

МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИ механики МГУ



Численное моделирование трехмерной вращающейся детонации

В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков

**Международная конференция
«XIII Забабахинские научные чтения»
20 – 24 марта 2017 года, РФЯЦ – ВНИИТФ, г. Снежинск**

Математическая модель. Уравнения трехмерных движений многокомпонентной реагирующей среды

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i w)}{\partial z} = \omega_i,$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(p + \rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(p + \rho w^2)}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial(H - p)}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(Hw)}{\partial z} = 0,$$

$$H = \sum_{i=1}^N \rho_i h_i + \rho \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}.$$

ω_i – скорость изменения ρ_i
за

счет химических реакций,

h_i – энтальпия i -го

компонента,

H – полная энтальпия

энтальпии компонентов от
температуры:

$$h_i = c_{0i} + c_{pi} T$$

Термическое

уравнение состояния:

$$p = \sum_i (\rho_i / \mu_i) R_0 T$$

На твердых стенках

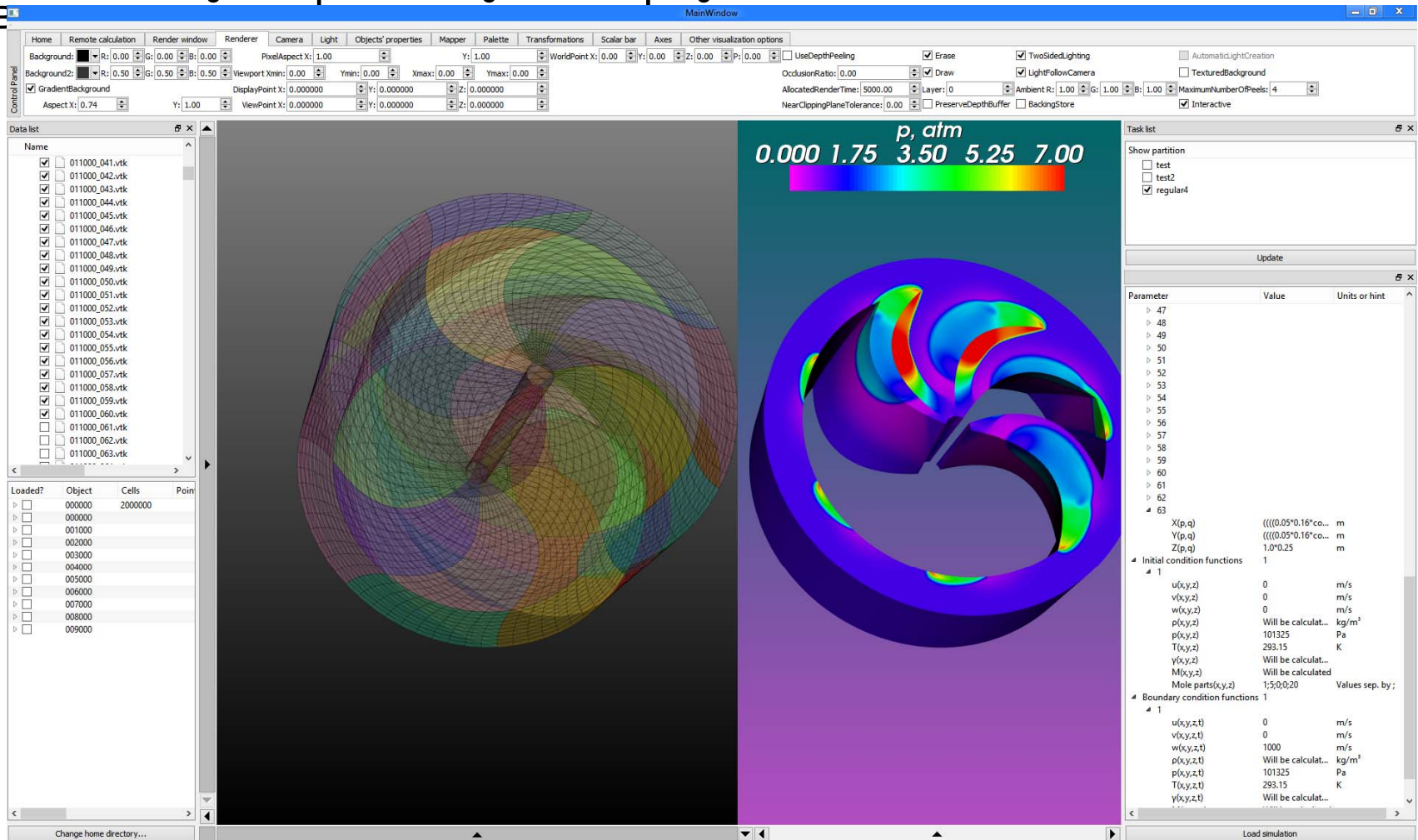
выполняется условие

непротекания: $v_n = 0$

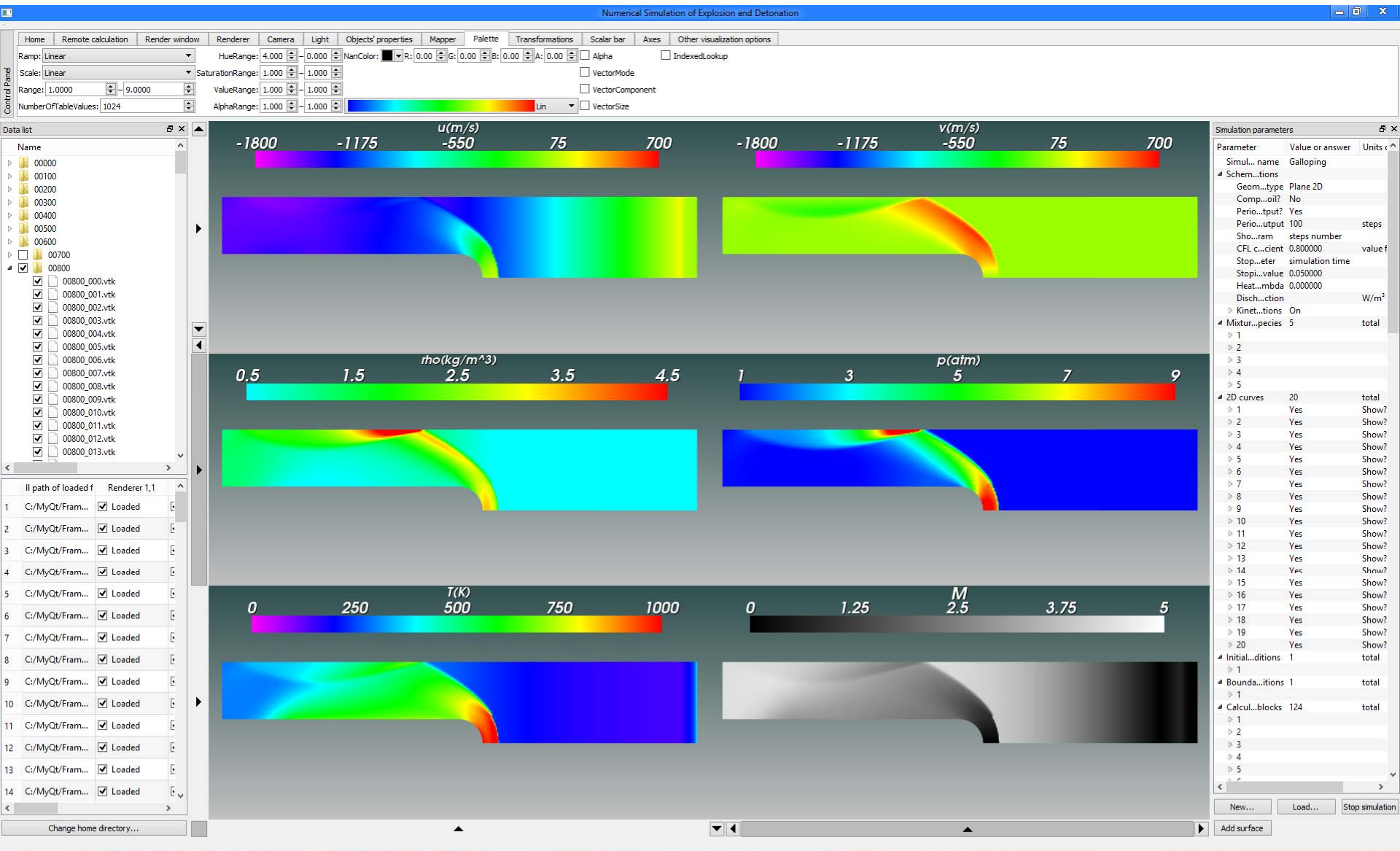
Программный комплекс

Позволяет моделировать 1D, 2D, 3D течения многокомпонентных инертных и реагирующих сред в открытом пространстве, в замкнутых объёмах и каналах со сложной геометрией. Программный комплекс позволяет изучать взрывные и детонационные процессы в газах. Имеет

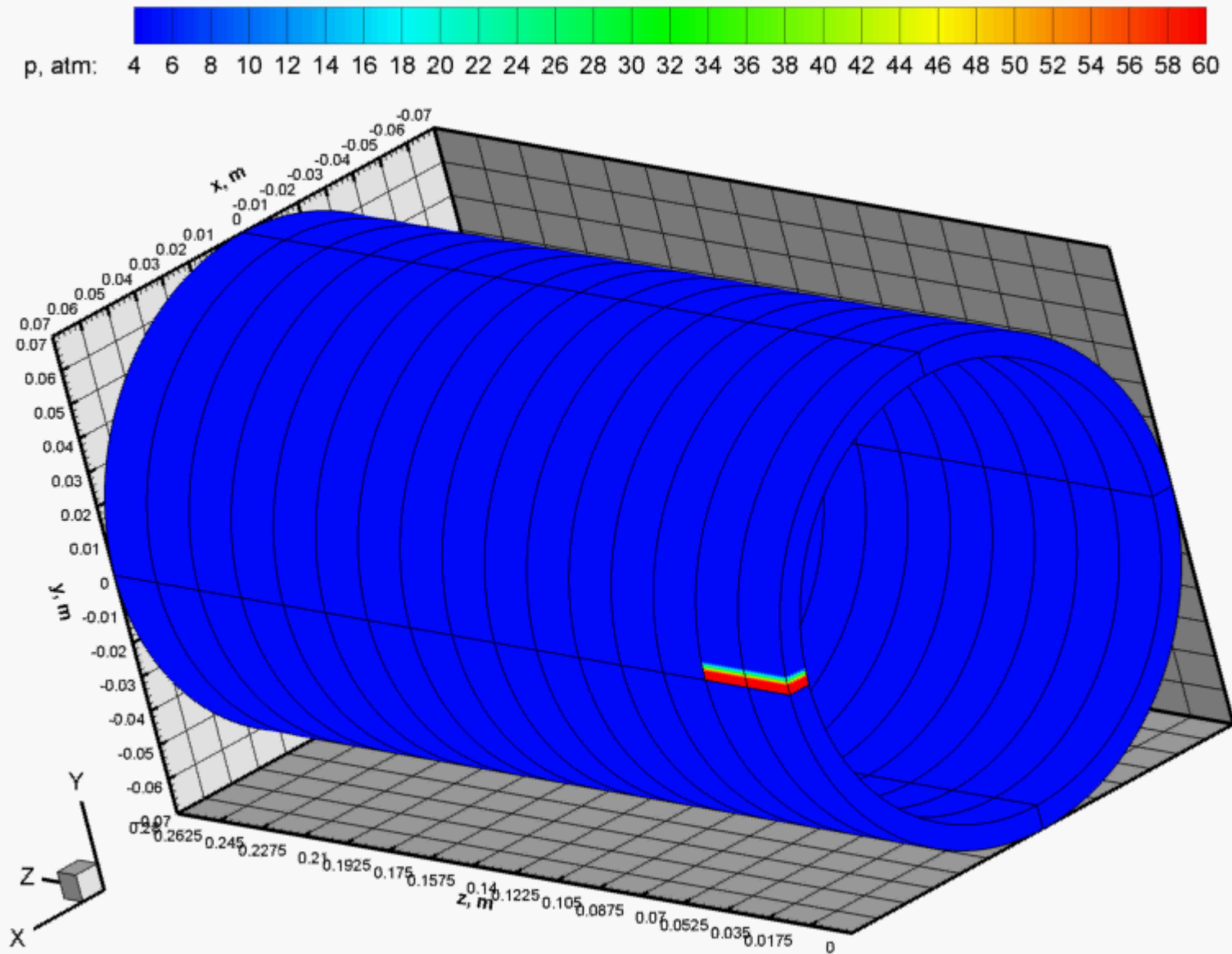
СОЕ



Интерфейс



Трёхмерная вращающаяся детонация



Трёхмерная вращающаяся детонация

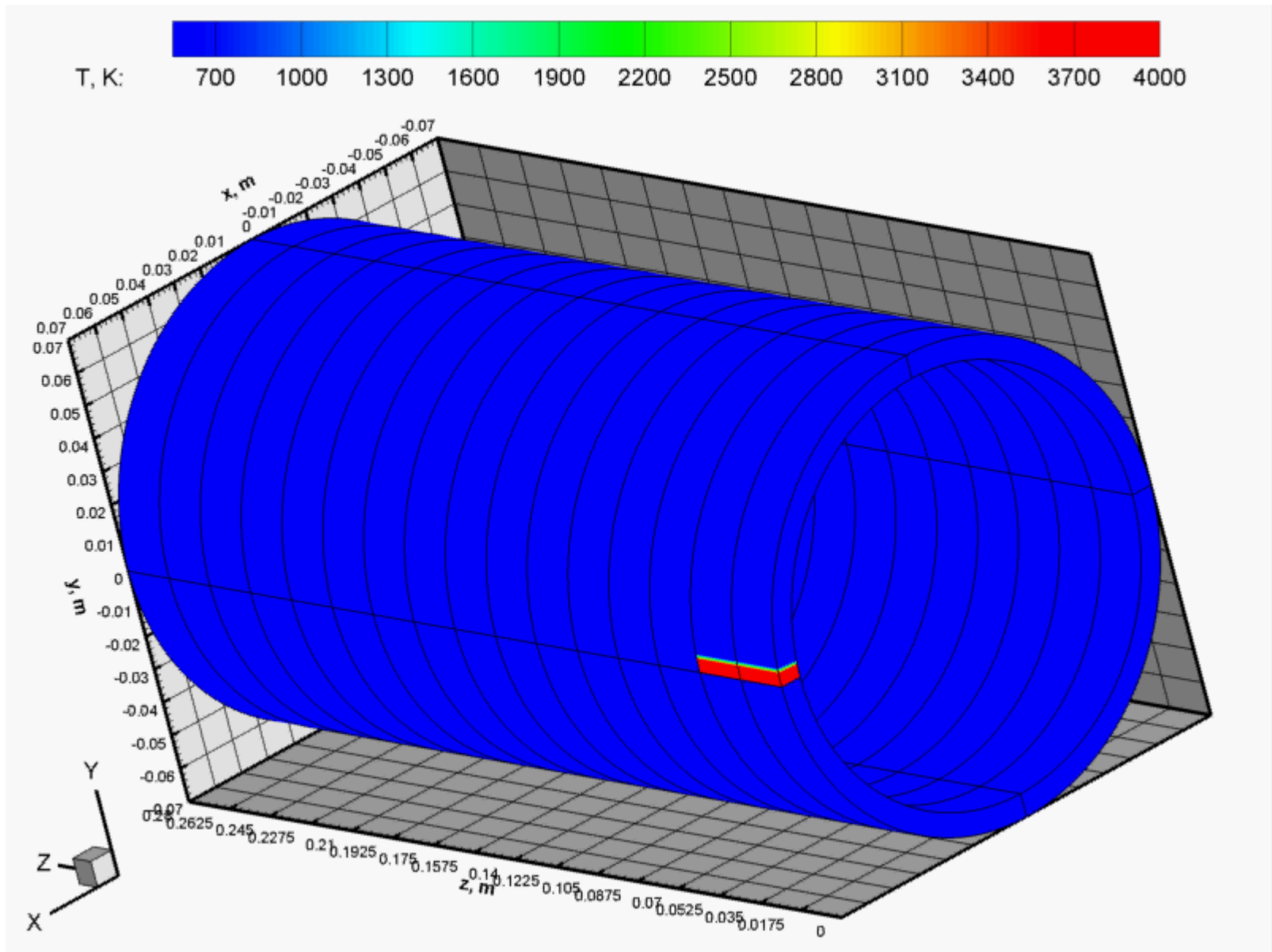
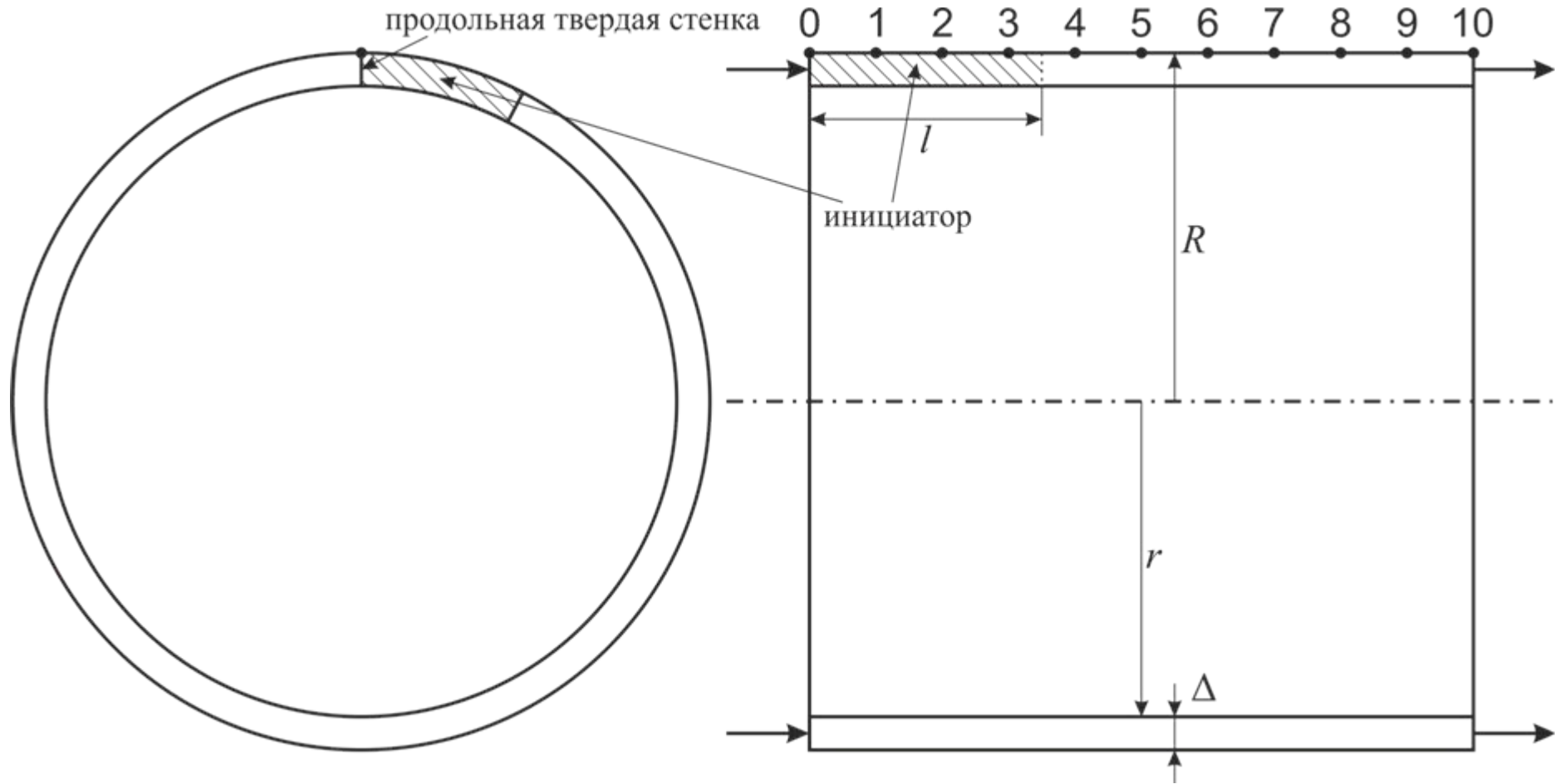


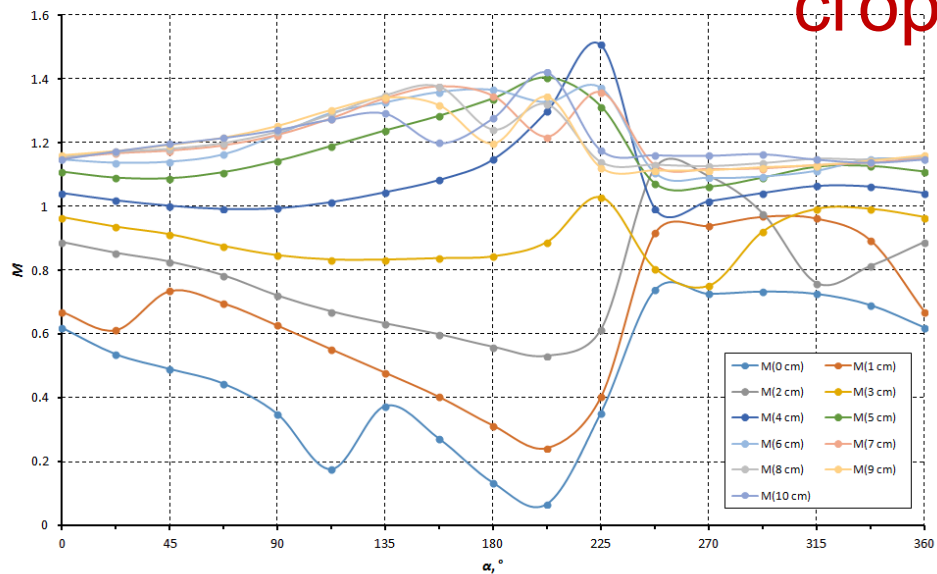
Схема камеры сгорания



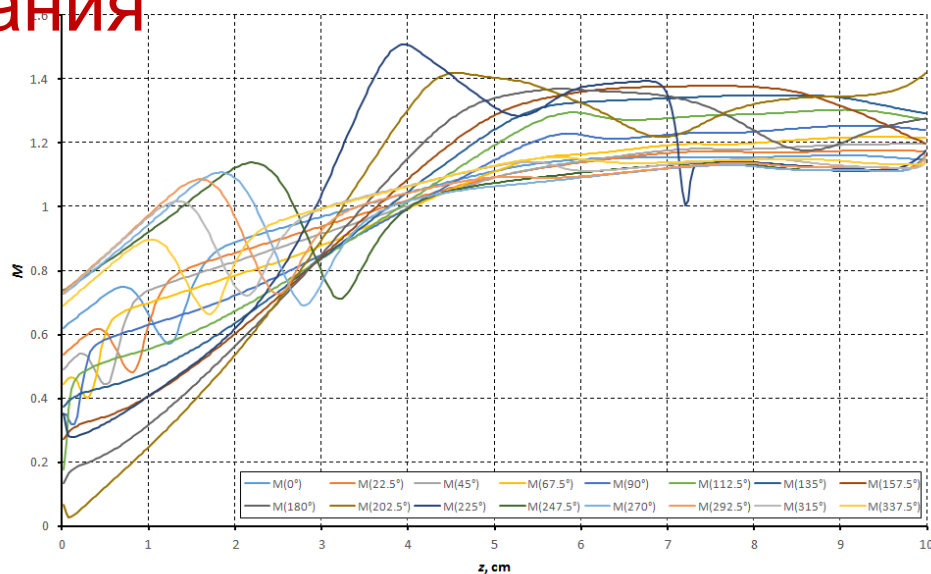
Распределения параметров в сечениях камеры сгорания

сгорания

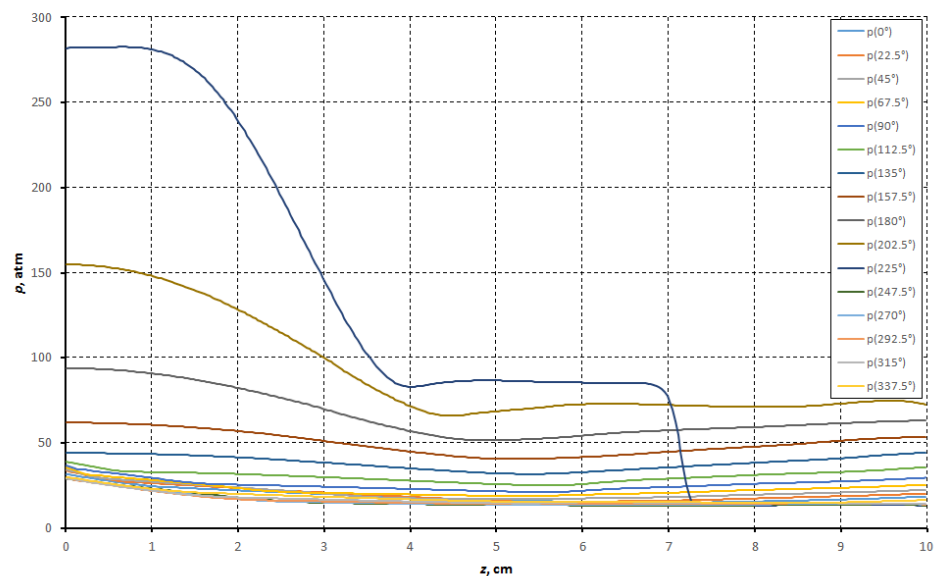
Распределения числа Маха M вдоль различных поперечных сечений $z = 0 - 10$ cm



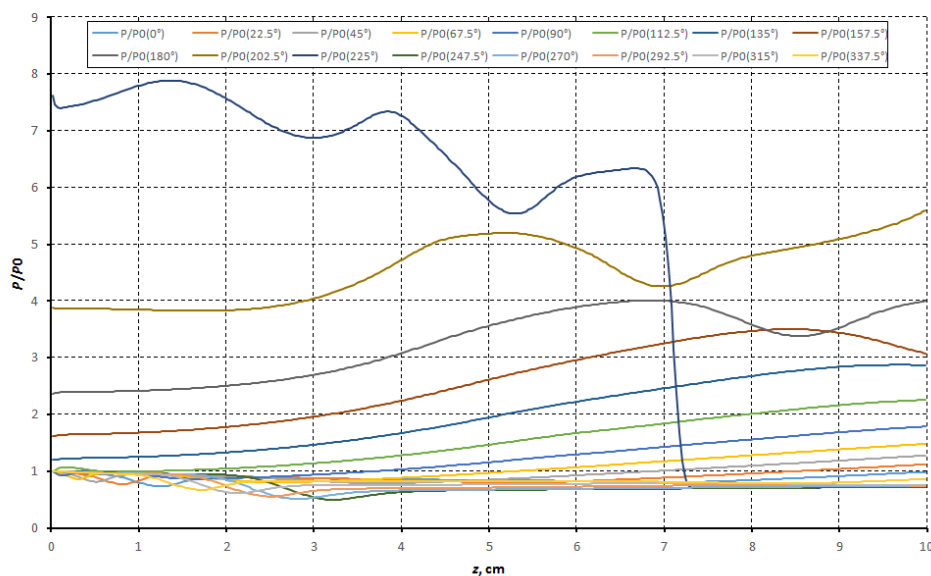
Распределения числа Маха M



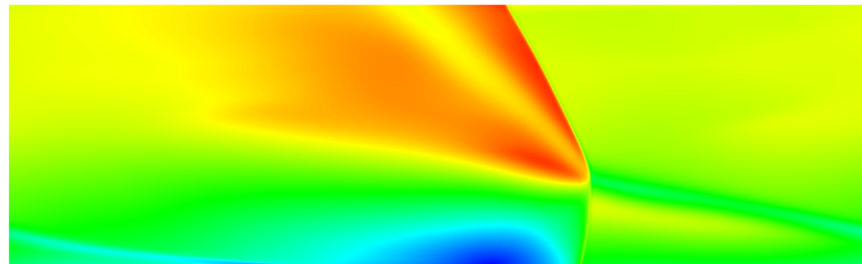
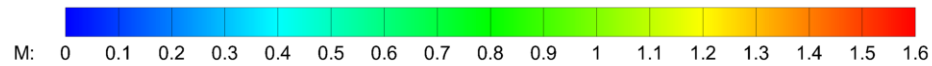
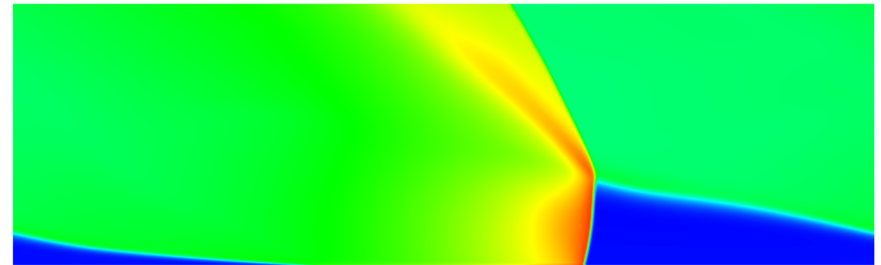
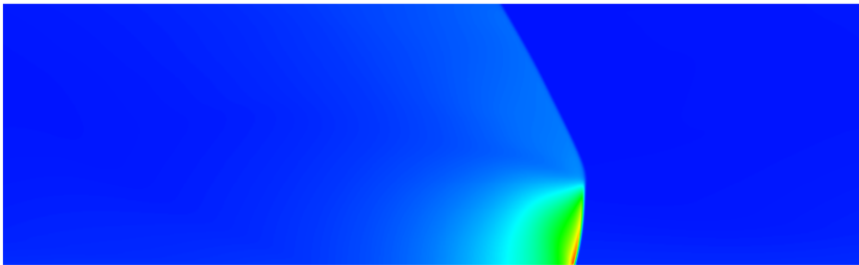
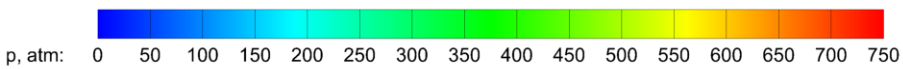
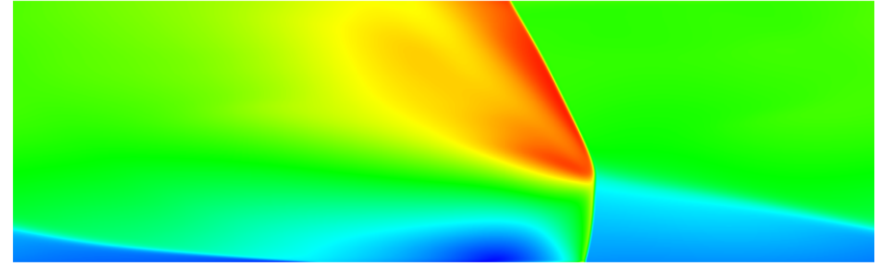
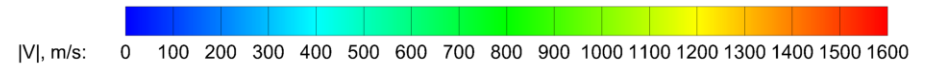
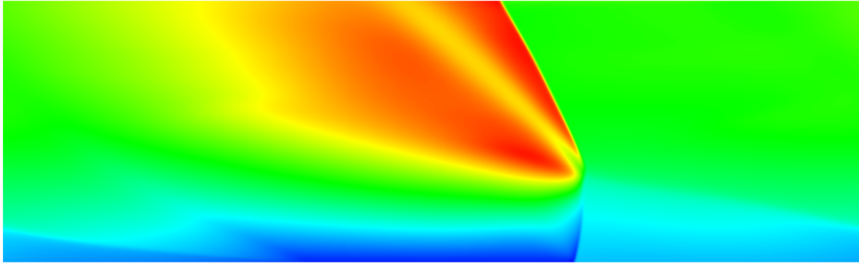
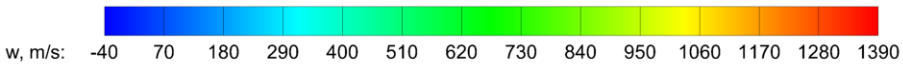
Распределения давления p



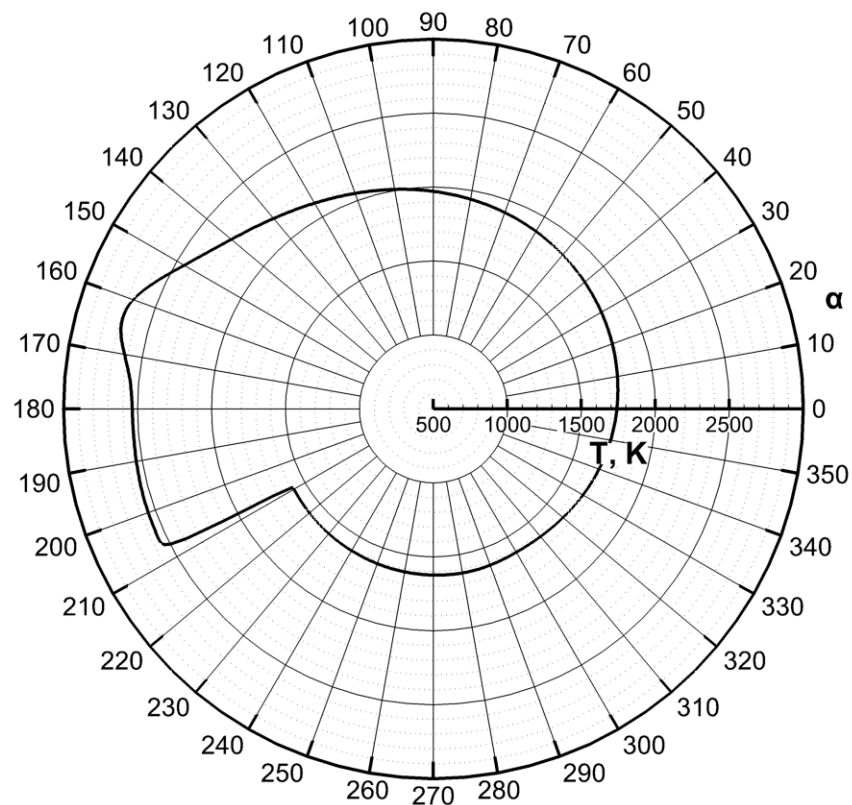
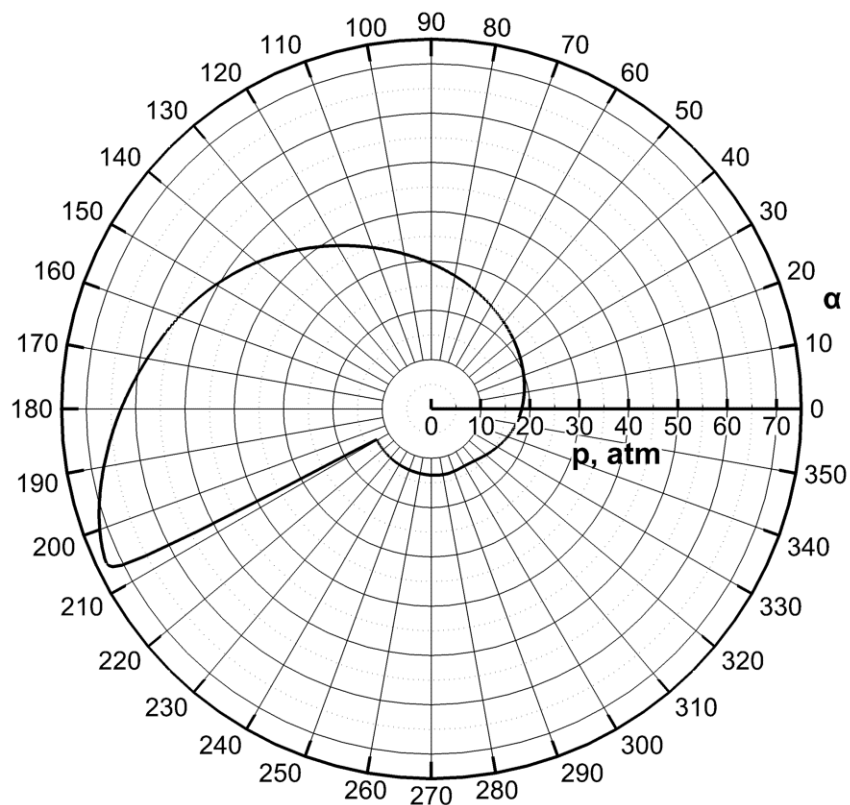
Распределения отношения полного давления P к P_0



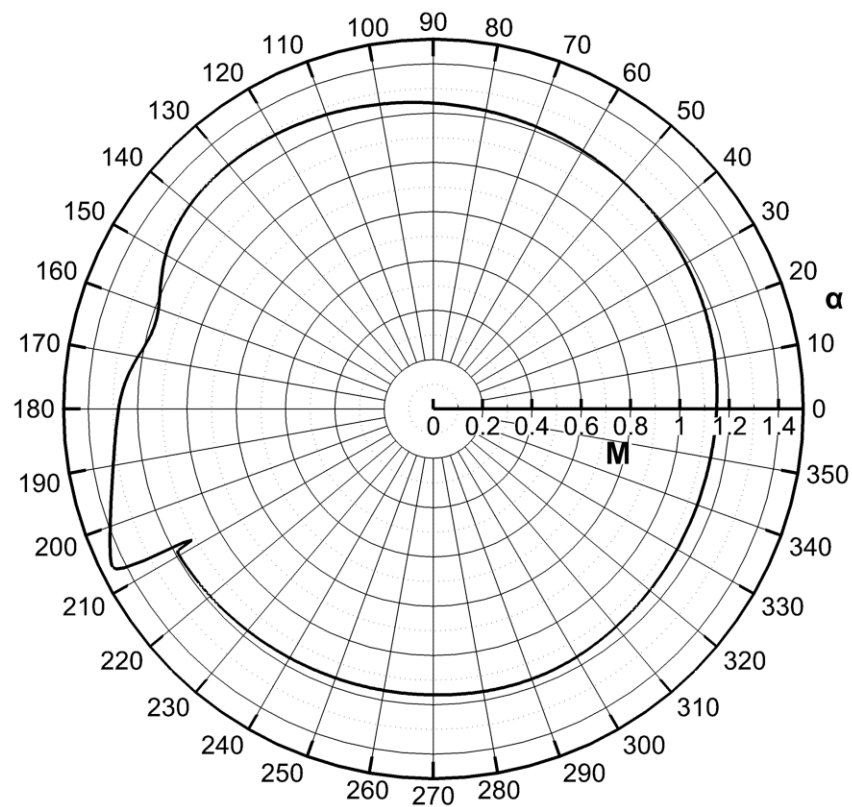
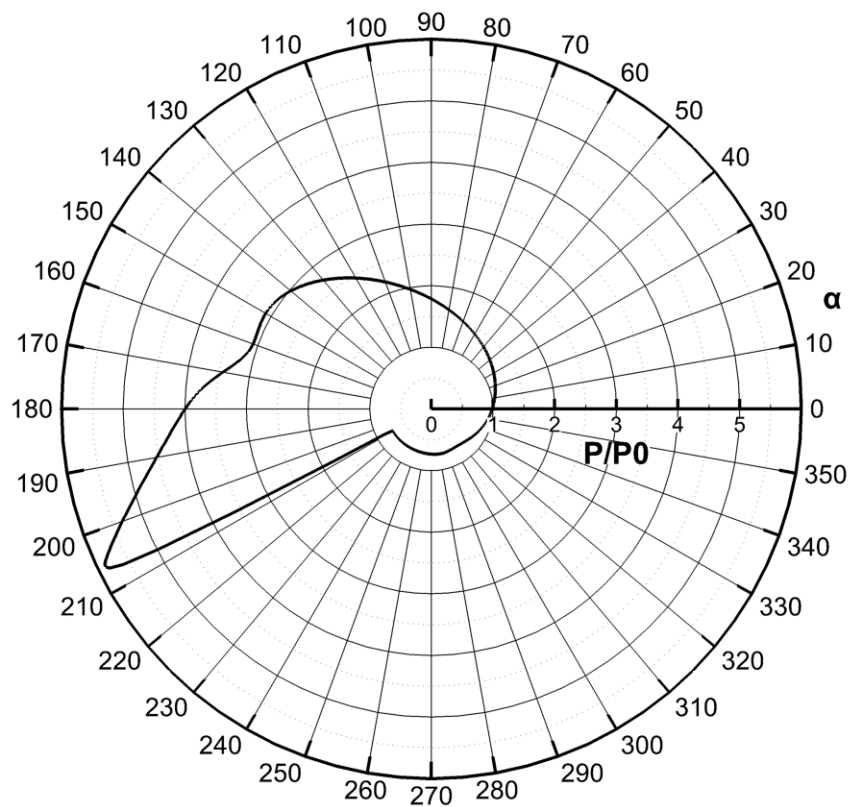
Распределения параметров на боковой поверхности



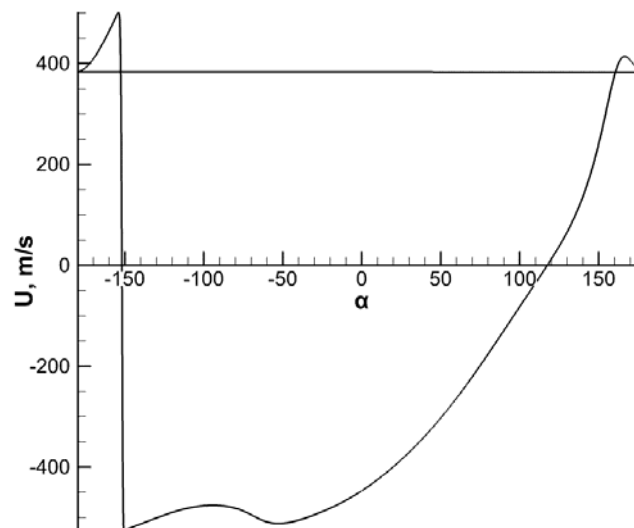
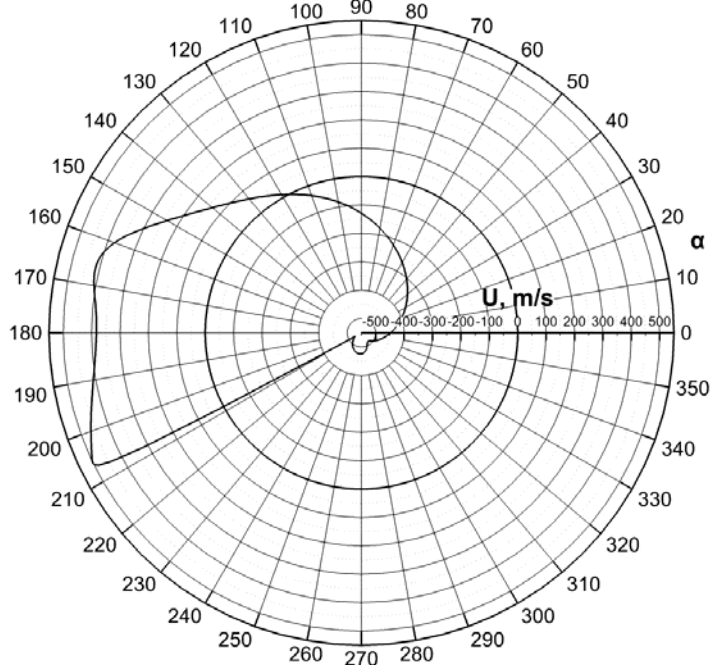
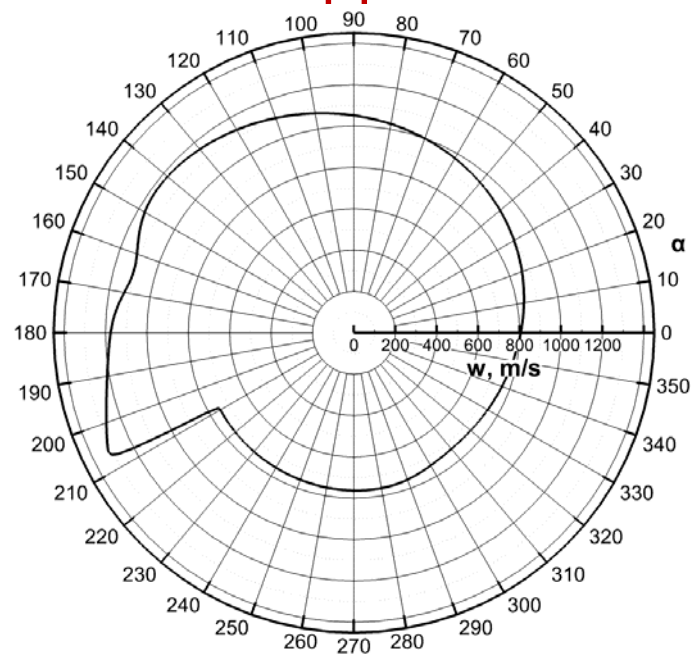
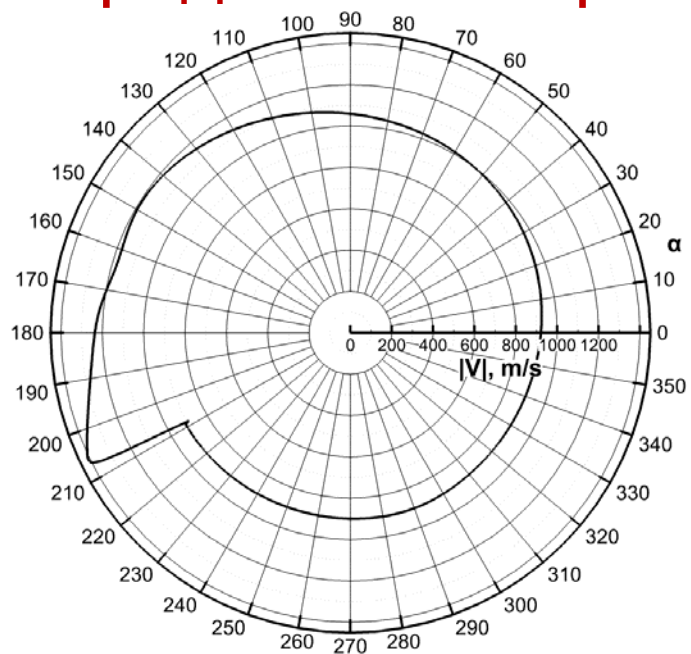
Распределения параметров в выходном сечении

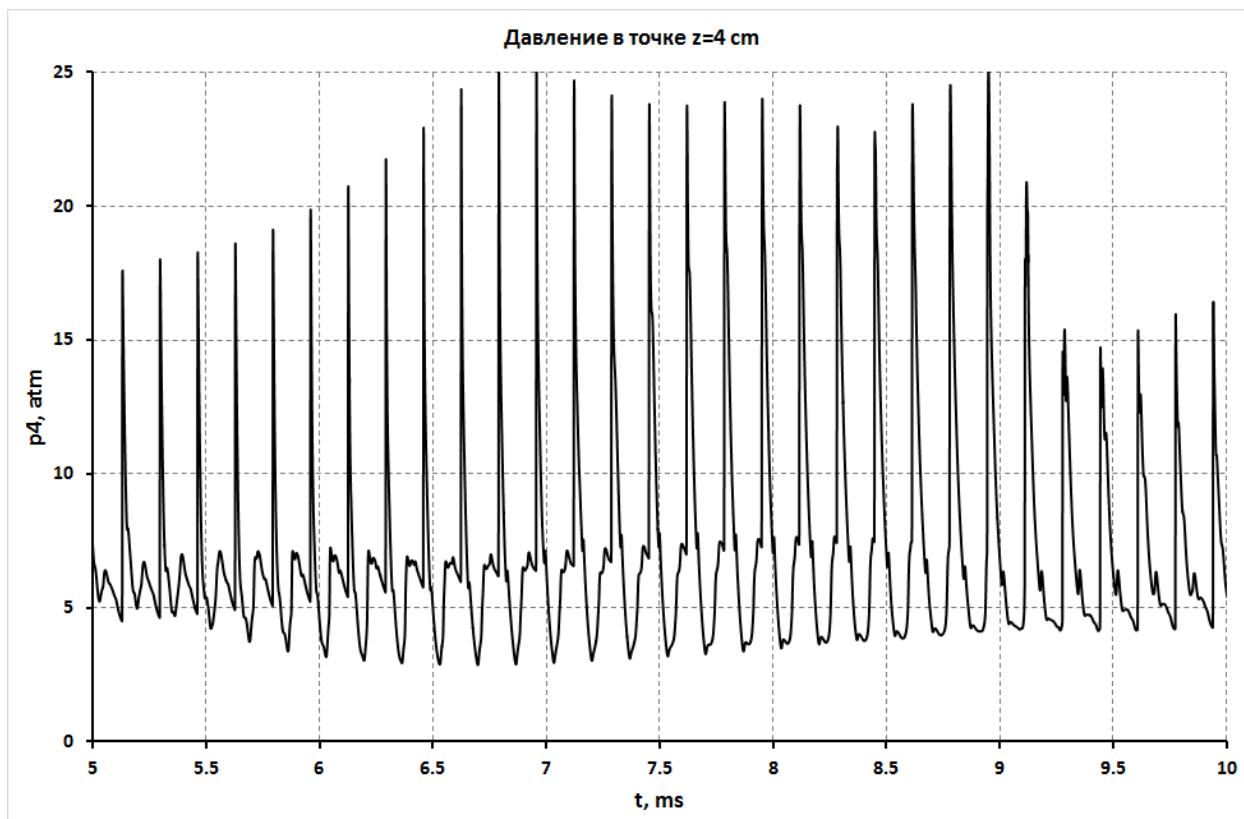


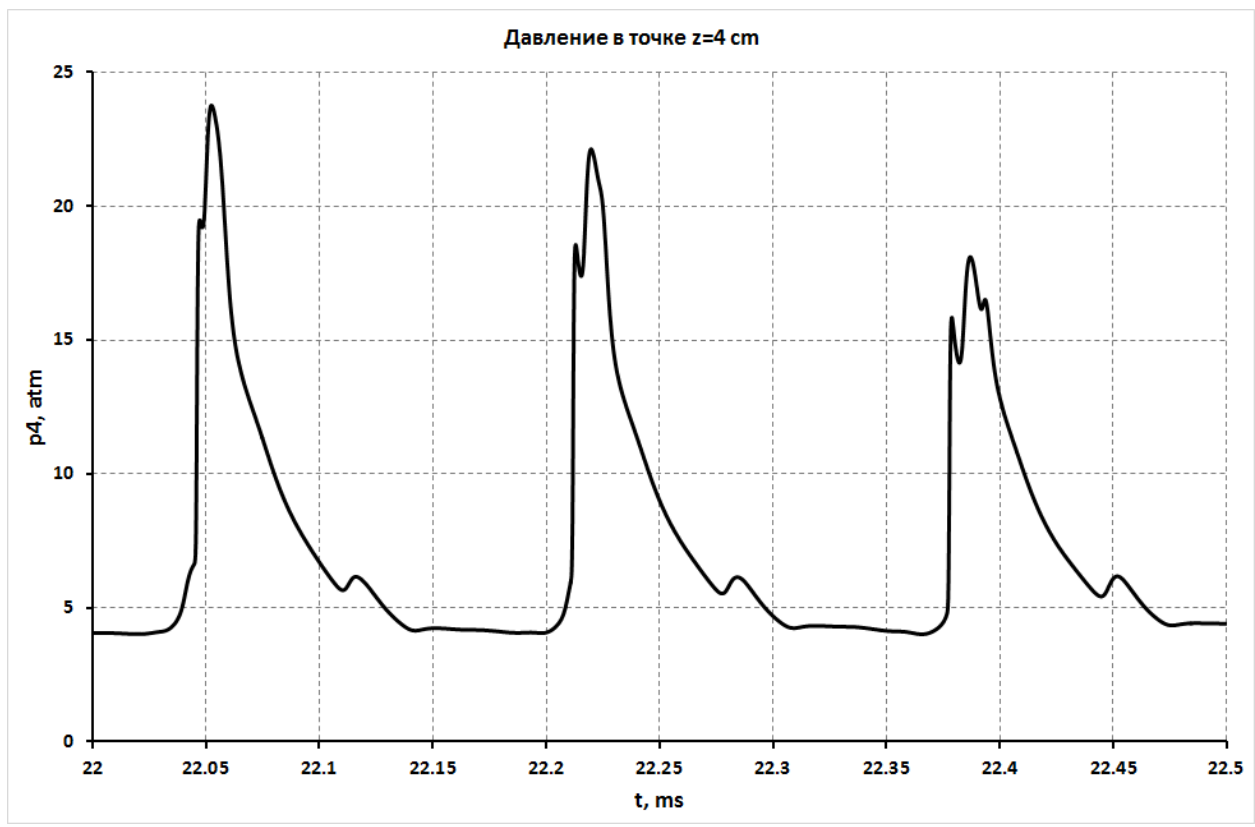
Распределения параметров в выходном сечении

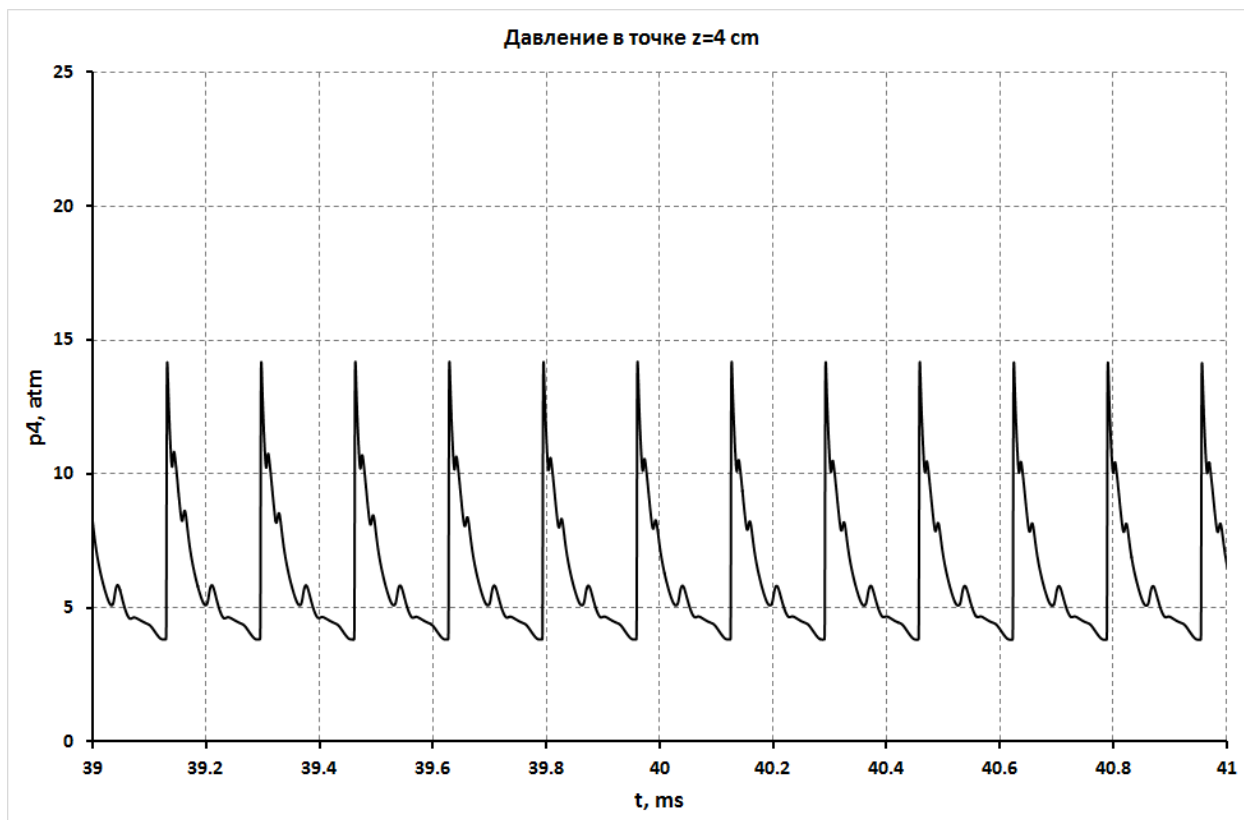


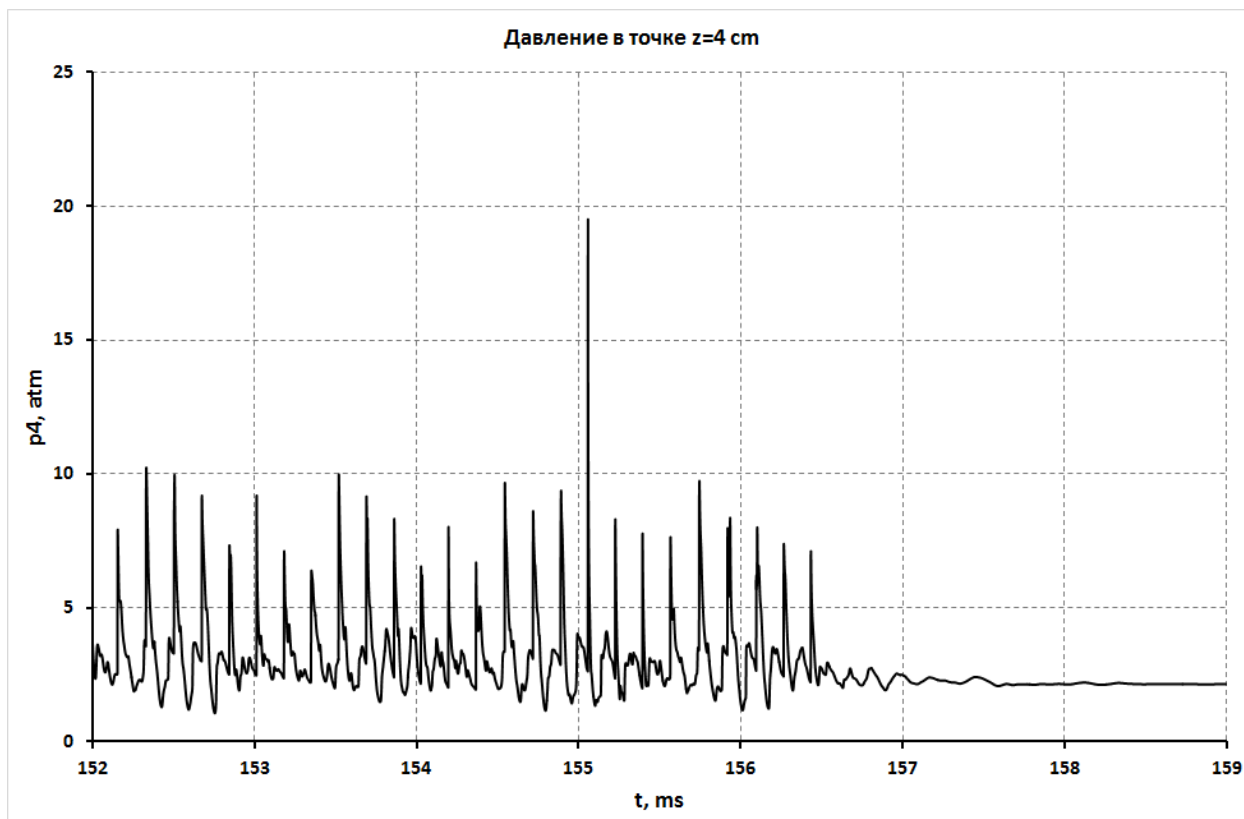
Распределения параметров в выходном сечении







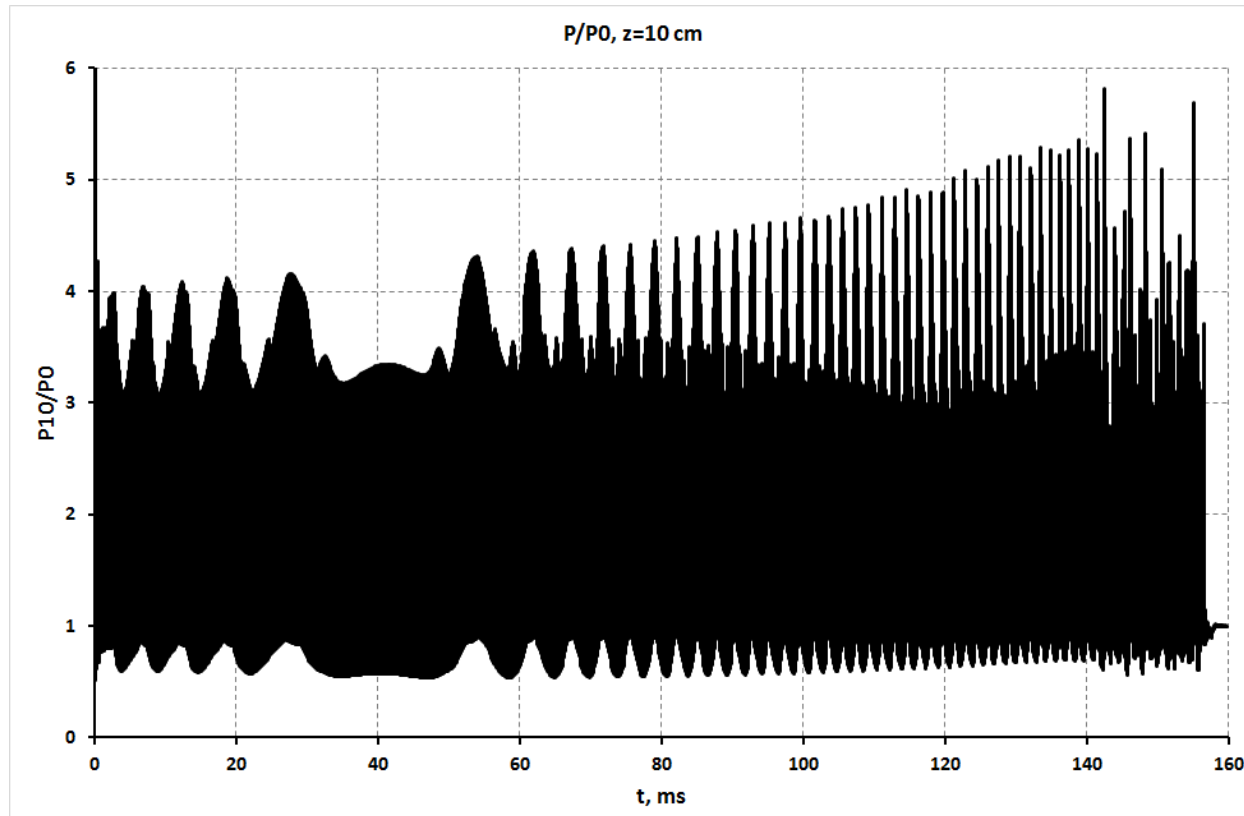




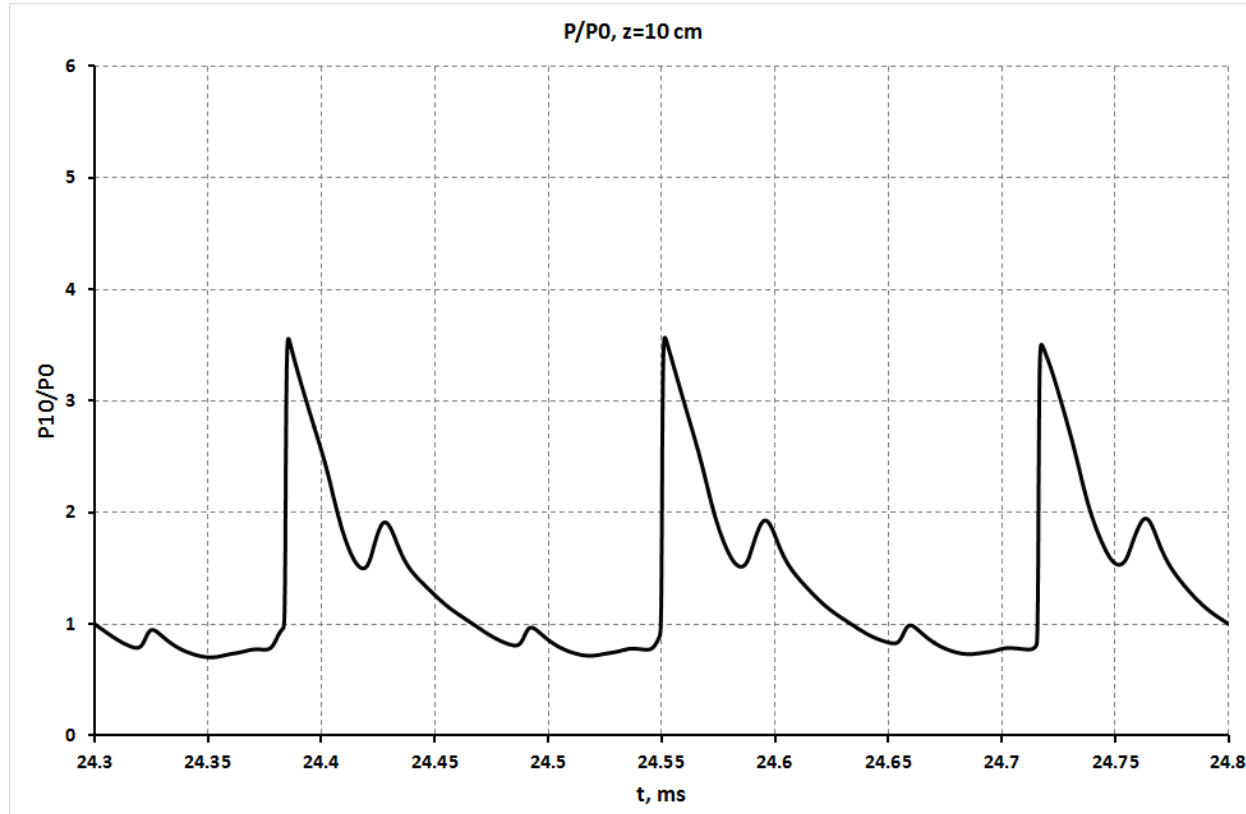
Вращающаяся детонация при переменном давлении торможения

$$P_0 = P_{00} - k_P \cdot t, T_0 = 675 \text{ K}$$

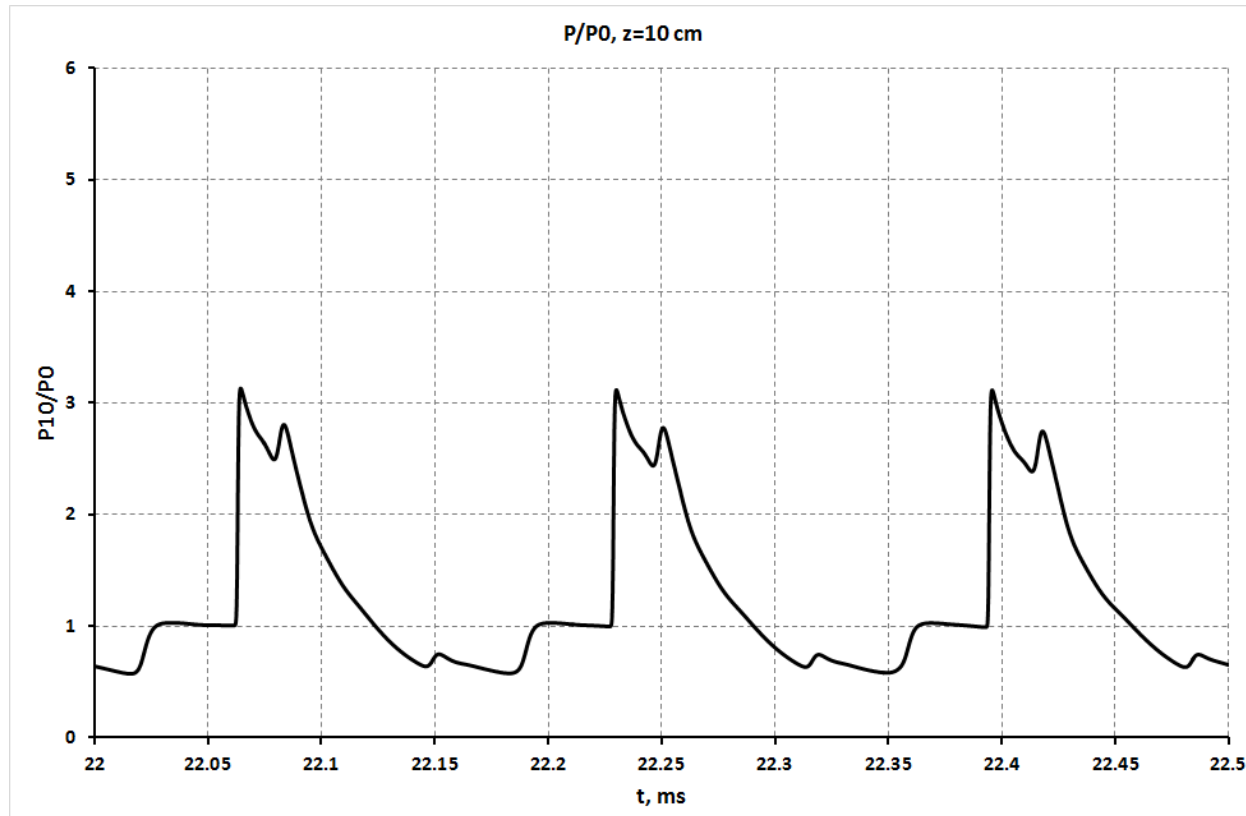
$P_{00} = 4.5 \text{ атм}$, $k_P = 20 \text{ атм/с}$ ($\Delta P = 0.003 \text{ атм} - 0.07\%$ от P_{00} , $P_0[160 \text{ мс}] = 1.3 \text{ атм}$)



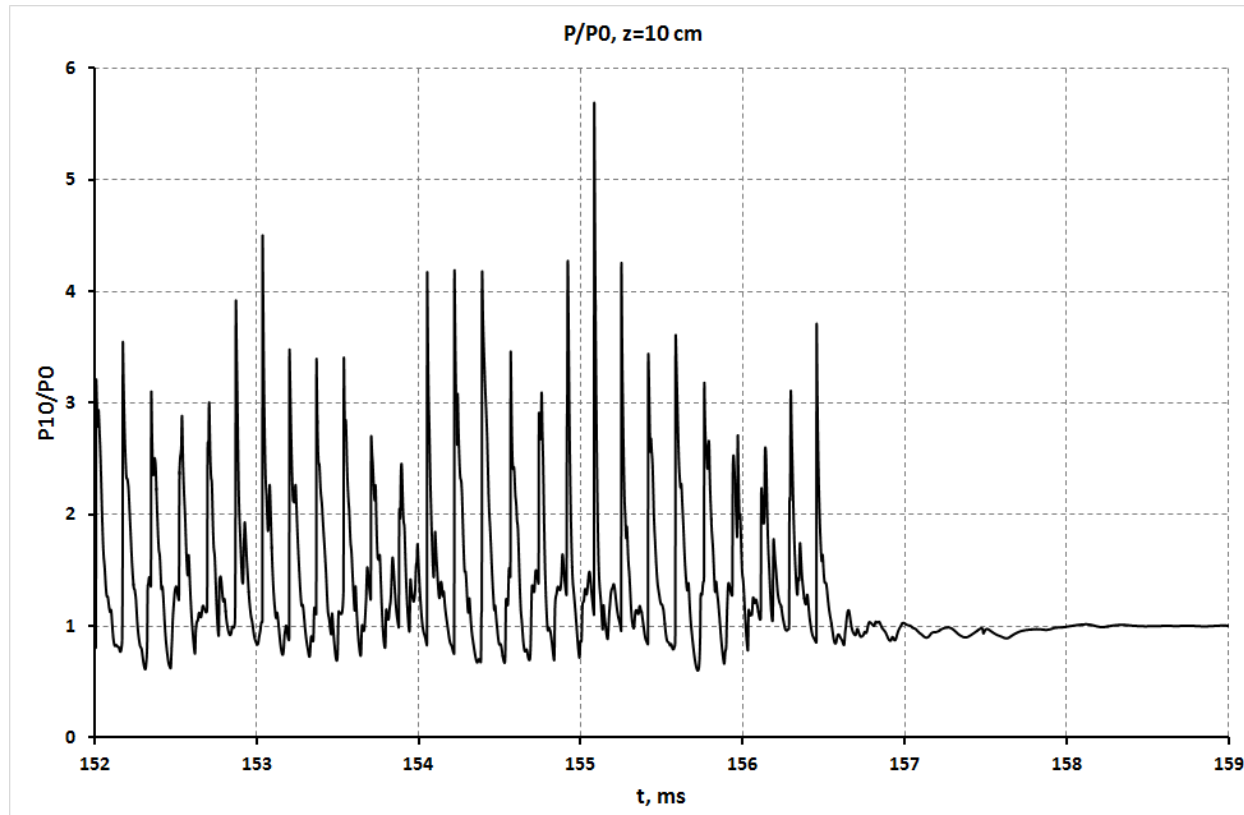
Вращающаяся детонация при переменном давлении торможения



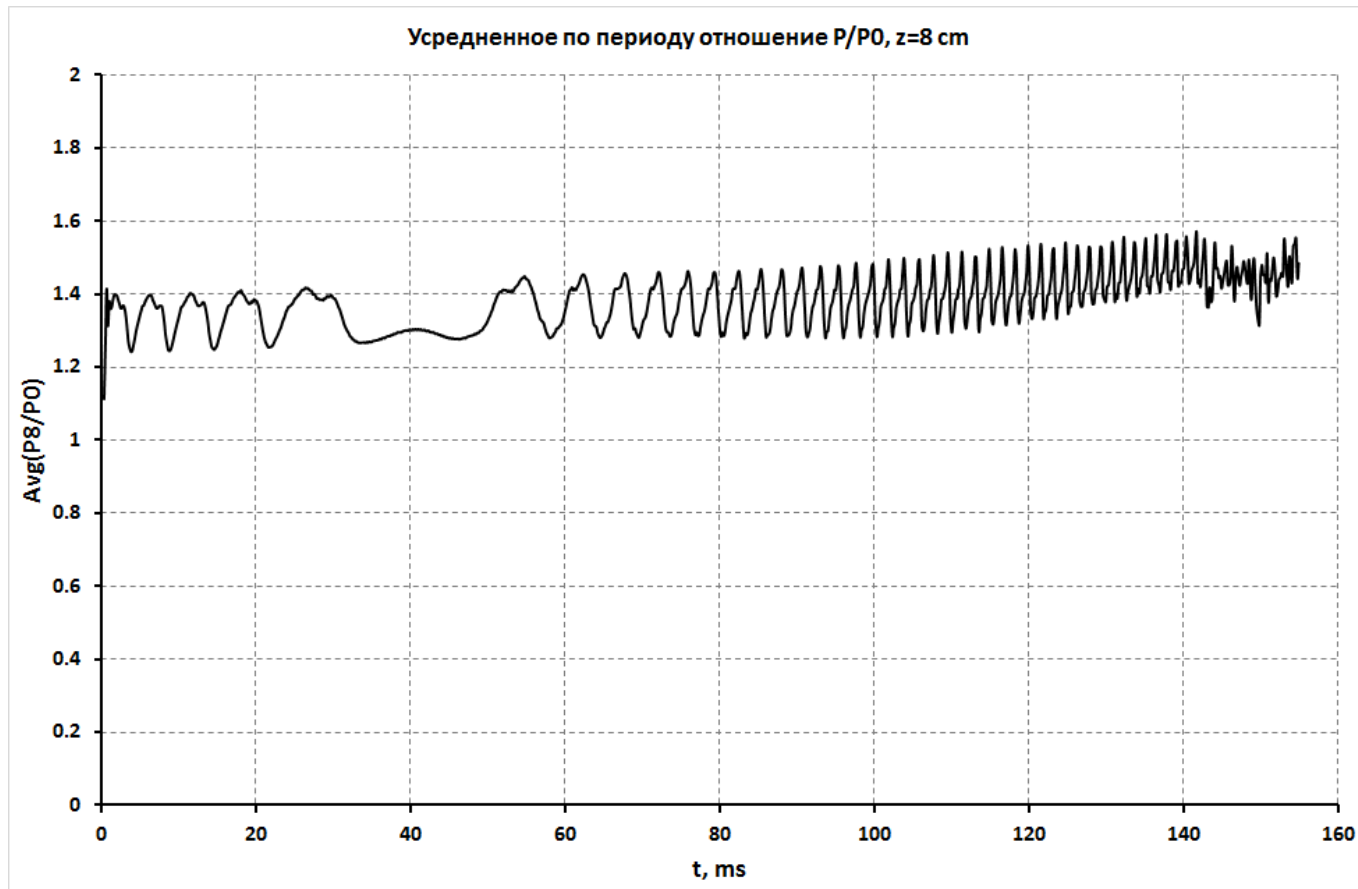
Вращающаяся детонация при переменном давлении торможения



Вращающаяся детонация при переменном давлении торможения



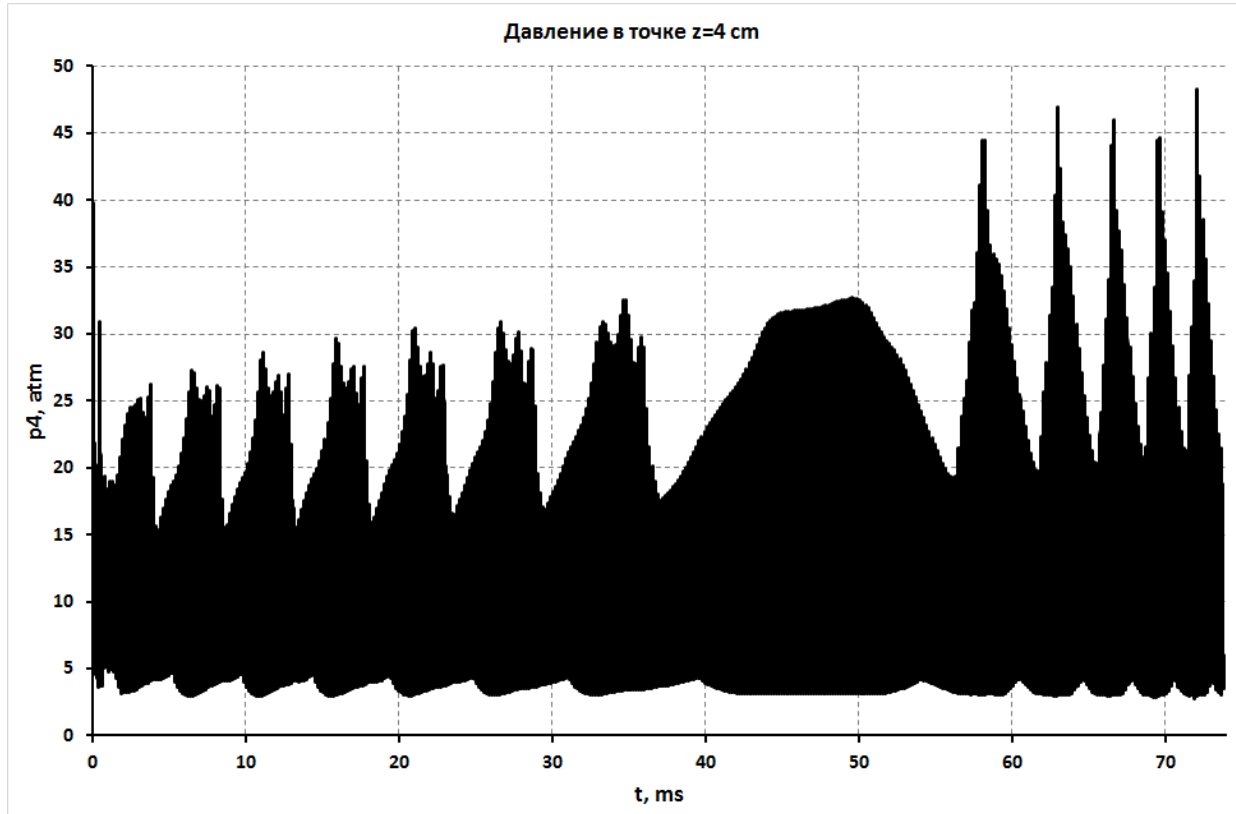
Вращающаяся детонация при переменном давлении торможения



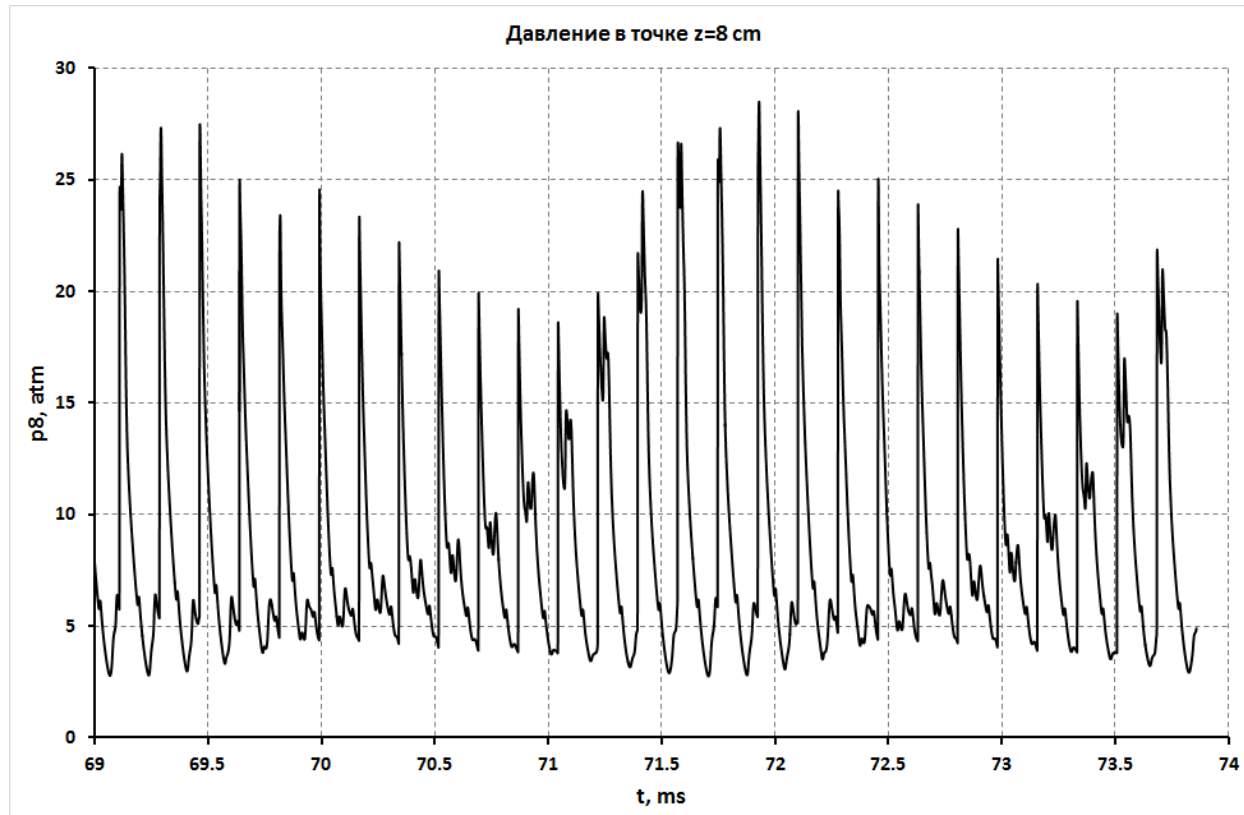
Вращающаяся детонация при переменной температуре торможения

$$T_0 = T_{00} - k_T \cdot t, P_0 = 4.5 \text{ атм}$$

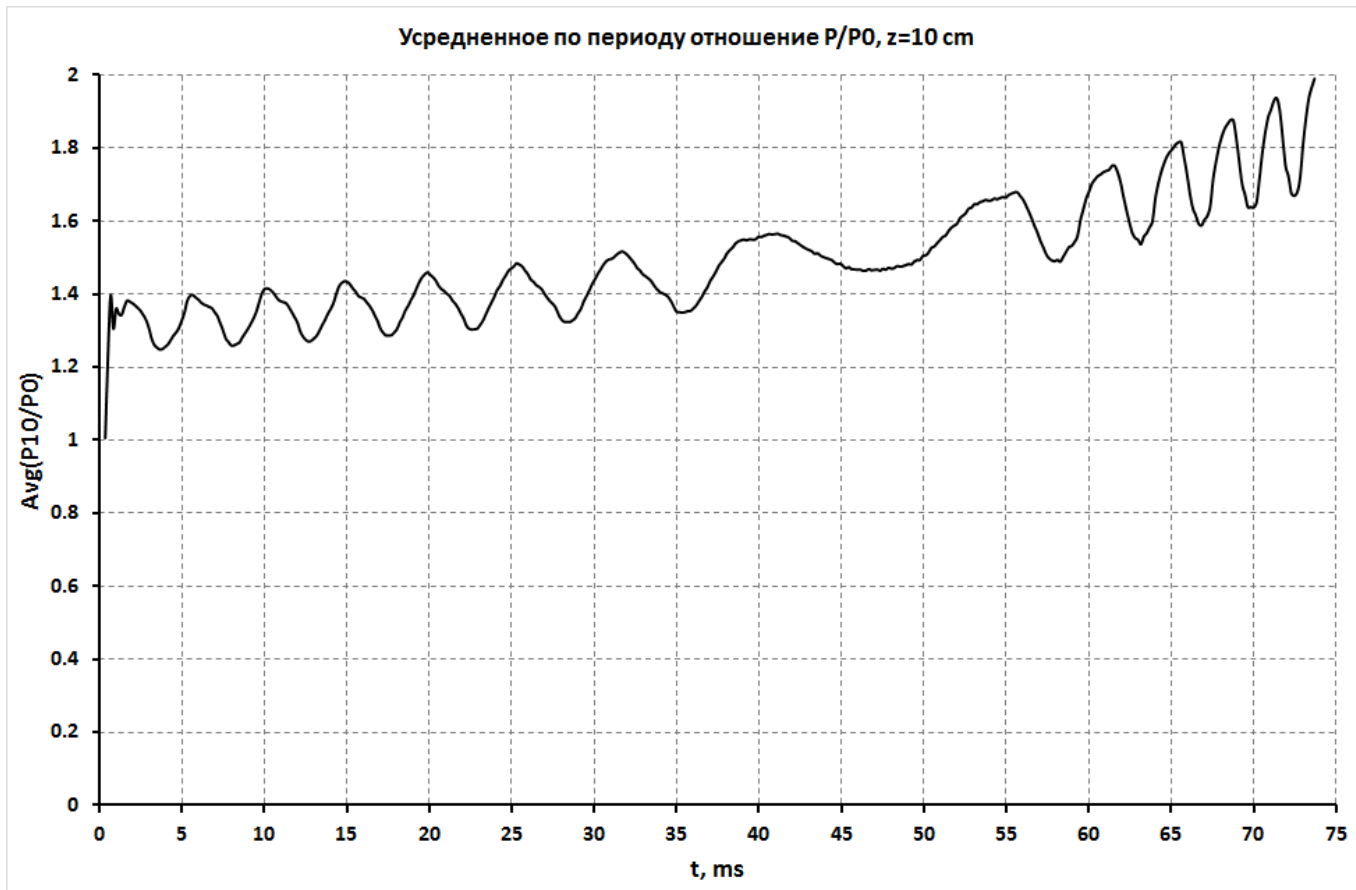
$$T_{00} = 675 \text{ К}, k_T = 6000 \text{ К/с} (\Delta T = 1 \text{ К} - 0.15\% \text{ от } T_{00}, T_0[75 \text{ мс}] = 225 \text{ К})$$



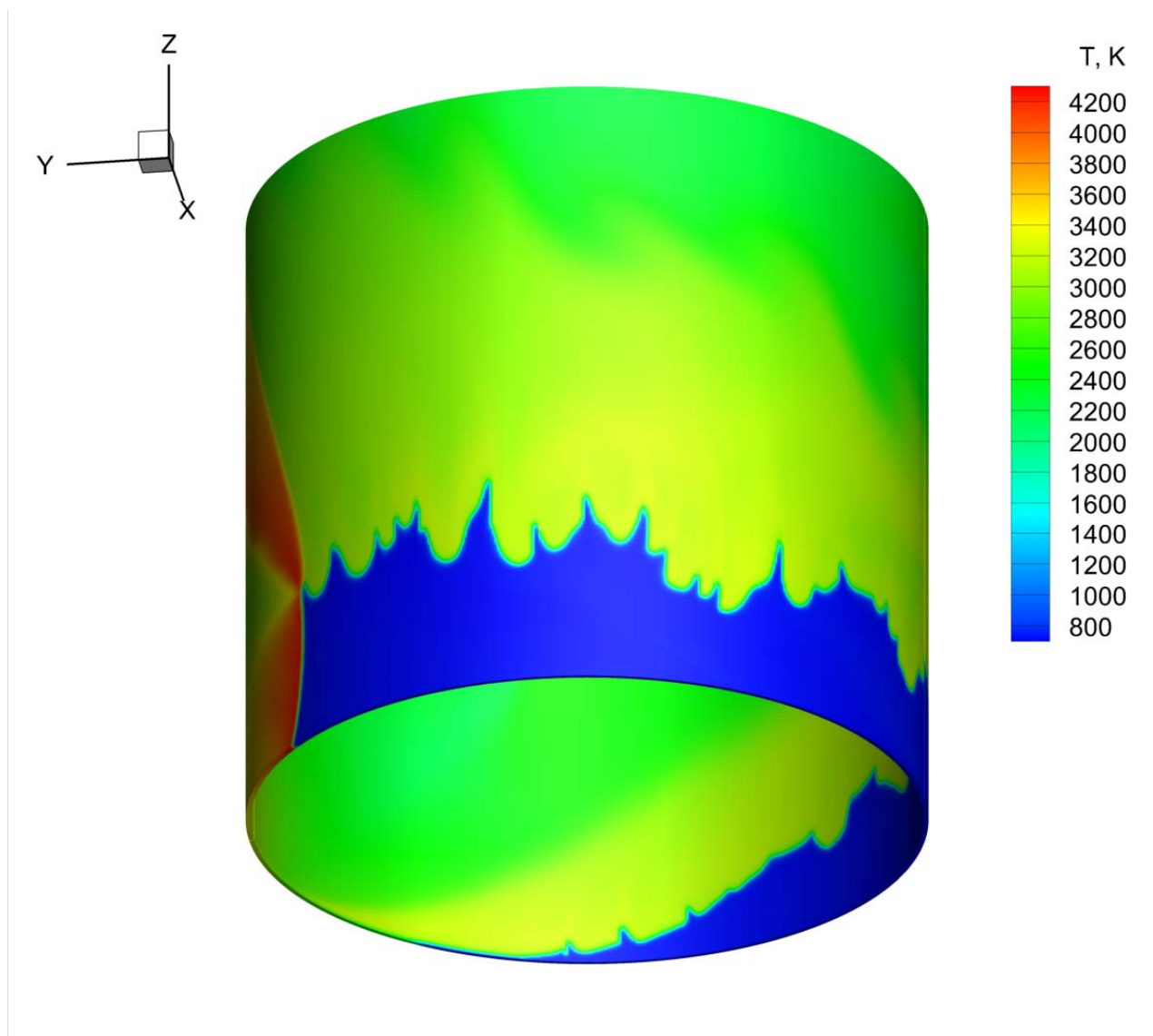
Вращающаяся детонация при переменной температуре торможения



Вращающаяся детонация при переменной температуре торможения



Поле температуры перед срывом вращающейся детонации при некорректно заданных газодинамических параметрах



Спасибо за внимание!