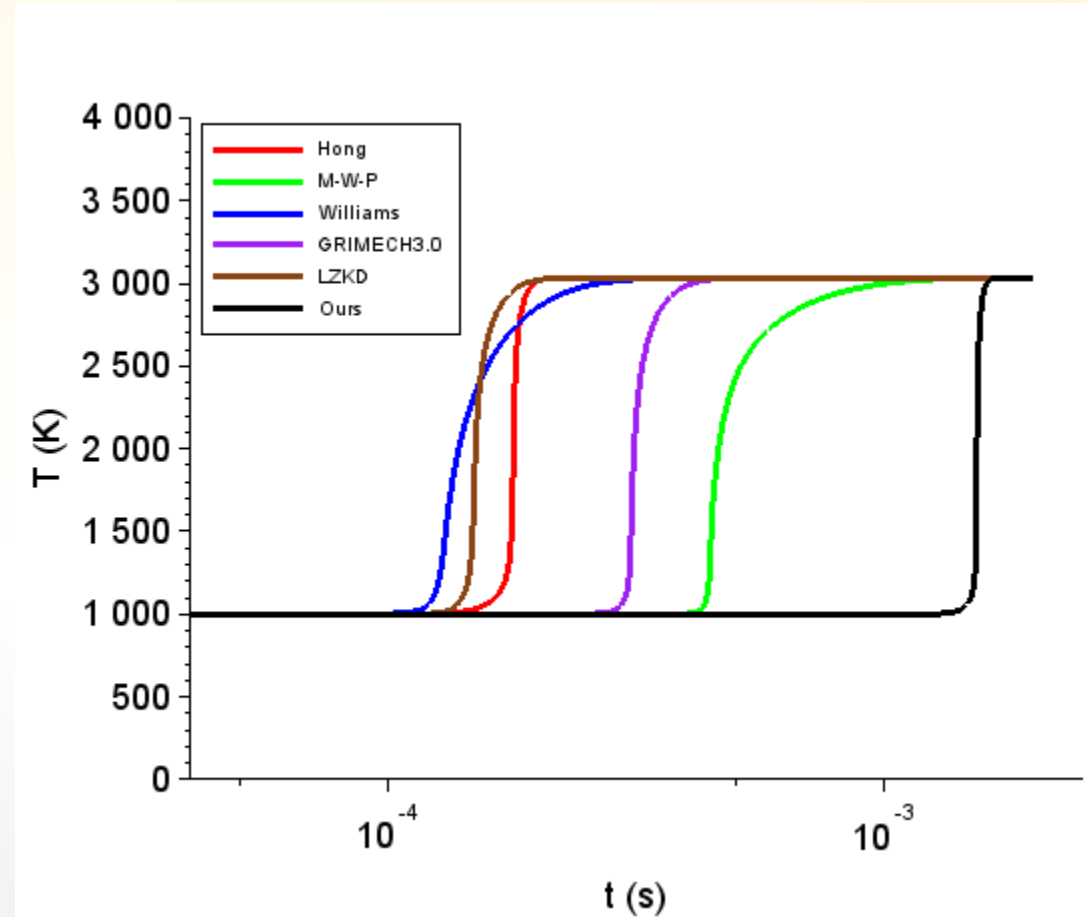
Единицы измерения: см, моль, К, кДж.



Сравнение нашего механизма с известными: Maas-Warnatz-Pope (1992), Hong (2010), Williams (2004), Gri-Mech 3.0 (1999), Liu-Zhou-Kazakov-Dryer (2004).

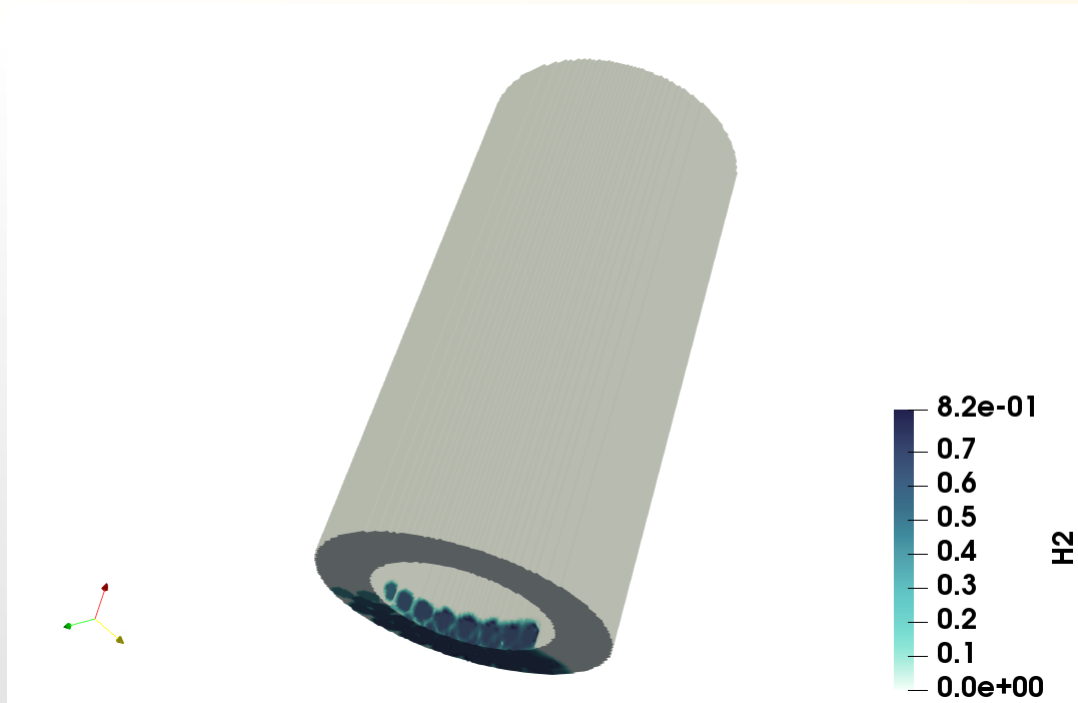


1. Одинаковое число компонент
2. MWP 19 обратимых реакций, H: 20 реакций, W: 22 реакции, G: 20 реакций, L: 18 реакций.
3. MWP: выпадающих нет, влияние 3 тел однотипно; W: 2 выпадающих реакции по Troe с переменным Fcent, влияние 3 тел различно, H: 4 варианта выпадающих по Troe и Lindemann с постоянным Fcent. G: 1 выпадающая реакция (Troe), L: 2 выпадающих (Fcent).
4. Часть реакций по Hong, Gri-Mech, LZKD идут несколькими механизмами одновременно (с иным набором параметров Аррениуса). Формально это другая реакция с тем же набором компонент, но может быть с иным составом 3 тела и/или иным выпадающим механизмом. В этом смысле у Hong 29 реакций, у Gri-Mech 3.0 27 реакций, у L 22 реакции.

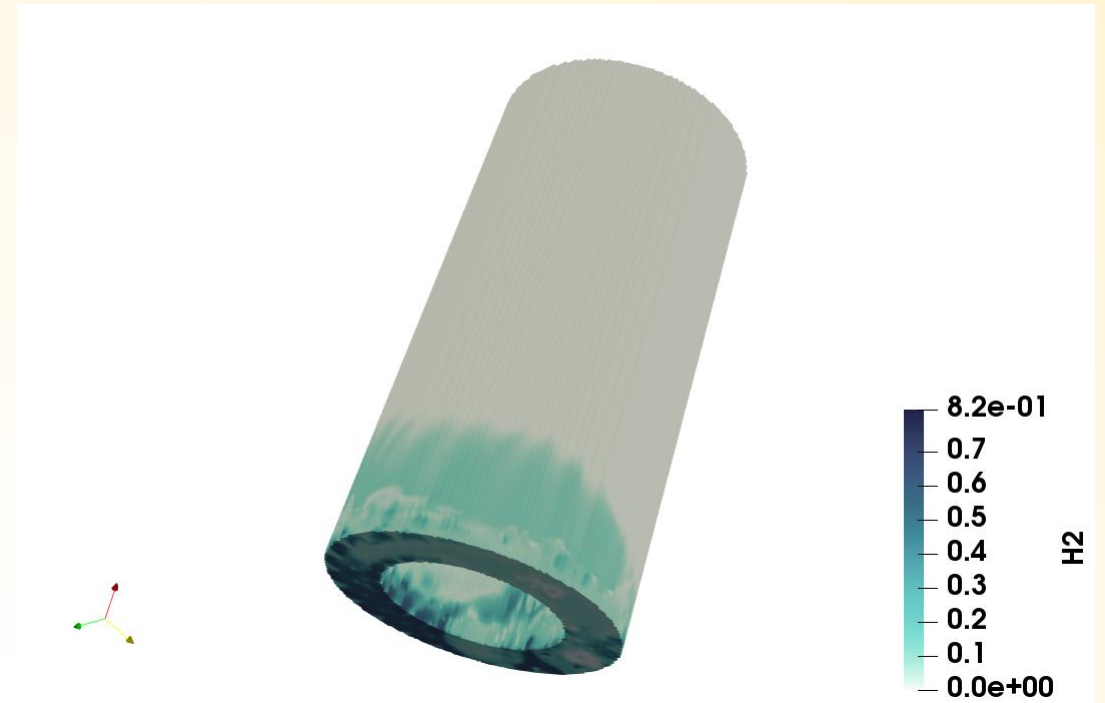


$T_0 = 1000 \text{ K}$, $P_0 = 1 \text{ bar}$, $[H_2]:[O_2]:[N_2]=2:1:4$

Процесс заполнения горючей смесью



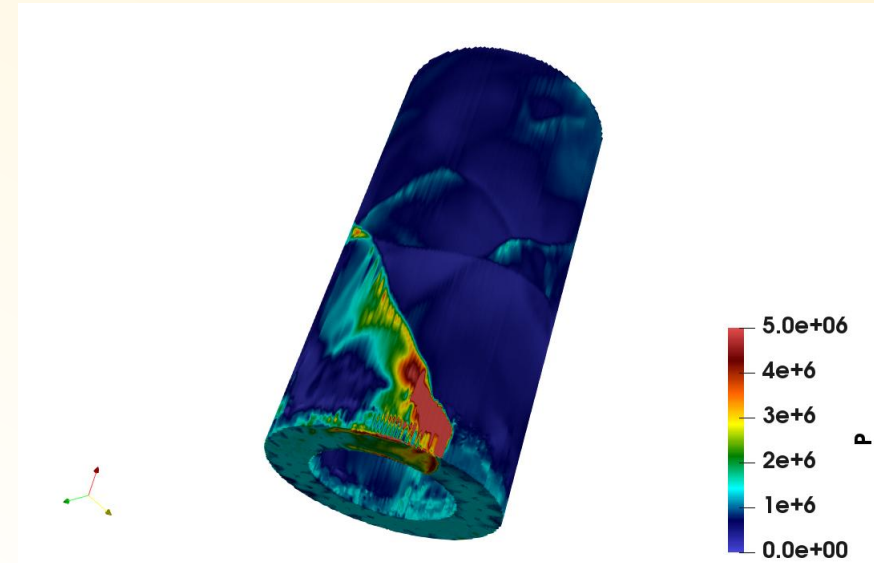
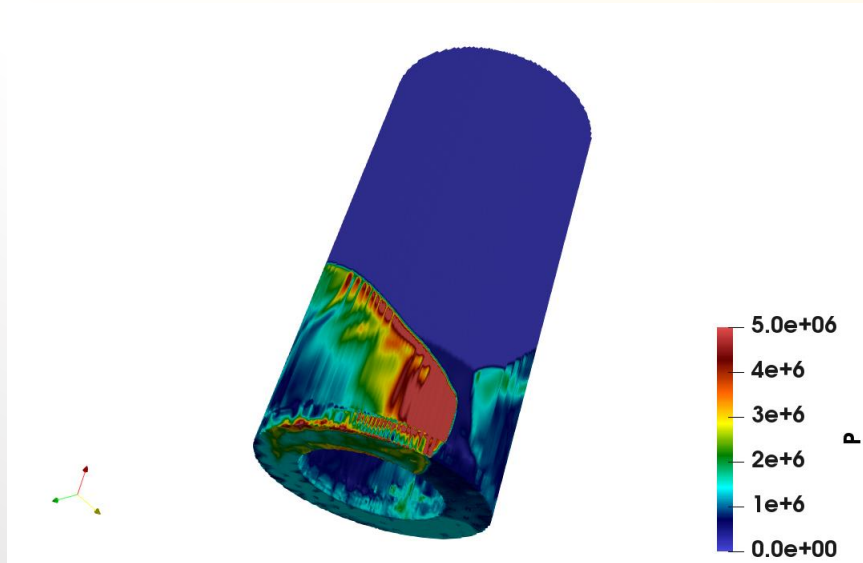
Распределение топлива на 10 мкс, непосредственно перед зажиганием. Стехиометрическая смесь.



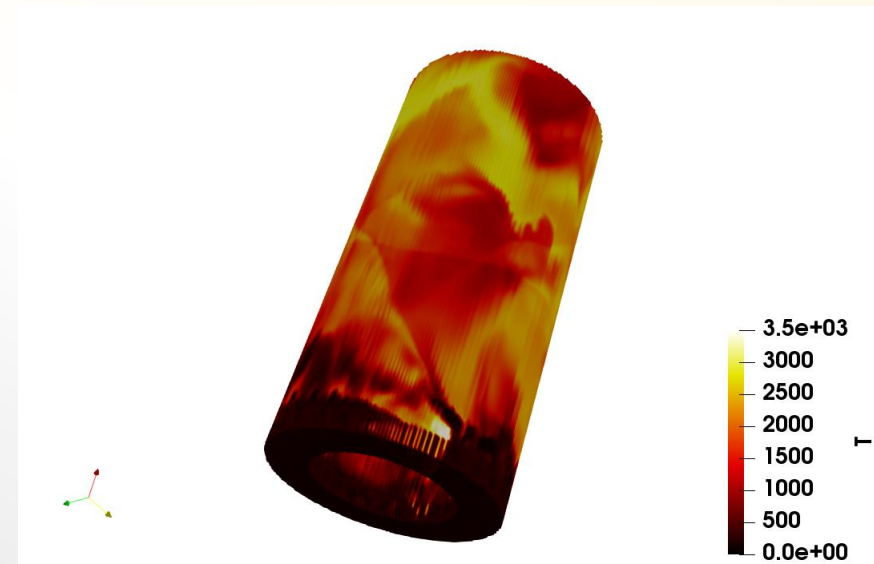
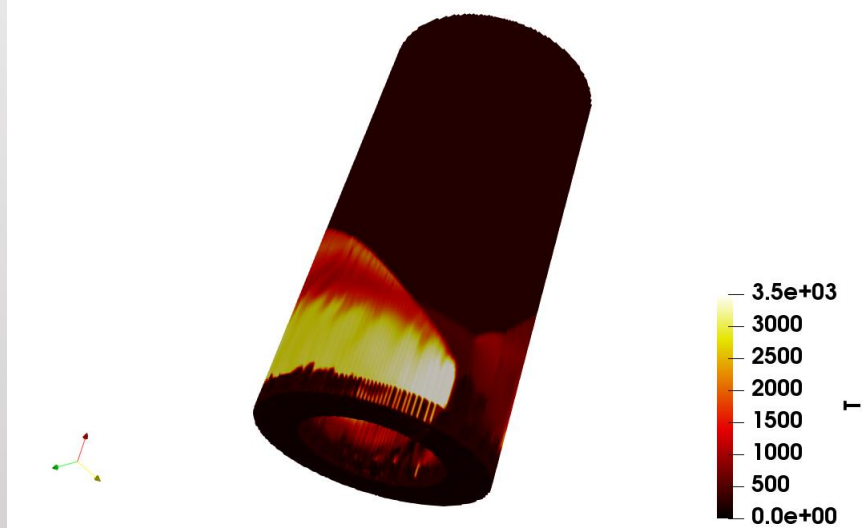
Распределение топлива при 50 мкс после зажигания. Стехиометрическая смесь.

Бедная смесь: детонационная волна

Давление в момент времени: а) $t=51\mu\text{s}$, б) $t=150\mu\text{s}$.

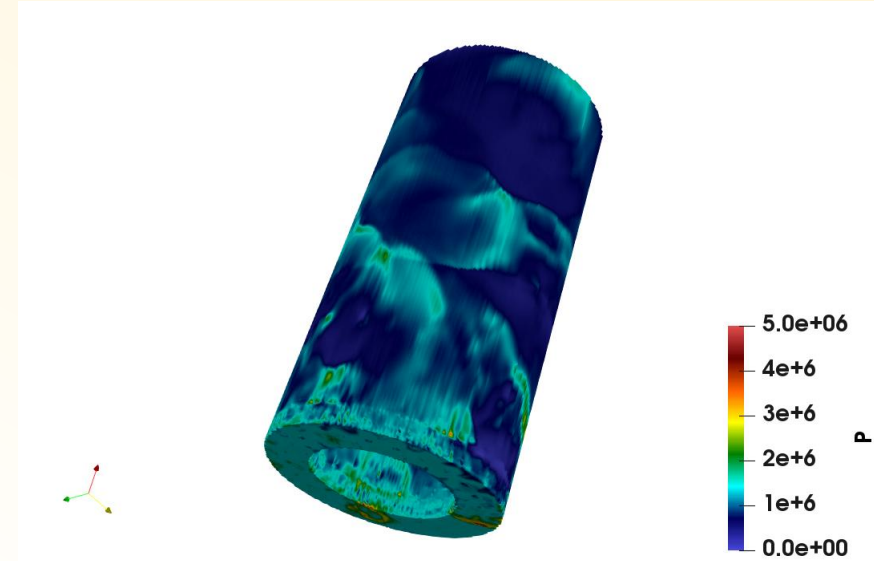
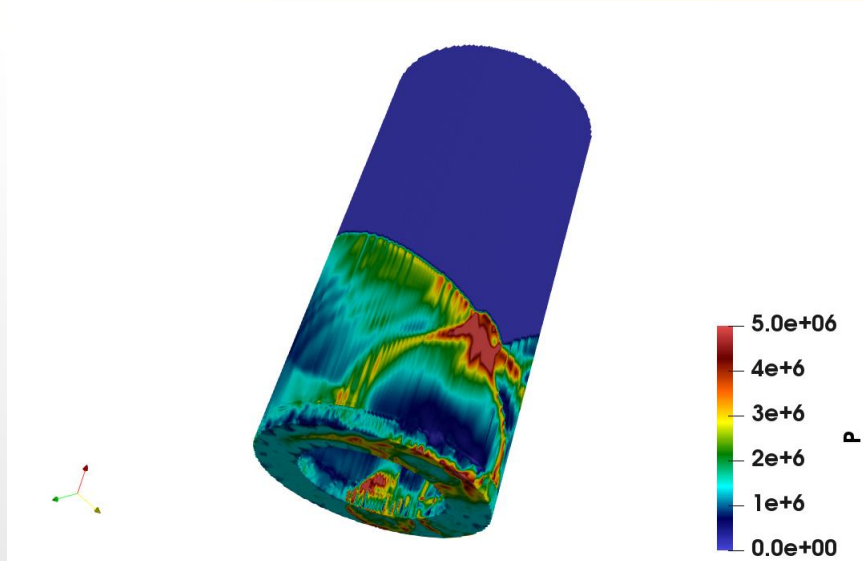


Температура в момент времени: а) $t=51\mu\text{s}$, б) $t=150\mu\text{s}$.

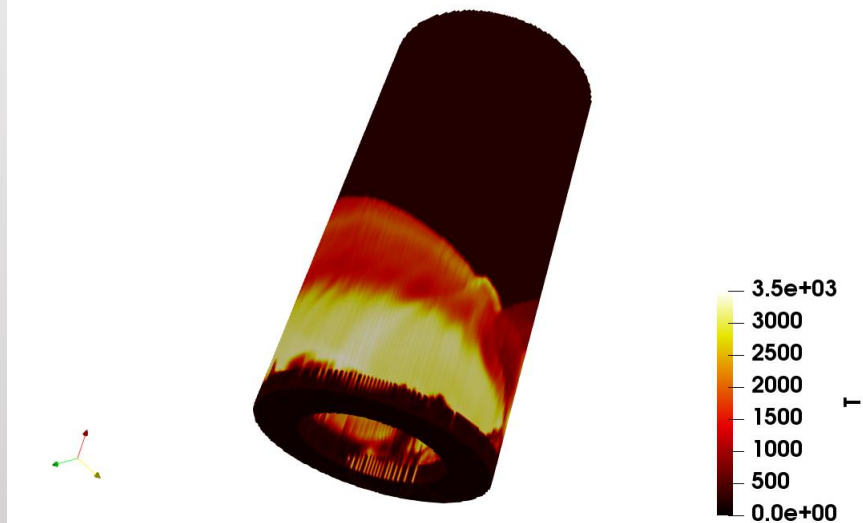


Стехиометрическая смесь: неустойчивый режим

Давление в момент времени: а) $t=51\mu\text{s}$, б) $t=150\mu\text{s}$.

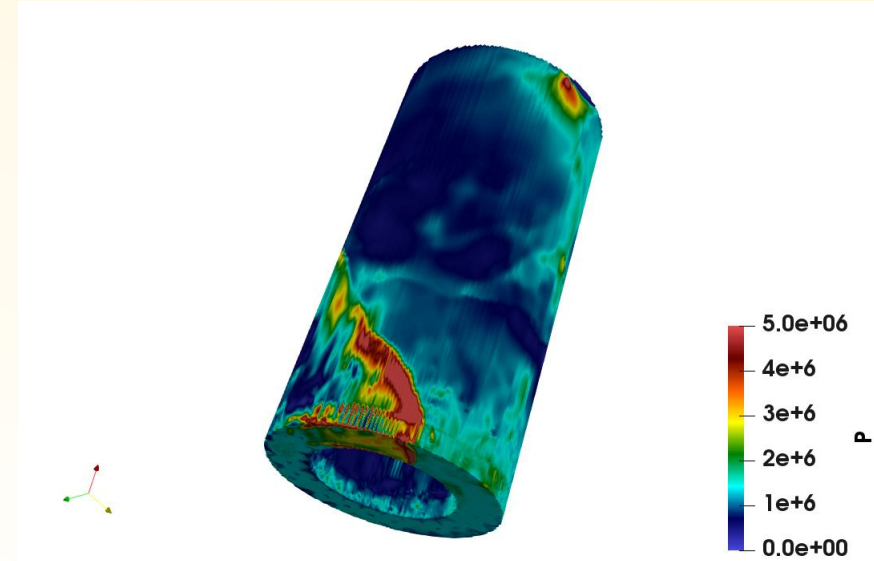
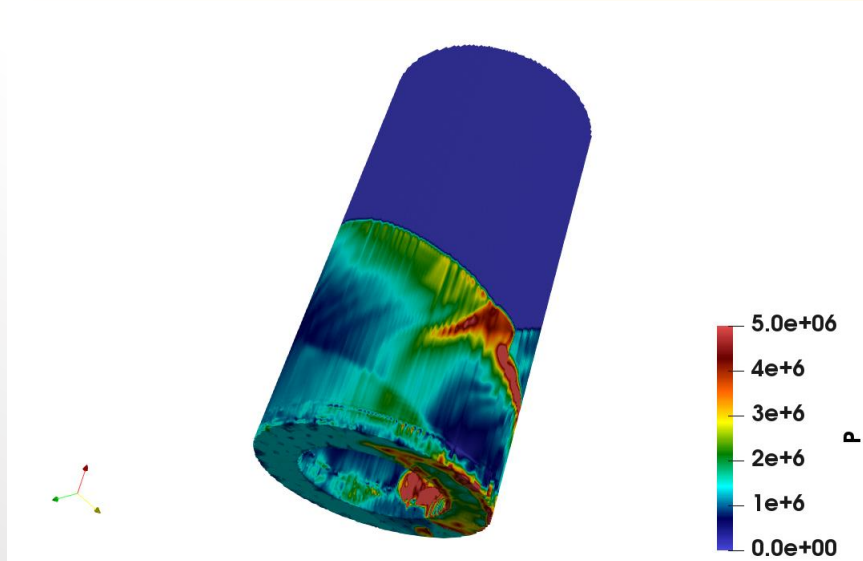


Температура в момент времени: а) $t=51\mu\text{s}$, б) $t=150\mu\text{s}$.

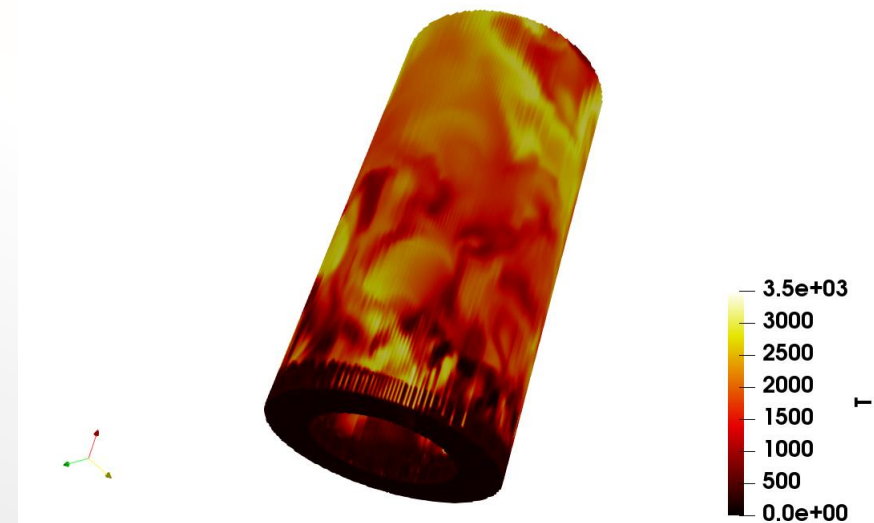
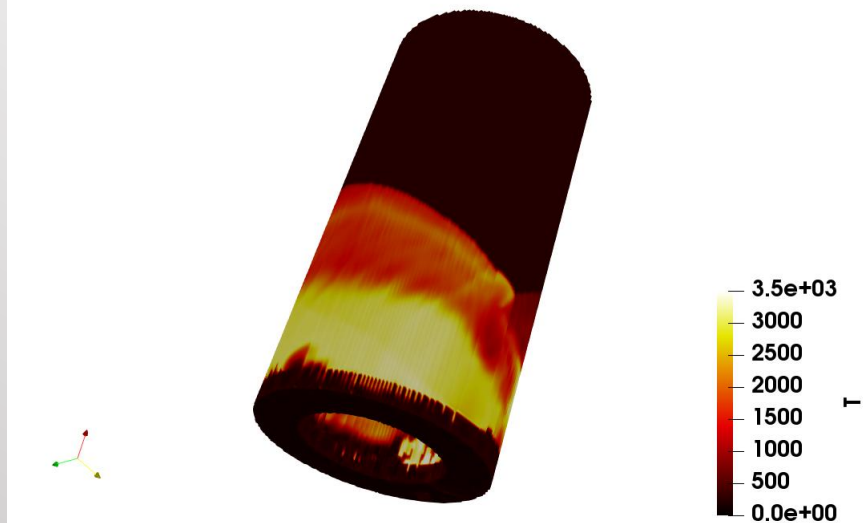


Богатая смесь: детонационная волна

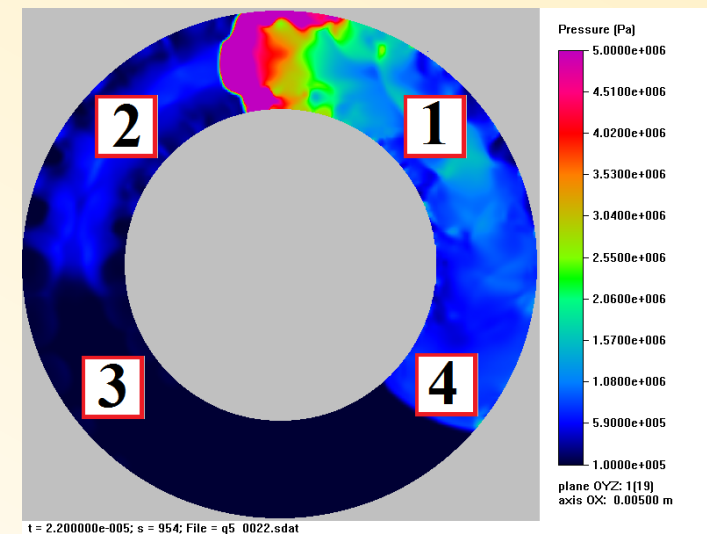
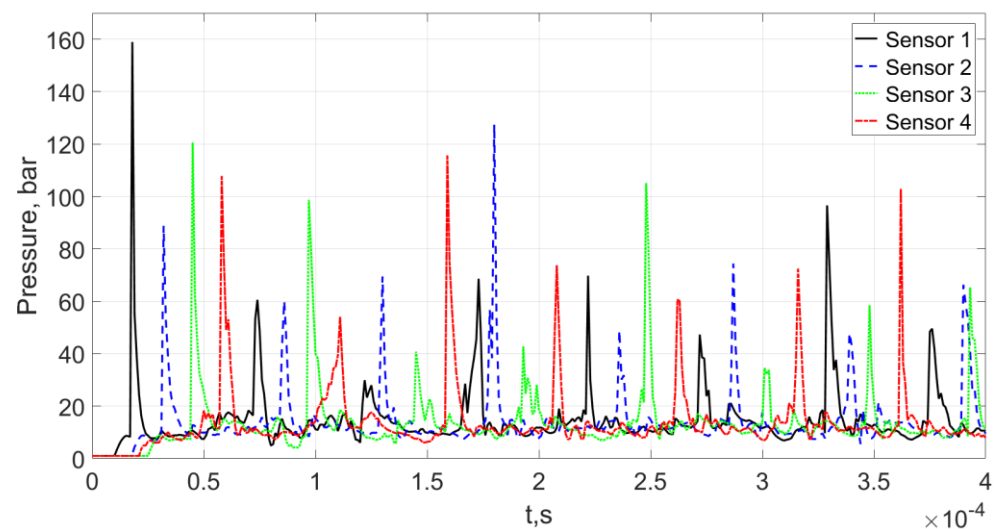
Давление в момент времени: а) $t=51\mu\text{s}$, б) $t=150\mu\text{s}$.



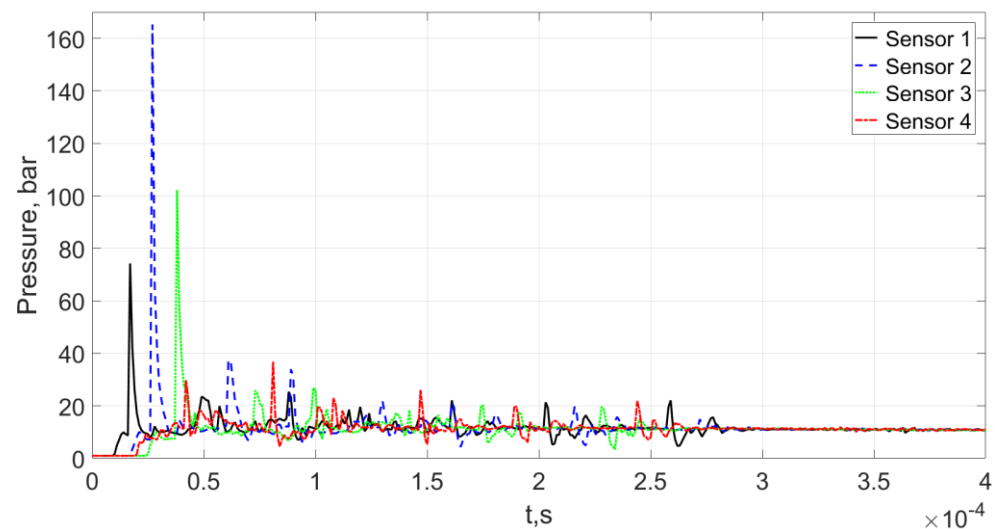
Температура в момент времени: а) $t=51\mu\text{s}$, б) $t=150\mu\text{s}$.



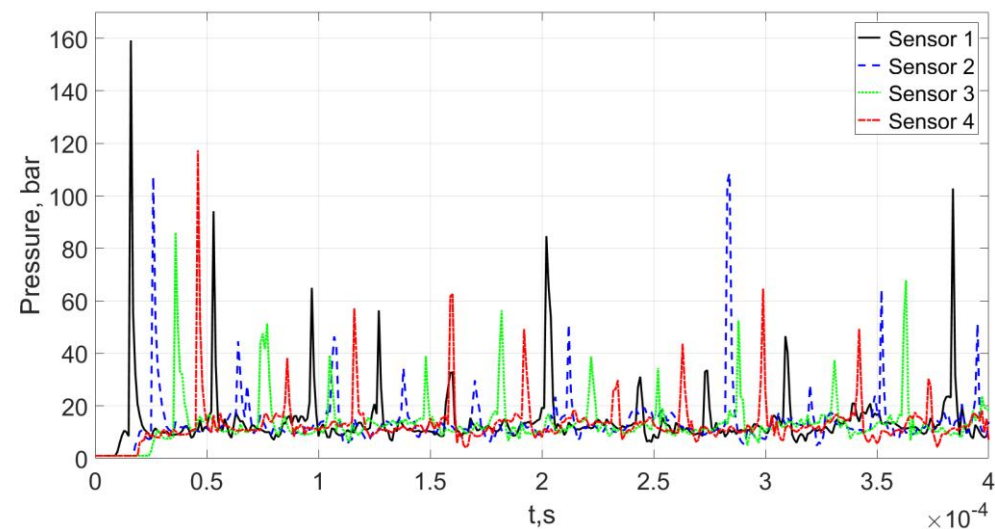
Давление в зависимости от времени в виртуальных датчиках для обедненной смеси



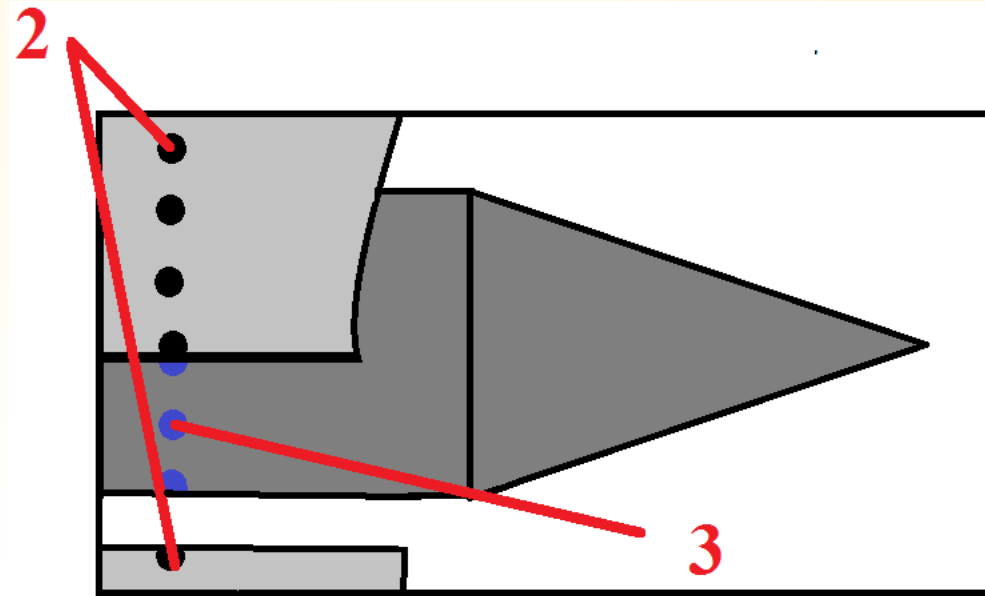
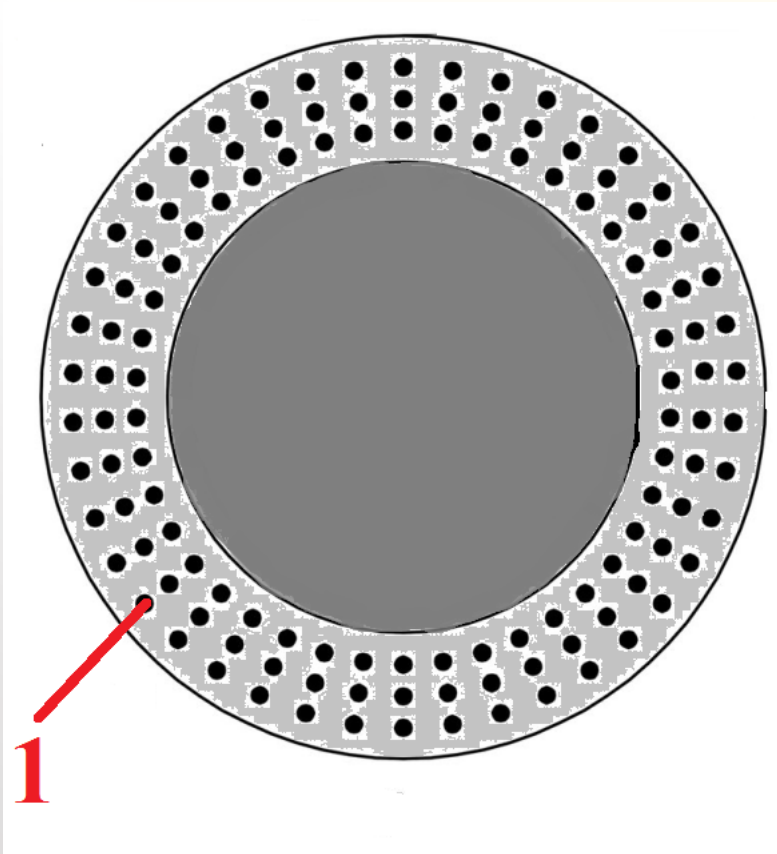
Давление в зависимости от времени в виртуальных датчиках для стехиометрической смеси



Давление в зависимости от времени в виртуальных датчиках для стехиометрической смеси



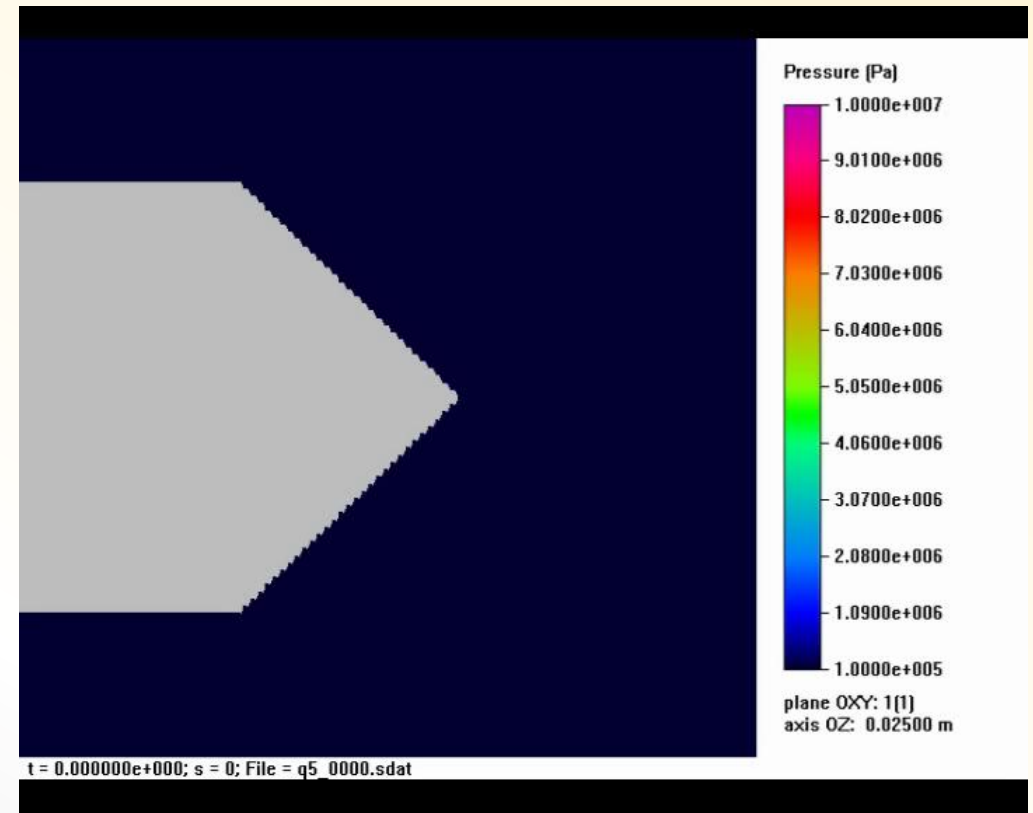
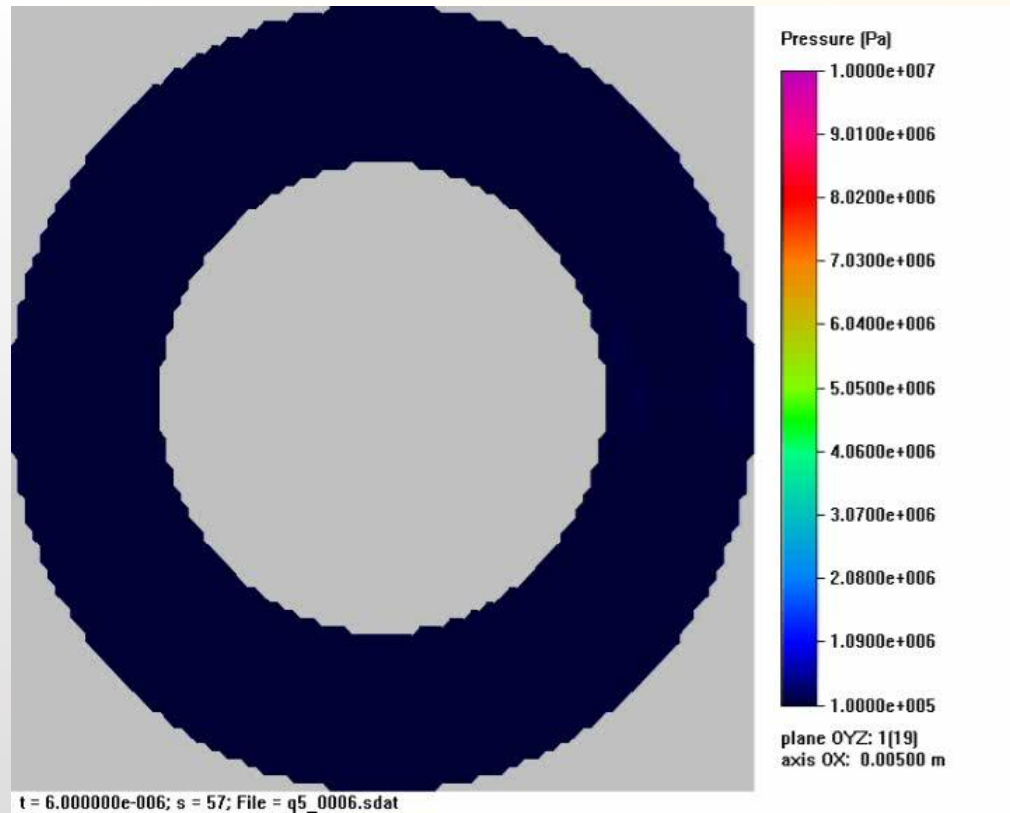
Модельная задача с дополнительной подачей кислорода через боковые форсунки



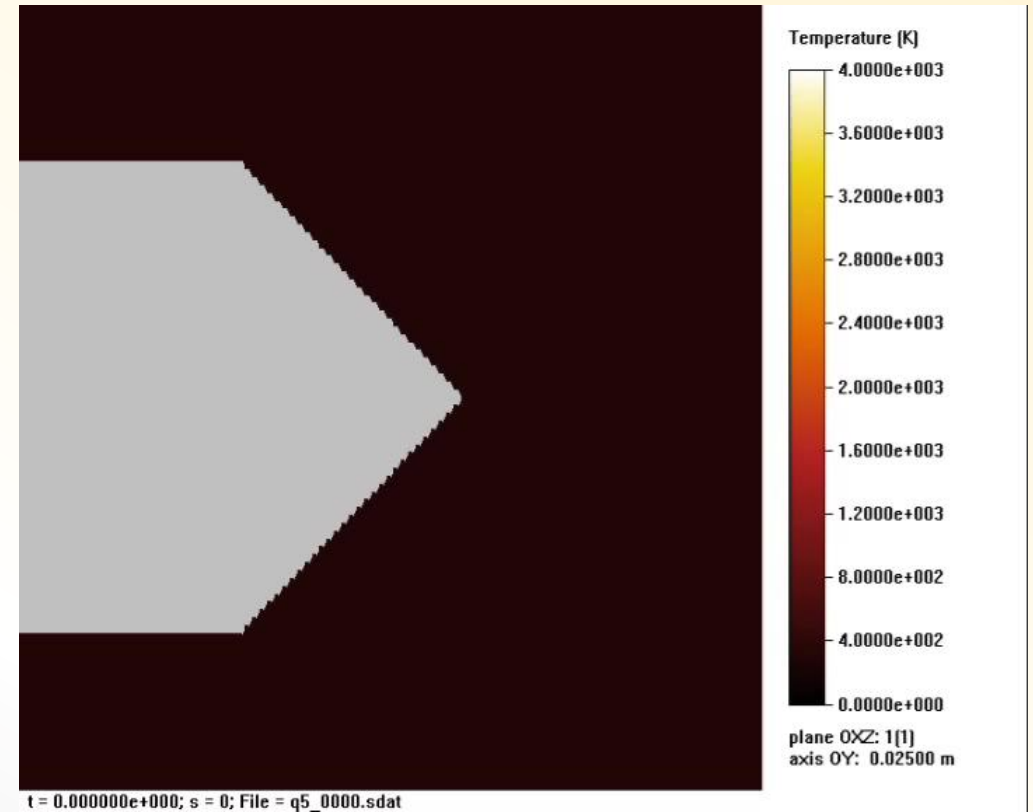
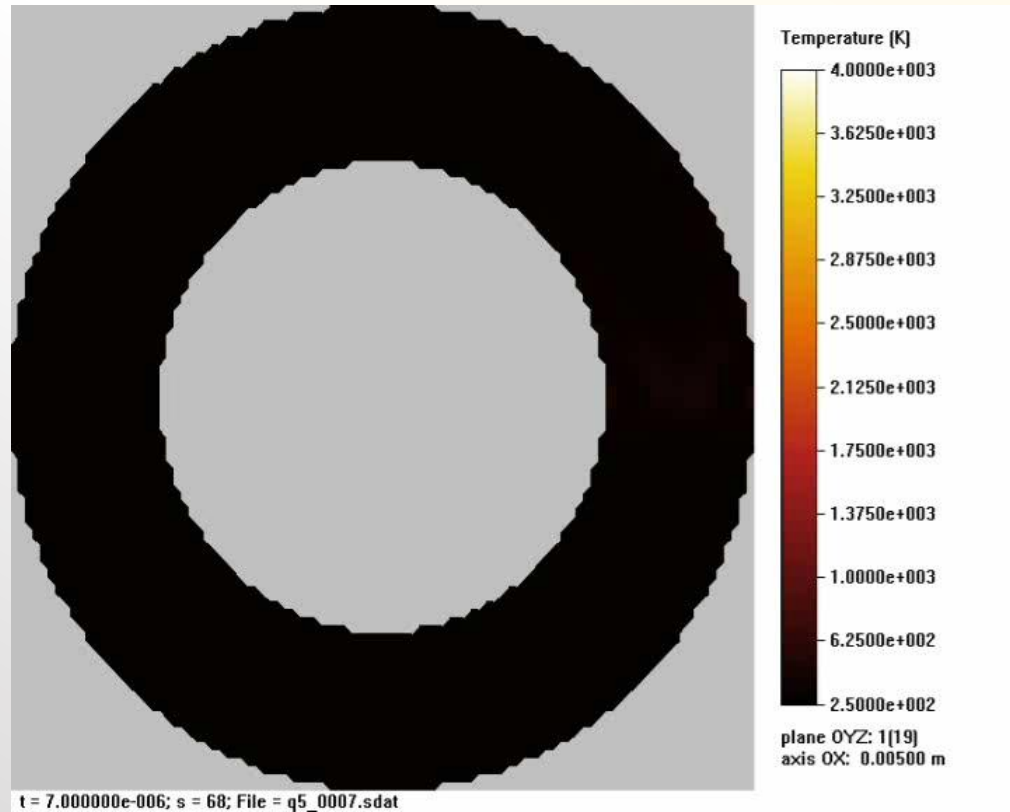
$L=10\text{см}$, $R=5\text{см}$, (1) $N_r=72$, (2) $N_{rO}=28$, (3) $N_{ri}=24$, $r=2\text{мм}$, $r_{ign}=2.5$, $Q=20\text{кВ/мм}^3$

Из инжекторов 1-й группы осуществляется подача богатой смеси, из инжекторов группы 2,3 ведется подача кислорода.

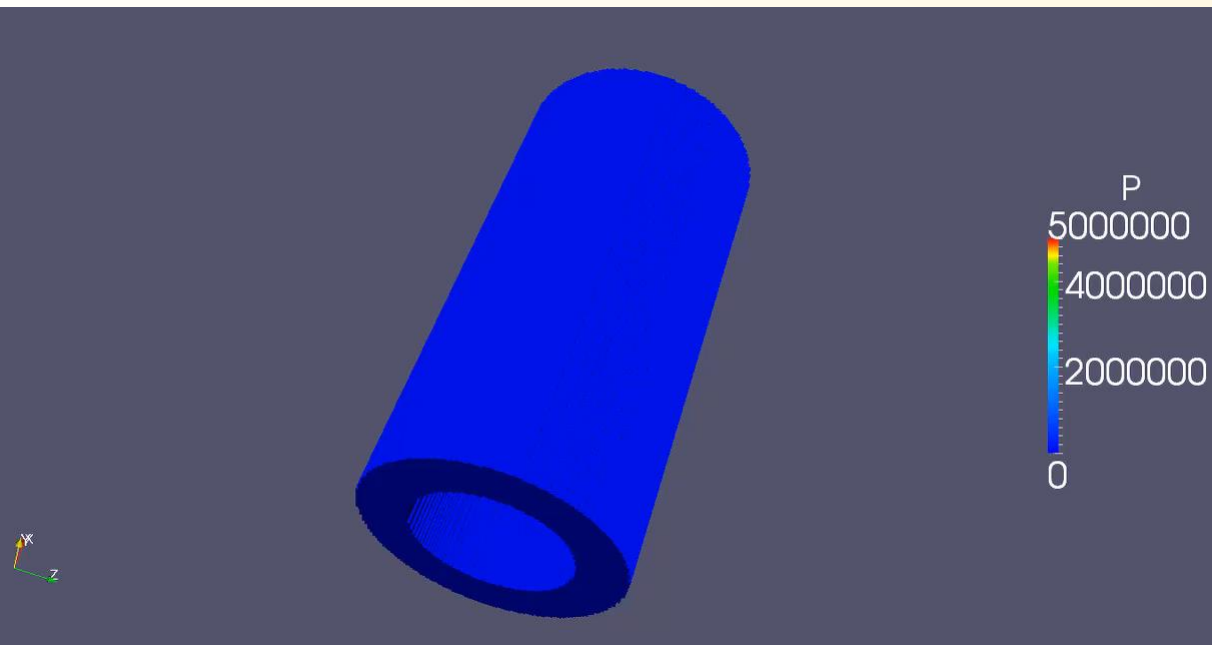
Эволюция давления (2D)



Эволюция температуры (2D)

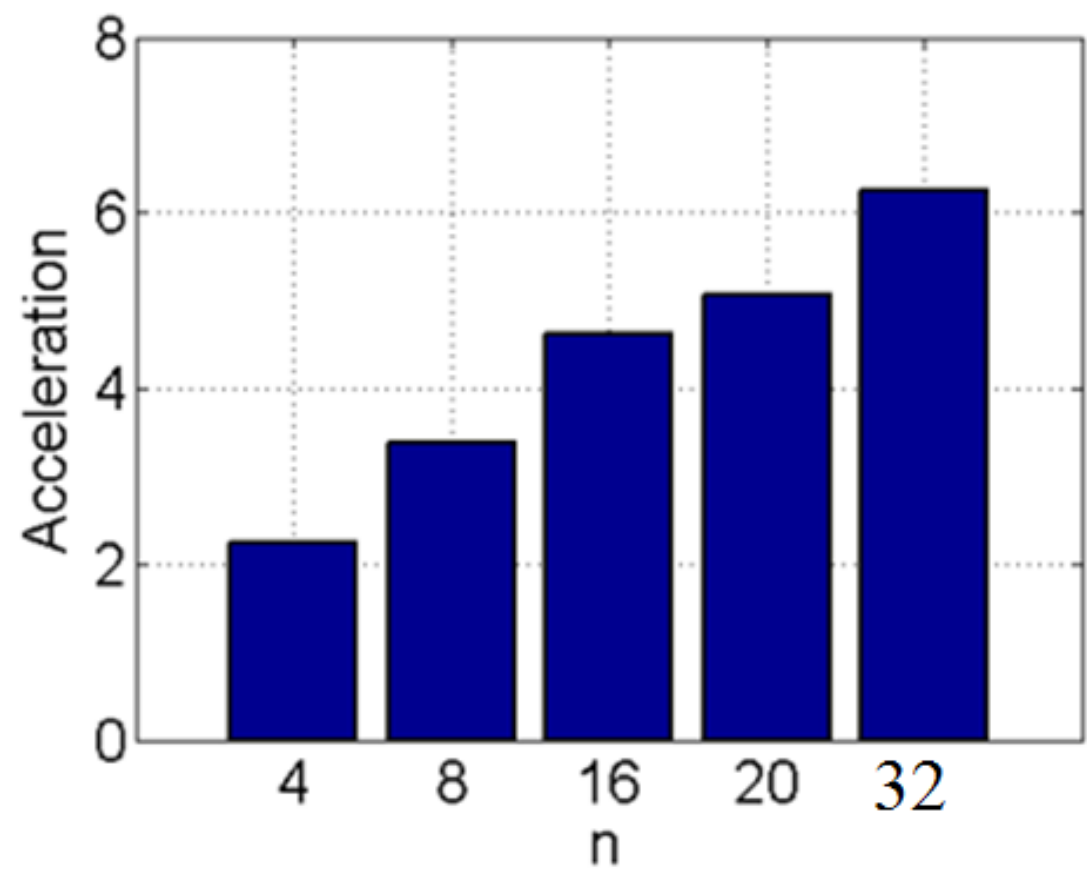


Эволюция давления (3D)

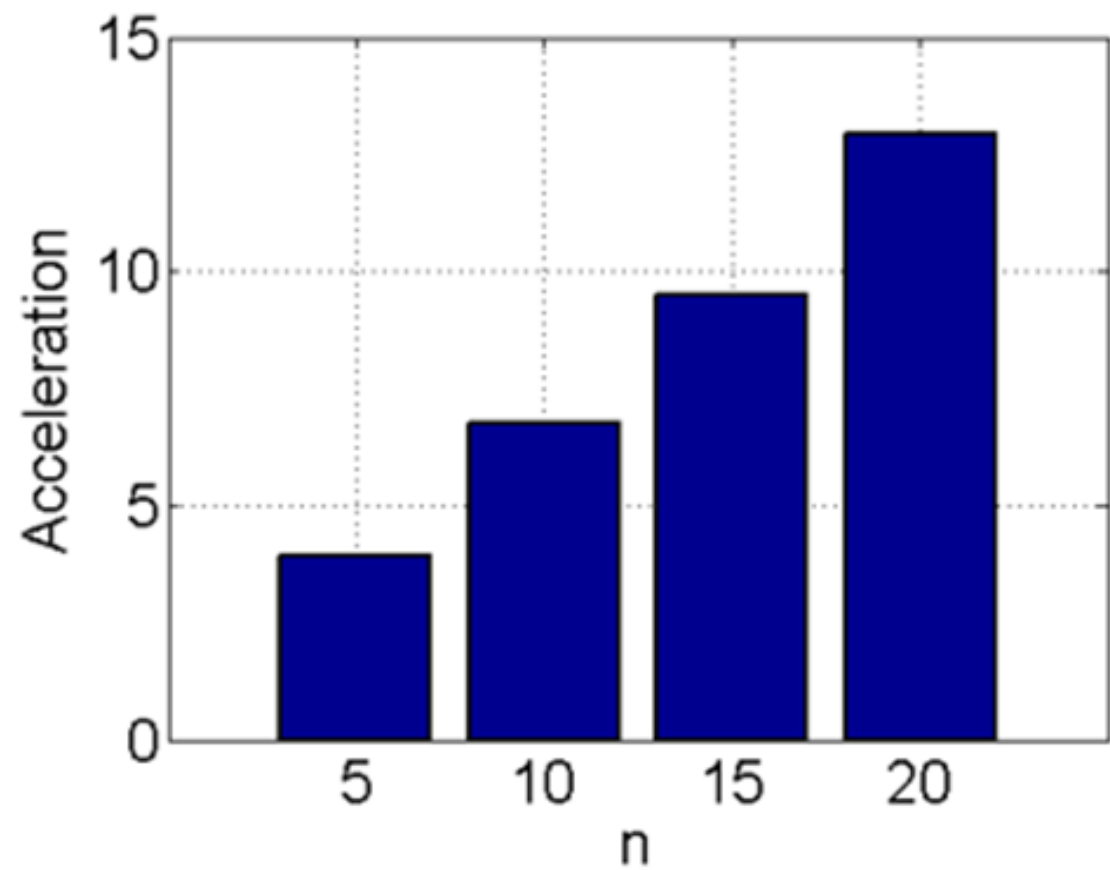


Эволюция температуры (3D)





a



b

Выводы:

- 1) Рассмотрена нестационарная стадия запуска детонационного двигателя с вращающейся детонационной волной. Показано, что установление детонационного режима – неустойчивый процесс, на который существенно влияет состав смеси: наиболее быстрое формирование вращающейся волны наблюдается для бедной смеси.**
- 2) Получена стабильная вращающаяся детонационная волна, при подаче дополнительного кислорода из боковых внутренних и внешних инжекторов.**
- 3) Выход горячих газов происходит примерно через 150 мс (для устройства 10см) для всех рассмотренных вариантах подачи.**
- 4) Выход первой ударной волны происходит через 100 мс (для устройства длиной 10см) для всех рассмотренных вариантах подачи.**



Спасибо за внимание!