



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Численное моделирование нестационарных детонационных процессов в ударно-волновой трубке с реагирующим веществом - октогеном

19 – 23 мая 2025

Ташланов Владимир Валерьевич, Бегашев Д. В., Ершов А.В.

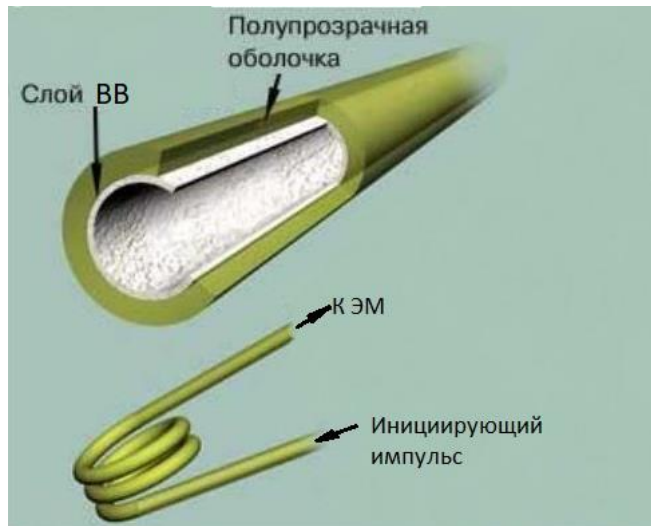


Рис. 1 – Схематическое изображение УВТ неэлектрической системы инициирования [1].

Ударно-волновая трубка (УВТ) является одним из основных элементов неэлектрических систем инициирования, широко применяемых при взрывных работах на земной поверхности, в подземных рудниках и шахтах. УВТ также могут использоваться в системах задействия различных пиротехнических устройств.

Функционально УВТ предназначена для передачи к энергонасыщенному материалу (ЭМ) низкоэнергетического инициирующего импульса в виде детонационной волны.

Рассматриваемая в настоящей работе УВТ (рис. 1) представляет собой пластиковую трубку малого диаметра с нанесенным на внутреннюю поверхность канала трубки тонкого слоя взрывчатого вещества (ВВ) - октогена. С целью оптического контроля навески в ВВ добавляют от 1 до 7 % алюминиевой пудры.

Детонационный процесс в УВТ представляет собой самоподдерживающийся ударный разрыв, за фронтом которого непрерывно инициируются реакции термического разложения октогена в конденсированной и газовой фазах вследствие срыва и нагрева частиц реагента продуктами разложения в ударном фронте.



Процессы перехода от медленного горения - дефлаграции к детонационному режиму горения, детонационные волны и многомерные детонационные структуры, имеющие место в УВТ, являются предметом экспериментальных и численных исследований. С точки зрения математического моделирования большой интерес вызывает явление спиновой детонации, возникающей в УВТ с тонким слоем реагента вблизи детонационных пределов и наблюдаемой, например, в трубках диаметром $2\div 3$ мм с пылевым слоем гексогена [2].

С практической точки зрения при проектировании неэлектрических систем инициирования требуется обеспечивать заданные характеристики и высокую надёжность УВТ, для чего необходимо досконально понимать, как в ней формируются и протекают детонационные процессы. Одним из методов, позволяющих детально на качественном и количественном уровне исследовать нестационарные детонационные процессы в УВТ, является численное моделирование на основе математических моделей многомерных течений химически реагирующих многокомпонентных газовых смесей.

Цель

Проведение вычислительного эксперимента с целью качественного и количественного анализа нестационарных детонационных процессов, протекающих в УВТ с тонким слоем октогена, и установление их основных характеристик и параметров.

Математическое описание многомерных течений химически реагирующих многокомпонентных газовых смесей



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Математическое описание рассматриваемых процессов основывается на уравнениях RANS [3] (Reynolds Averaged Navier-Stokes), уравнении состояния для смеси идеальных газов, модифицированной k - ω модели турбулентности SST (Shear Stress Transport) Ментера [4] и предложенной двухстадийной кинетической модели термического разложения октогена.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}}) = 0; \quad (1)$$

Уравнение сохранения массы компонентов:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\omega}_i}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho}_i \tilde{\omega}_i \tilde{\mathbf{v}}) + \text{div}(\overline{\rho \mathbf{v}'' \omega_i''} - \overline{D_i^M \rho \text{grad } \omega_i}) = \overline{M_i w_i}; \quad (2)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \otimes \tilde{\mathbf{v}}) + \text{div}(\bar{\bar{p}} + \overline{\rho \mathbf{v}'' \otimes \mathbf{v}''}) = \bar{\rho} \bar{\mathbf{g}}; \quad (3)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \text{div}(\overline{\rho \mathbf{v}'' h''} - \overline{\lambda \text{grad } T}) + \bar{\bar{p}} : \text{grad } \tilde{\mathbf{v}} - \text{div}(\bar{p} \tilde{\mathbf{v}}) = - \sum_{r=1}^R \overline{v_r \Delta H_{298,r}^\circ w_r}; \quad (4)$$

3. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р., Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. Г. Л. Агафонова. Под. Ред. П. А. Власова. М.: Изд-во ФИЗМАИЛИТ, 2003. – 352 с.

4. Menter F. R., Kuntz M., Lantry R. Ten years of experience with the SST turbulent model // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4. Ed. by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. Begell House Inc, 2003.



Уравнение состояния:

$$\bar{p} = R \sum_{i=1}^S M_i^{-1} (\bar{\rho} \tilde{\omega}_i \tilde{T} + \overline{\rho \omega_i T''}). \quad (5)$$

Компоненты $\overline{\rho u_i'' u_j''}$, $\overline{\rho u_j'' \omega_i''}$ и $c_p \overline{\rho u_j'' T''}$ тензоров напряжений Рейнольдса $\overline{\rho \mathbf{v}'' \otimes \mathbf{v}''}$, $\overline{\rho \mathbf{v}'' \omega_i''}$ и $\overline{\rho \mathbf{v}'' h''}$ в уравнениях (2) - (4) связаны со средними параметрами течения соотношениями:

$$\overline{\rho u_i'' u_j''} = -\mu_T \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\mu_T \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + \bar{\rho} \tilde{k} \right); \quad (8)$$

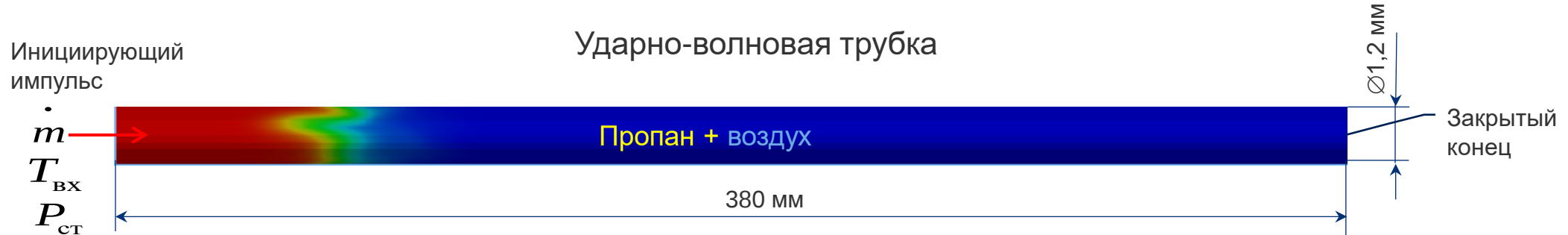
$$\overline{\rho u_j'' \omega_i''} = -D_T \bar{\rho} \frac{\partial \tilde{\omega}_i}{\partial x_j}; \quad c_p \overline{\rho u_j'' T''} = -\lambda_T \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}, \quad (9)$$

где μ_T – турбулентная (вихревая) вязкость по Брэдшоу [4]: $\mu_T = \frac{a_1 \bar{\rho} \tilde{k}}{\max(a_1 \tilde{\omega}, \sqrt{\tilde{S}^2 F_2})}$.

Модель турбулентности SST включает уравнения переноса турбулентной кинетической энергии k и удельной скорости диссипации турбулентной кинетической энергии ω :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{k}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \tilde{k}) - \text{div}[(\mu + \sigma_k \mu_T) \text{grad} \tilde{k}] = \tilde{P}_k - \beta^* \bar{\rho} \tilde{k} \tilde{\omega}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\omega}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \tilde{\omega}) - \text{div}[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \text{grad} \tilde{\omega}] = \gamma \frac{\bar{\rho}}{\mu_T} \tilde{P}_k - \beta \bar{\rho} \tilde{\omega}^2 + (1 - F_1) D_{k\omega}. \quad (11)$$



Уравнения RANS + уравнение состояния для смеси идеальных газов + $k-\omega$ модель турбулентности SST Ментера (2003) + кинетическая модель горения стехиометрической пропано-воздушной смеси. Автоматический выбор пристеночной функции ALL+.

Численная схема С. К. Годунова: для вычисления конвективных потоков на гранях ячейки используется решение задачи Римана о распаде произвольного разрыва. Линейная реконструкция решения на каждой грани ячейки (шаблон 2-го порядка точности).

Решатель: явная схема 1-го порядка точности по времени.

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_{г,0} &= 298,15 \text{ К}; P_{г,0} = 101325 \text{ Па}; \\ \omega_{C_3H_8,0} &= 0,06; \omega_{O_2,0} = 0,22; \omega_{N_2,0} = 0,72; \\ V_0 &= (0,0,0); k_0 = 0; \omega_0 = 0; I_0 = 0,01. \end{aligned}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{На входе: } \dot{m}_{вх} &= 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с } (1 \cdot 10^{-4} \text{ с}); T_{вх} = 2936,3 \text{ К}; \\ V_{вх} &= (0,0,0); I_{вх} = 0,01. \\ \text{На стенке: } u_n &= 0; u_\tau = 0; \frac{\partial f}{\partial n} = 0, \text{ где } f: \omega_i, T, P, k, \omega. \end{aligned}$$



Химические реакции горения стехиометрической пропан-воздушной смеси моделируются одностадийной (глобальной) аррениусовской кинетикой [5]:



Скорость изменения молярной концентрации пропана:

$$w_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{\partial [\text{C}_3\text{H}_8]}{\partial t} = -k[\text{C}_3\text{H}_8][\text{O}_2], \text{ моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}), \quad (12)$$

где константа скорости химической реакции горения пропана:

$$k = 7 \cdot 10^8 P^{-0,2264} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с}); \quad (13)$$

$[\text{C}_3\text{H}_8]$, $[\text{O}_2]$ – молярные концентрации пропана и кислорода в смеси соответственно, моль/м³; P – давление в атмосферах; T – термодинамическая температура, К; $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); $E = 190,3 \cdot 10^3$ – энергия активации, Дж/моль.

Скорости изменения молярной концентрации остальных компонентов:

$$w_{\text{O}_2} = 5w_{\text{C}_3\text{H}_8}; w_{\text{N}_2} = 0; w_{\text{CO}_2} = -3w_{\text{C}_3\text{H}_8}; w_{\text{H}_2\text{O}} = -4w_{\text{C}_3\text{H}_8}. \quad (14)$$

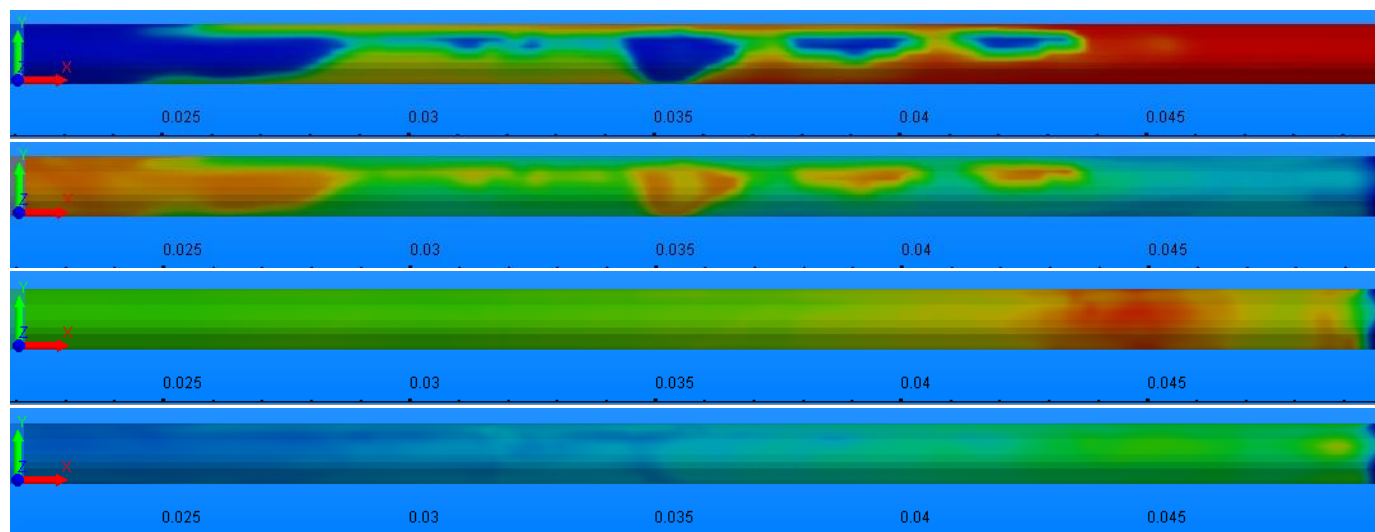
Валидация аэрогидродинамического модуля ПК «ЛОГОС»



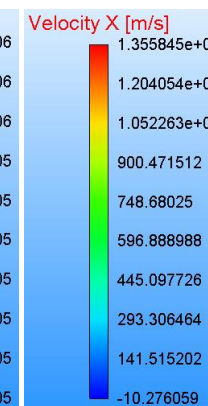
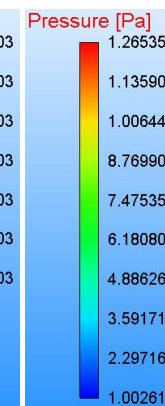
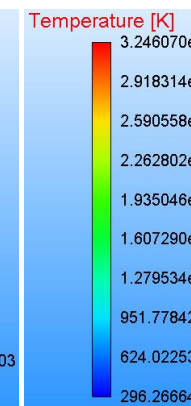
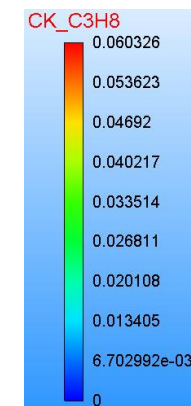
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

55 мкс

Дефлаграция

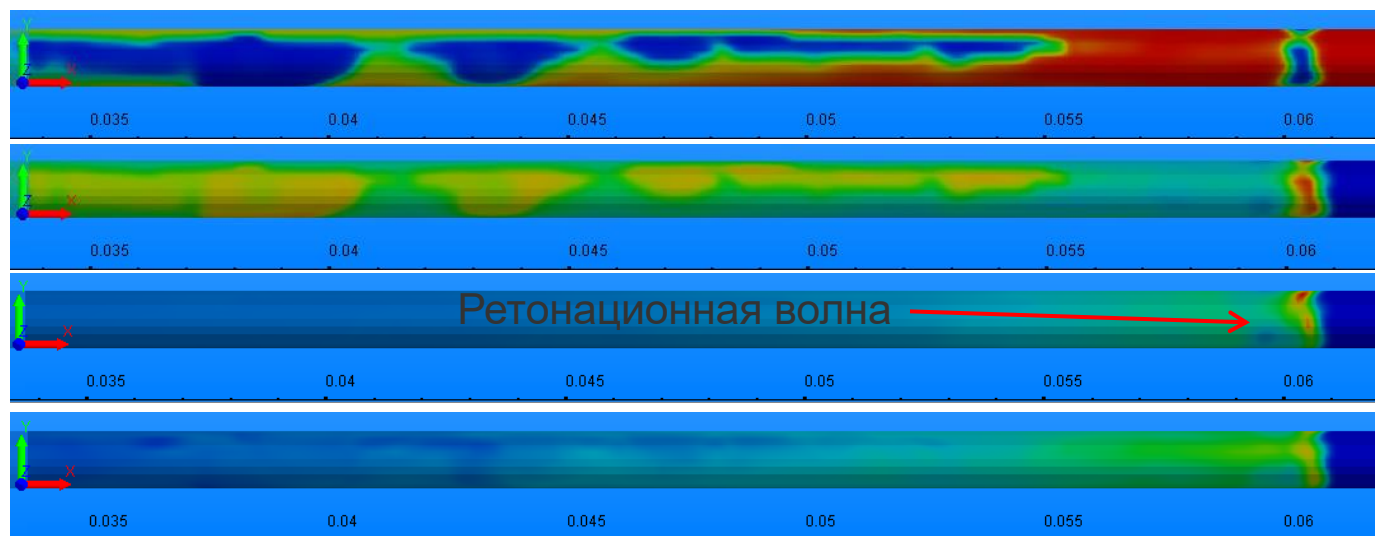


$\omega_{C_3H_8}$

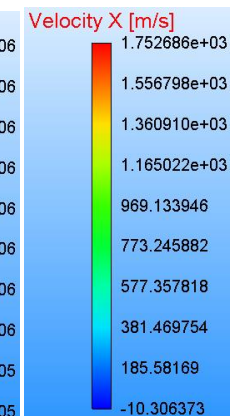
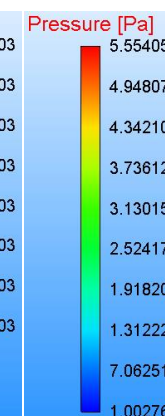
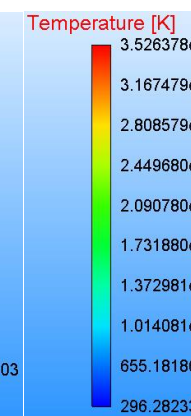
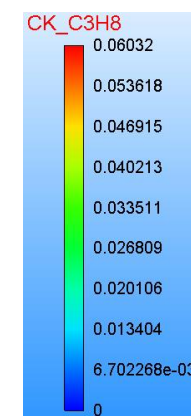


64,75 мкс

Переход к детонации



$\omega_{C_3H_8}$



Ретонационная волна

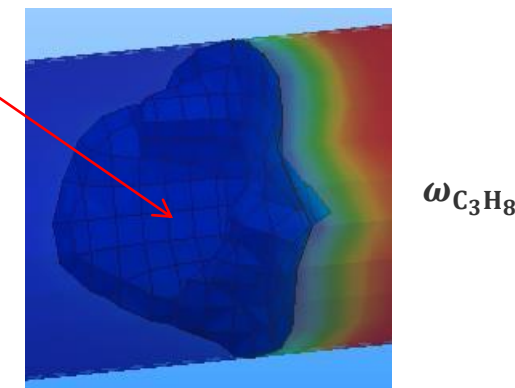
Валидация аэрогидродинамического модуля ПК «ЛОГОС»



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Основные параметры установившейся детонационной волны в стехиометрической пропано-воздушной смеси.

Источник	D , м/с	P_H , атм	u_H , м/с	C_H , м/с	ρ_H , кг/м ³	T , К
[6] $Q_p = -2043154$ Дж/моль; с противодавлением; $\gamma_0 = 1,32, \gamma_H = 1,31$	2050,2	22,08	864,0	-	2,056	3654
[7] Стехиометрическая смесь	1799,0	18,64	807,0	-	-	2813
Данная работа * $Q_p = -2043990$ Дж/моль; $\gamma_0 = 1,37, \gamma_H = 1,24$	1924,5	24,26	794,6	1036,1	2,789	2985
* – параметры осреднялись по изоповерхности массовой доли пропана со значением 0,1% от начальной						



Анализ полученных результатов расчёта показывает, что функциональные возможности ПК «ЛОГОС» позволяют корректно моделировать многомерные нестационарные течения химически реагирующих многокомпонентных газовых смесей с волнами детонации, в том числе и переходные процессы.

6. Семёнов И. В., Уткин П. С. Численное моделирование детонационных процессов в газах: Научно-образовательный курс. – Москва: Учреждение Российской академии наук Институт автоматизации проектирования РАН, 2011. – 69 с.

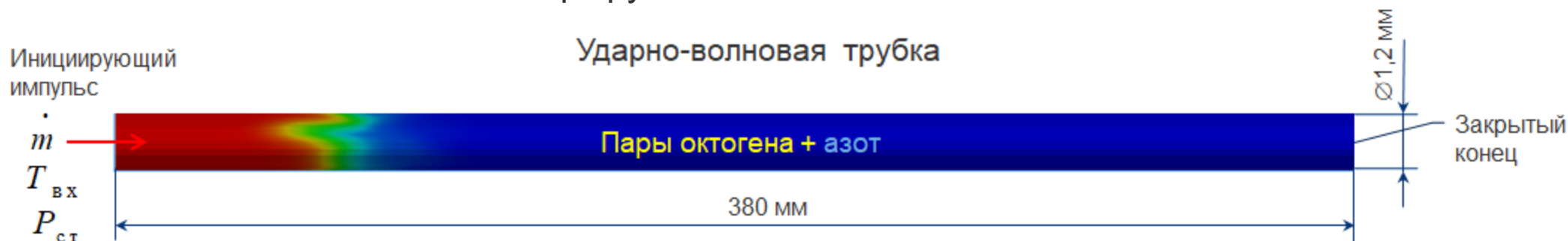
7. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е переработанное. – В 2 т. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 832 с.

Расчётная схема УВТ с октогеном



РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

В качестве объекта исследования рассматривается УВТ изготовления АО НМЗ «Искра» с внешним диаметром УВТ - 3,2 мм, диаметром канала – 1,2 мм и номинальным количеством навески октогена на погонный метр трубки - 17 мг/м.



- Исходная гетерогенная система «октоген + Al» - «воздух», в которой при нагреве частиц реагента начинают протекать реакции термического разложения в конденсированной и газовой фазах, в математической модели заменяется модельной гомогенной средой «пары октогена» - «азот», а термическое разложение октогена описывается газофазными реакциями. В навеске не учитывается алюминиевая пудра;
- Рассматривается трёхмерное теплопроводное вязкое турбулентное течение химически реагирующей многокомпонентной газовой смеси;
- Тепло – и массообмен с окружающей средой через боковую и правую торцевую поверхности УВТ отсутствует;
- Иницирующий импульс моделируется вдувом горячего газа в ударную трубку с постоянным массовым расходом и ограниченной длительностью.

Механизм и кинетическая модель термического разложения октогена



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Разложение октогена в конденсированной фазе [8]:

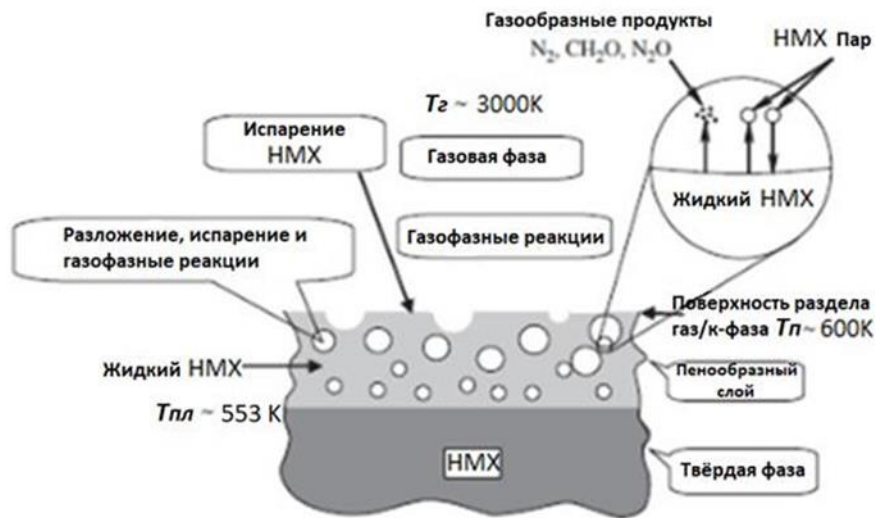


Рис. 2 – Схема модели самоподдерживающегося процесса горения октогена

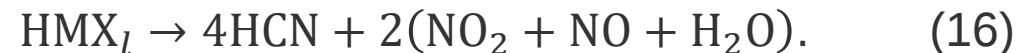
Реакция (17) может протекать в пузырьках. Первичные реакции (15) и (16) также могут протекать в газовой фазе с участием паров октогена. При выходе пузырька на поверхность горения пары октогена вместе с продуктами выбрасываются в газовую фазу. Таким образом, вместе с испарением октогена в газовую фазу с поверхности горения, в пузырьках, находящихся в конденсированной фазе, также имеет место его испарение:



при низких скоростях нагрева преобладает экзотермическая реакция:



при высоких скоростях нагрева преимущественно реализуется эндотермическая реакция:



Наиболее важная из вторичных реакций в конденсированной фазе является реакция:

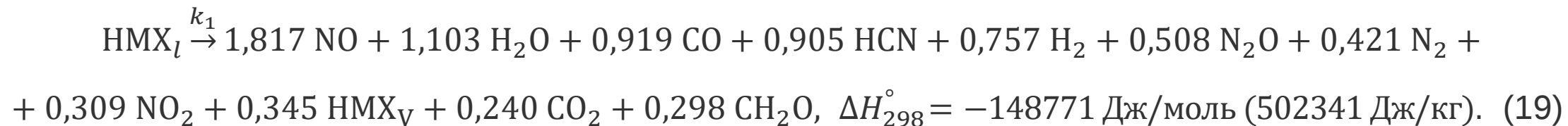


Механизм и кинетическая модель термического разложения октогена



РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

В работе [8] предложена следующая брутто - реакция газификации октогена:



Процесс одновременного разложения и испарения октогена при его газификации в реакционном слое конденсированной фазы рассматривается в работах [8, 9]. Тепловой эффект реакции (19) рассчитан с учётом скрытой теплоты сублимации октогена $L_{\text{subl}} = 185484,1 \text{ Дж/моль}$.

Скорость изменения глубины превращения октогена в конденсированной фазе:

$$\frac{d\eta_l}{dt} = k_1(1 - \eta_l), \text{ с}^{-1} \quad (20)$$

эквивалентна скорости изменения молярной концентрации паров октогена в газофазной модели:

$$w_{\text{HMX}_l} = \frac{d[\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8]}{dt} = -k_1[\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8], \text{ моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}), \quad (21)$$

где константа скорости химической реакции [10]:

$$k_1 = 1,58 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \text{ с}^{-1}; \quad (22)$$

$[\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8]$ – молярная концентрация паров октогена, $\text{моль}/\text{м}^3$; $E = 158687,3$ – энергия активации, Дж/моль .

9. Коптелов А. А., Милёхин Ю. М., Баранец Ю. Н. Расчёт теплового баланса в горящем октогене. Физика горения и взрыва, 2011, т. 47, №3. – С. 60-73.

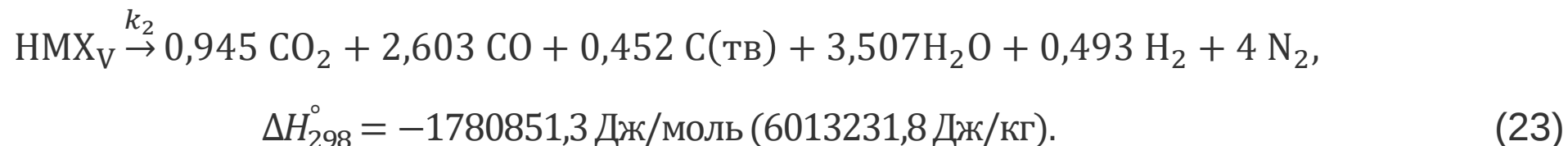
10. Ермолин Н. Е., Зарко В. Е. Механизм и кинетика термического разложения циклических нитраминов. Физика горения и взрыва, 1997, т. 33, №3. – С. 10-31.

Механизм и кинетическая модель термического разложения октогена



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

В соответствии с полуэмпирическим методом расчёта состава конечных продуктов взрыва конденсированных ВВ, предложенным Авакяном [7], получено термохимическое уравнение реакции разложения октогена в газовой фазе:



Скорость изменения молярной концентрации паров октогена:

$$w_{\text{HMX}_V} = \frac{d[\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8]_V}{dt} = -k_2 [\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8]_V, \text{ моль/(м}^3\cdot\text{с)}, \quad (25)$$

где константа скорости химической реакции [10]:

$$k_2 = 1,58 \cdot 10^{14} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \text{ с}^{-1}; \quad (26)$$

$E = 165386,5$ – энергия активации, Дж/моль.

Тепловой эффект суммарной реакции термического разложения октогена:

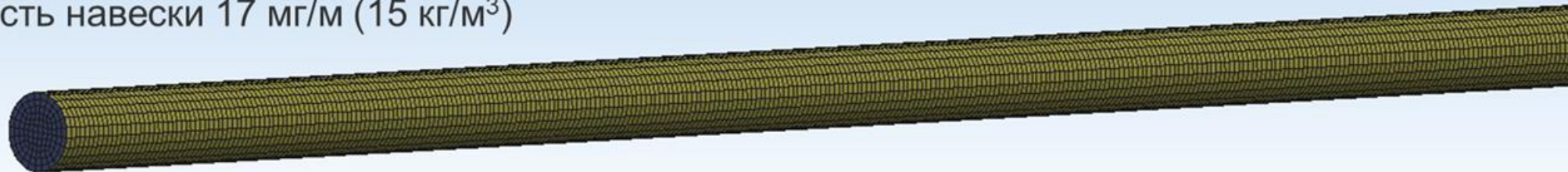
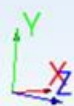
$$\sum_{r=1}^R \nu_r \Delta H_{298,r}^\circ = 0,655 \cdot (-148771) + 0,345 \cdot (-1780851,3) = -711838,7 \text{ Дж/моль (} -2403598,3 \text{ Дж/кг)}.$$

Результаты численного моделирования нестационарных детонационных процессов в УВТ с октогеном



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Плотность навески 17 мг/м (15 кг/м³)



Расчётная сетка: узлов – 459921; ячеек – 410400. Размер ячейки: $\Delta x = 10^{-4}$ м, $\Delta y \approx 10^{-4}$ м, $\Delta z \approx 10^{-4}$ м.

Уравнения RANS + уравнение состояния для смеси идеальных газов + $k-\omega$ модель турбулентности SST Ментера (2003) + двухстадийная кинетическая модель разложения октогена. Автоматический выбор пристеночной функции ALL+. Численная схема С. К. Годунова. Линейная реконструкция решения на каждой грани ячейки (шаблон 2-го порядка точности). Решатель: явная схема 1-го порядка точности по времени.

Начальные условия:

$$T_{г,0} = 298,15 \text{ К}; P_{г,0} = 227138,9 \text{ Па};$$

$$\omega_{C_4H_8N_8O_8,0} = 0,929; \omega_{N_2,0} = 0,071;$$

$$V_0 = (0,0,0); k_0 = 0; \omega_0 = 0; I_0 = 0,01.$$

Граничные условия:

$$\text{На входе: } \dot{m}_{\text{вх}} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с } (1 \cdot 10^{-4} \text{ с}); T_{\text{вх}} = 2936,3 \text{ К};$$

$$V_{\text{вх}} = (0,0,0); I_{\text{вх}} = 0,01.$$

$$\text{На стенке: } u_n = 0; u_\tau = 0; \frac{\partial f}{\partial n} = 0, \text{ где } f: \omega_i, T, P, k, \omega.$$

Результаты численного моделирования нестационарных детонационных процессов в УВТ с октогеном

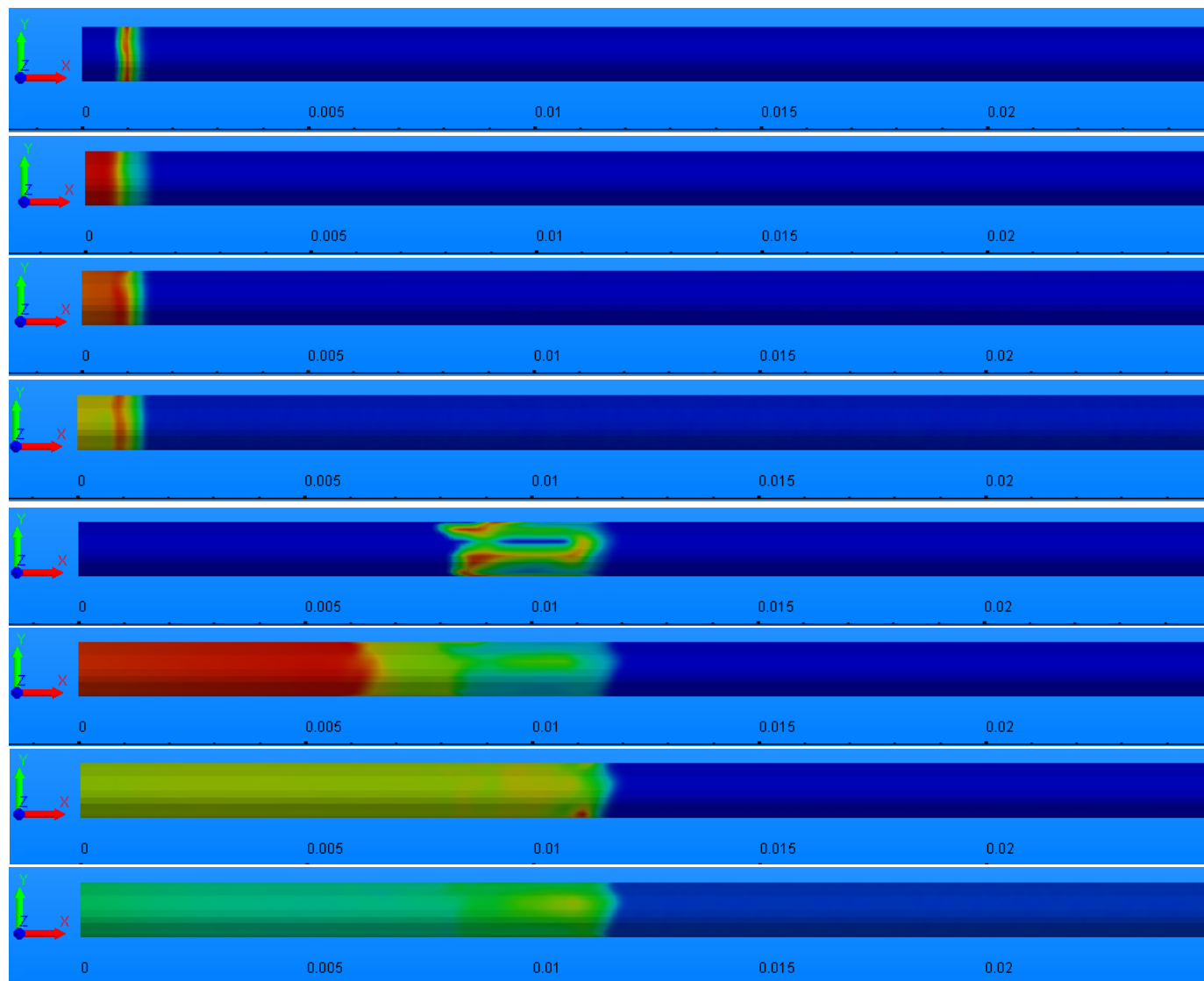


РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

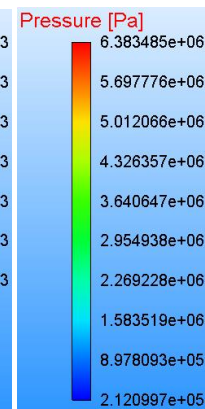
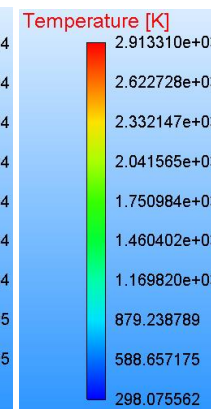
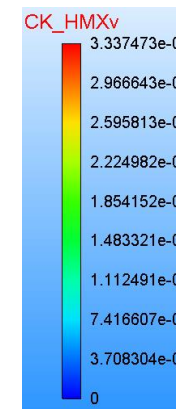
2 мкс

Дефляция

16 мкс



ω_{HMXv}

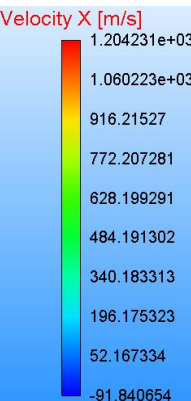
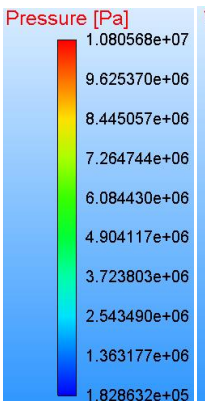
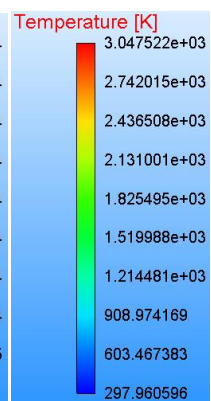
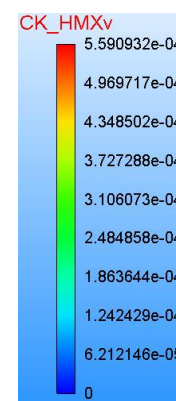


T

P

Vx

ω_{HMXv}



T

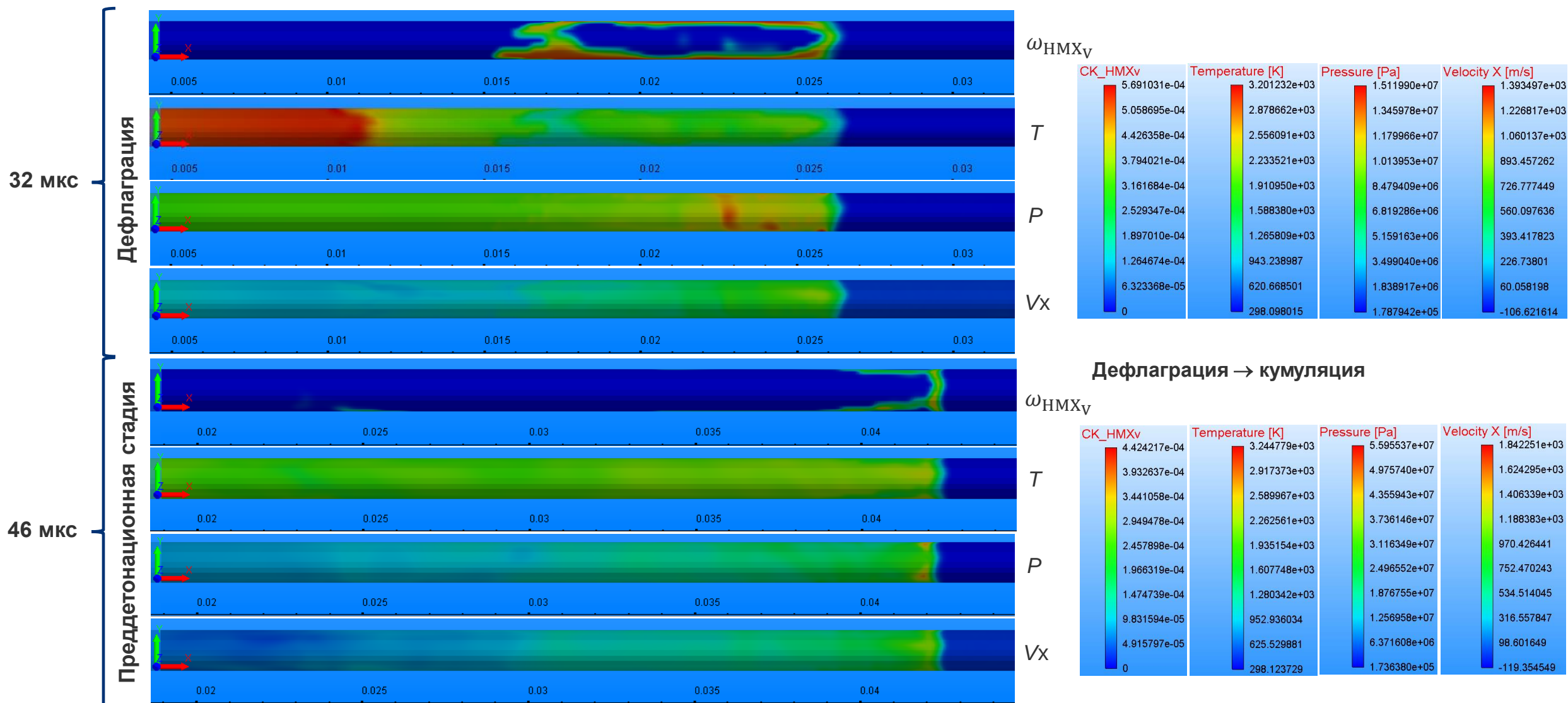
P

Vx

Результаты численного моделирования нестационарных детонационных процессов в УВТ с октогеном



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



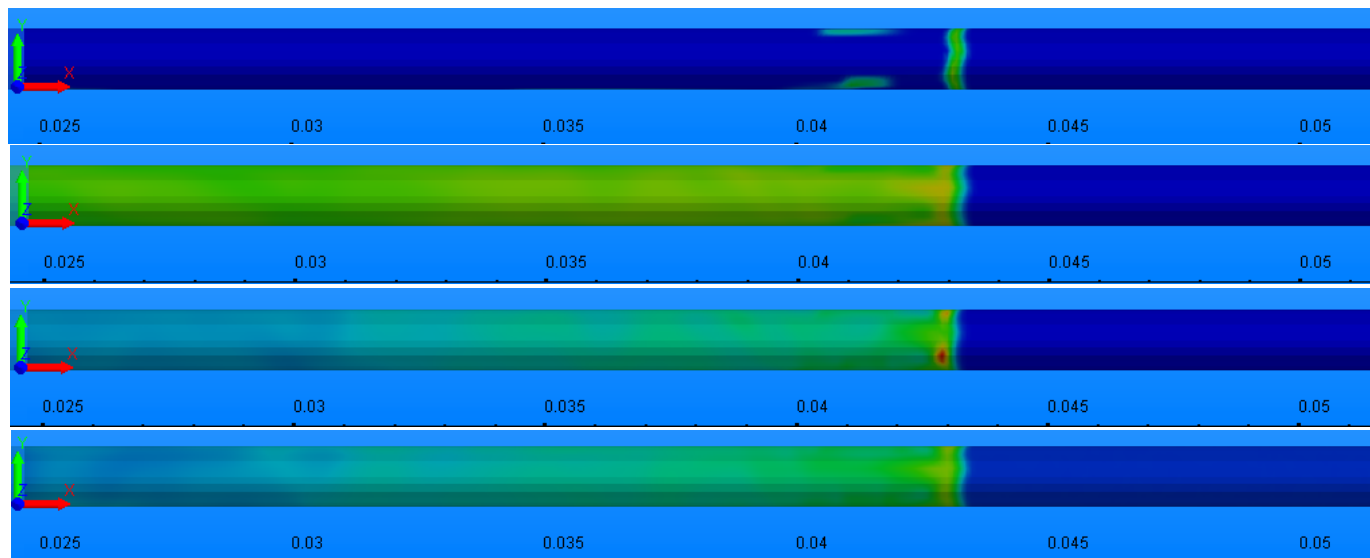
Результаты численного моделирования нестационарных детонационных процессов в УВТ с октогеном



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

46,5 мкс

Кумуляция → Самоспламенение

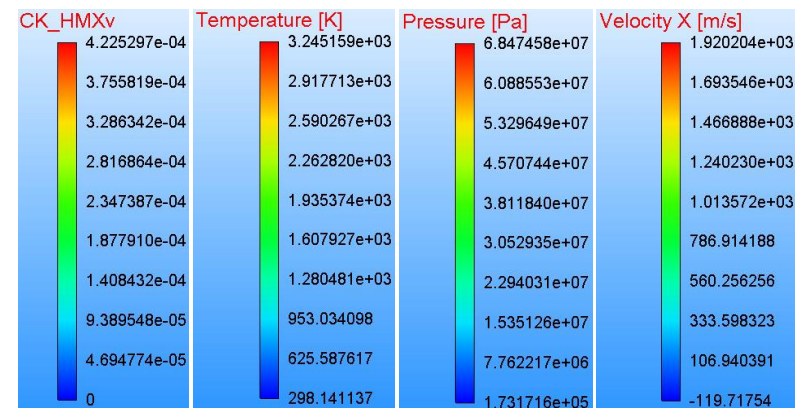


ω_{HMXv}

T

P

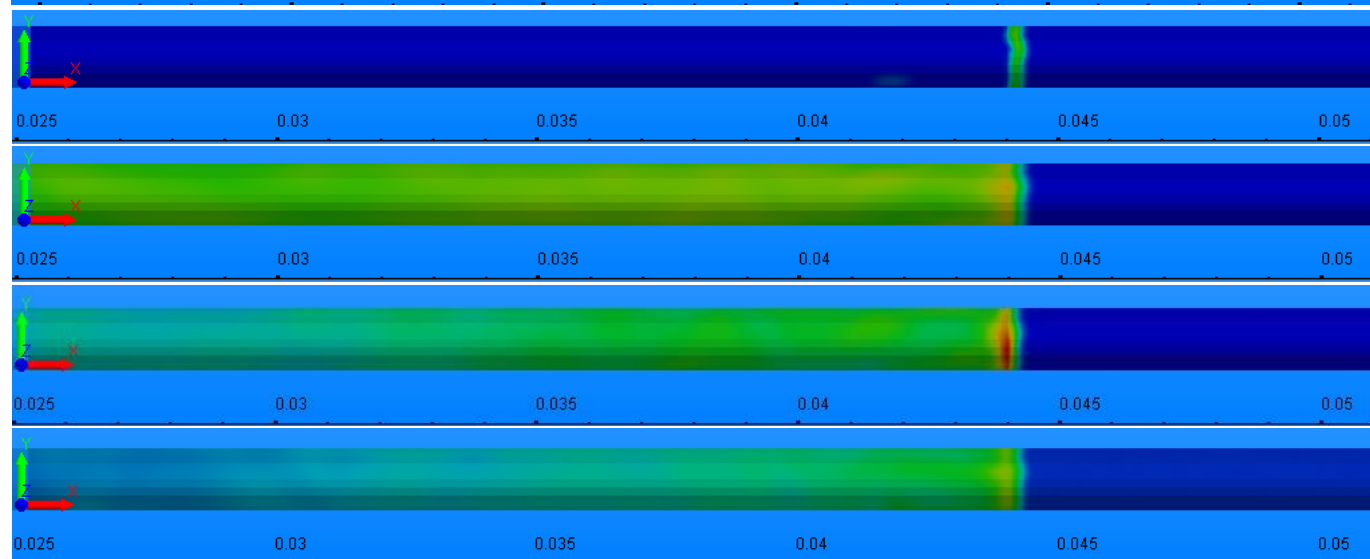
Vx



Кумуляция → самовоспламенение (тепловой взрыв) → пересжатая детонация

47 мкс

Переход к детонации

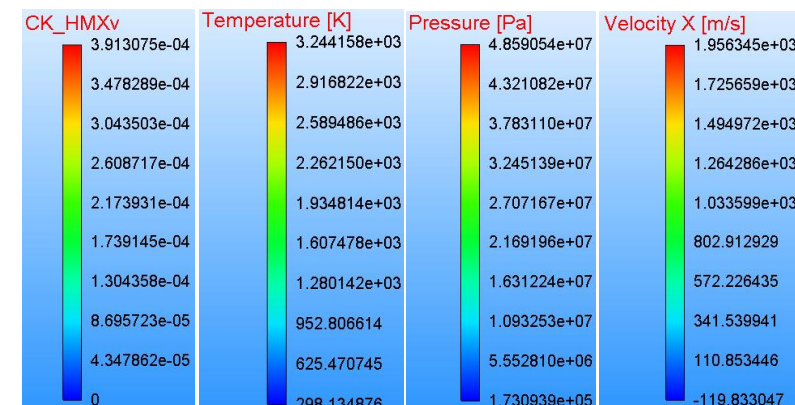


ω_{HMXv}

T

P

Vx

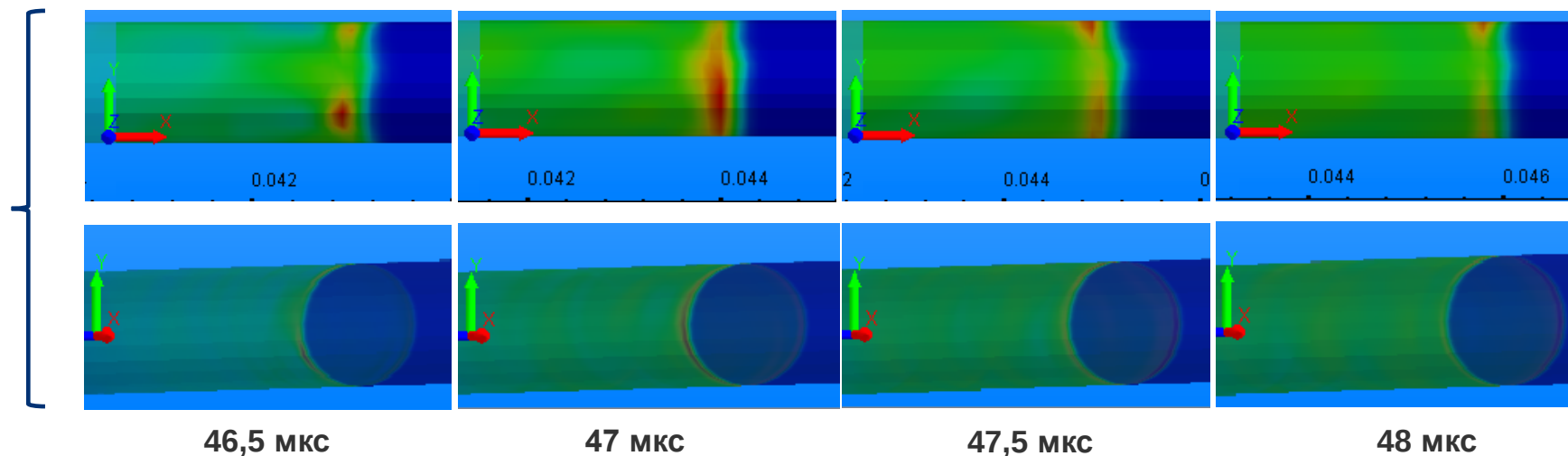


Результаты численного моделирования нестационарных детонационных процессов в УВТ с октогеном

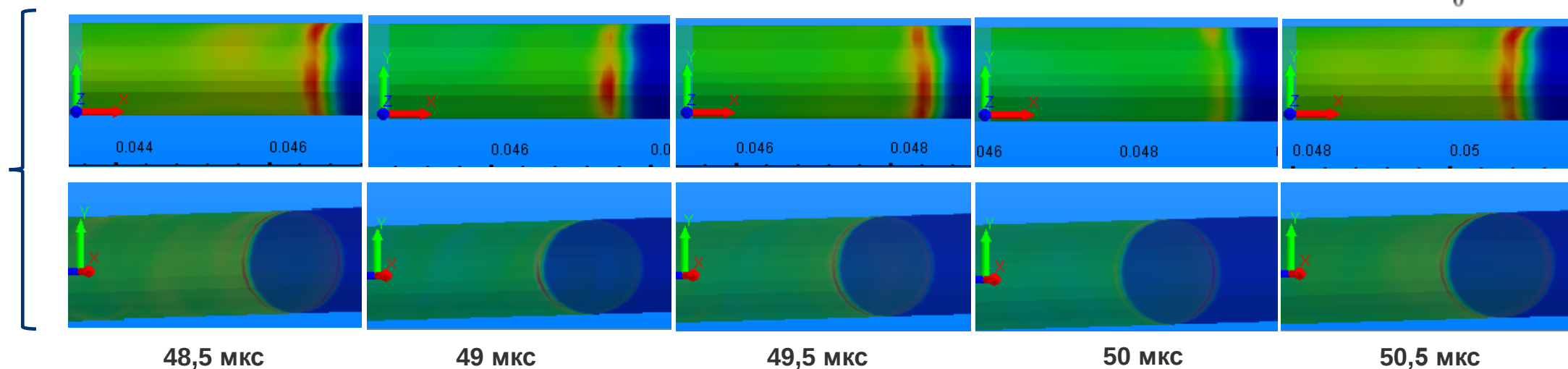
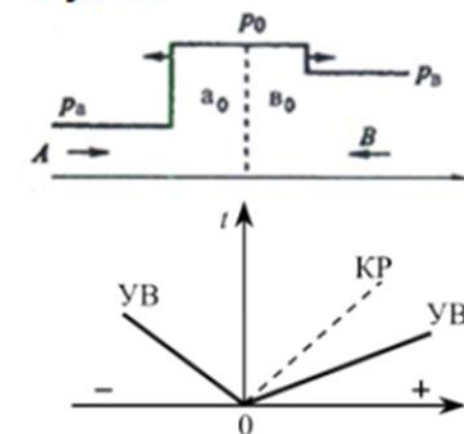


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Пересжатая детонация (взаимодействие поперечных детонационных волн)



Распад произвольного разрыва с образованием двух УВ



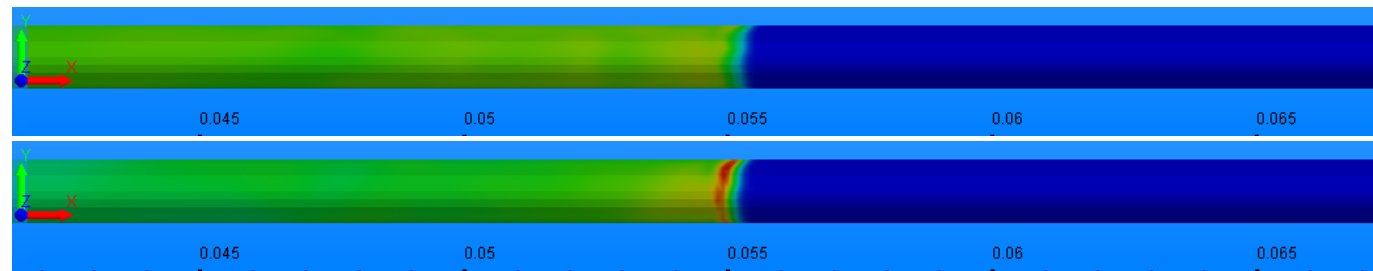
Результаты численного моделирования нестационарных детонационных процессов в УВТ с октогеном



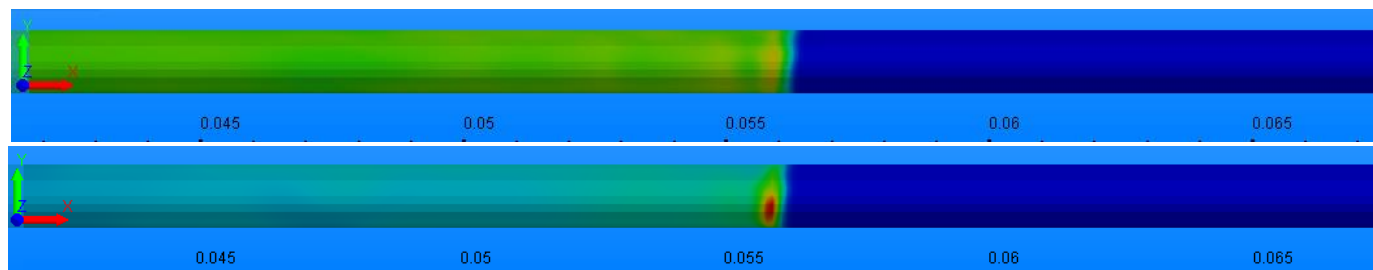
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Спиновая детонация, «шлейф» спина

53,5 мкс



54 мкс



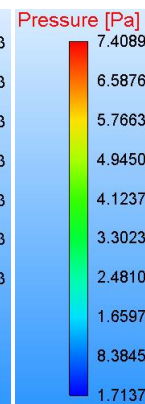
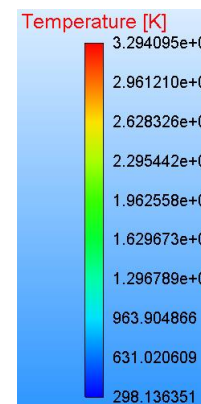
T

P

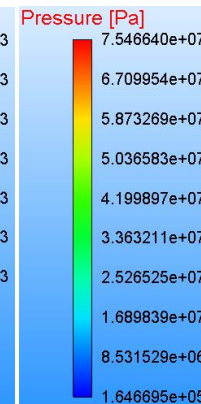
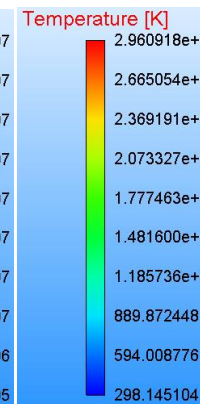
T

P

54 мкс



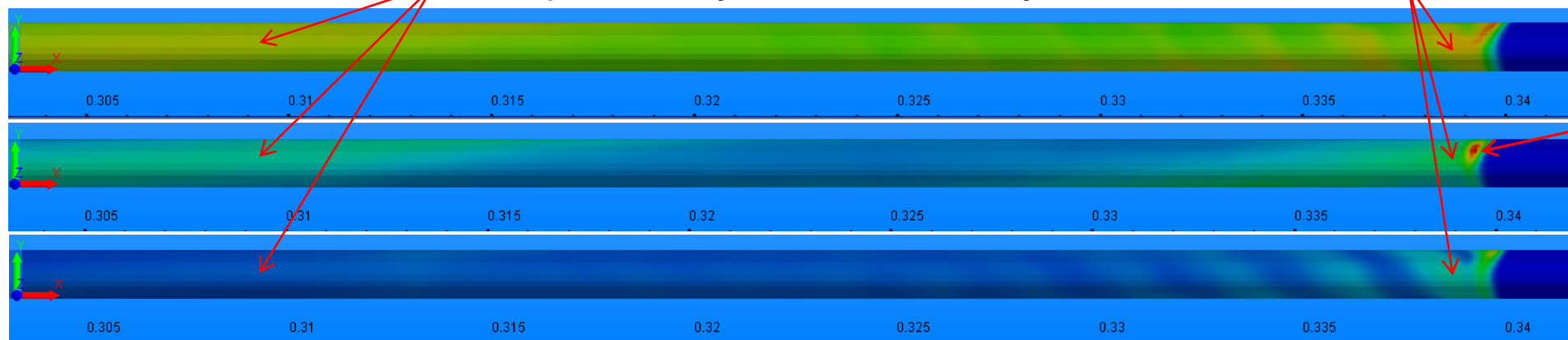
226,5 мкс



«Шлейф» спина – акустическая волна, возбуждаемая в «голове» спина

«Голова» спина

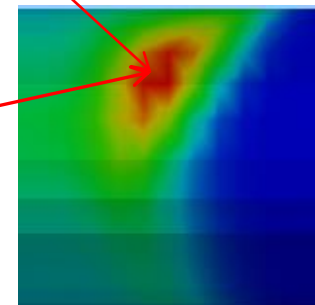
226,5 мкс



T

P

k

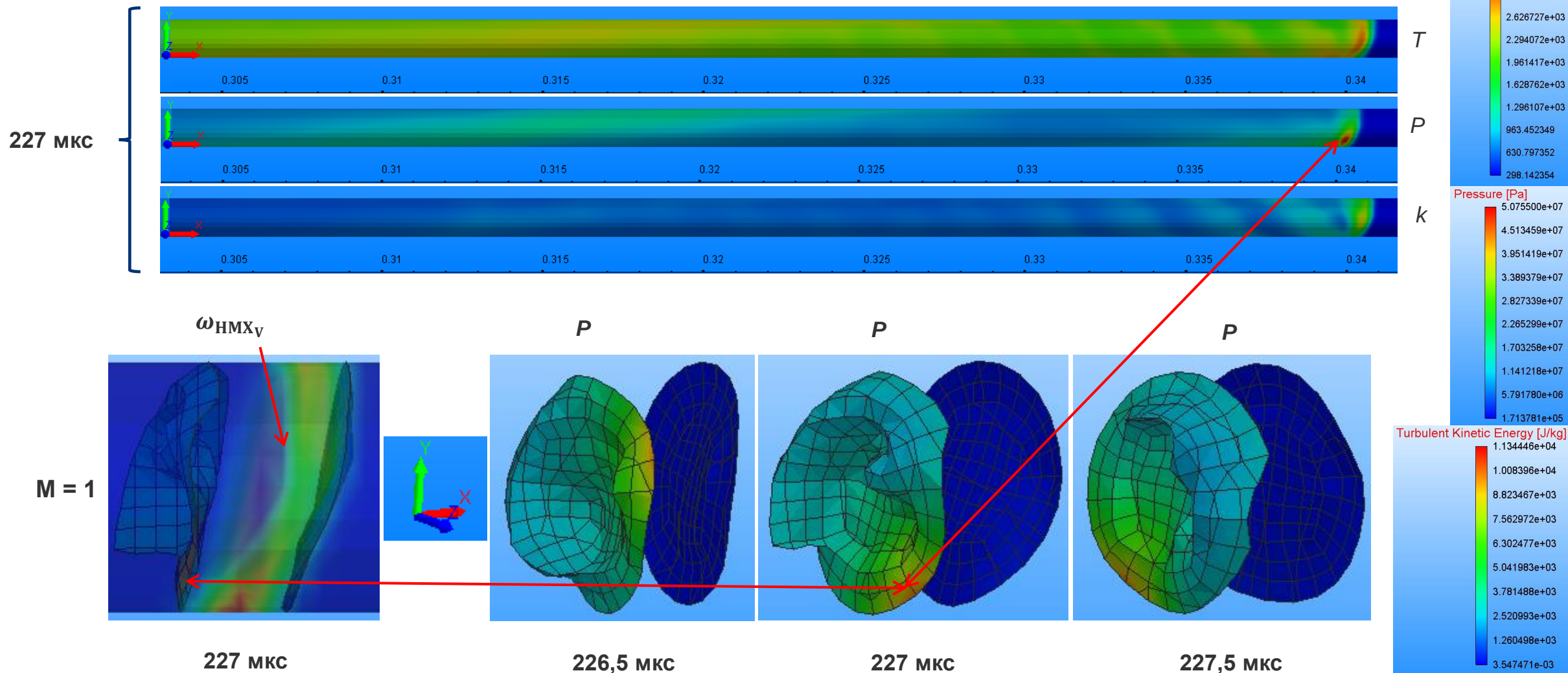


Результаты численного моделирования нестационарных детонационных процессов в УВТ с октогеном



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Спиновая детонация, «шлейф» спина



Достоверность результатов численного моделирования детонационных процессов в УВТ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

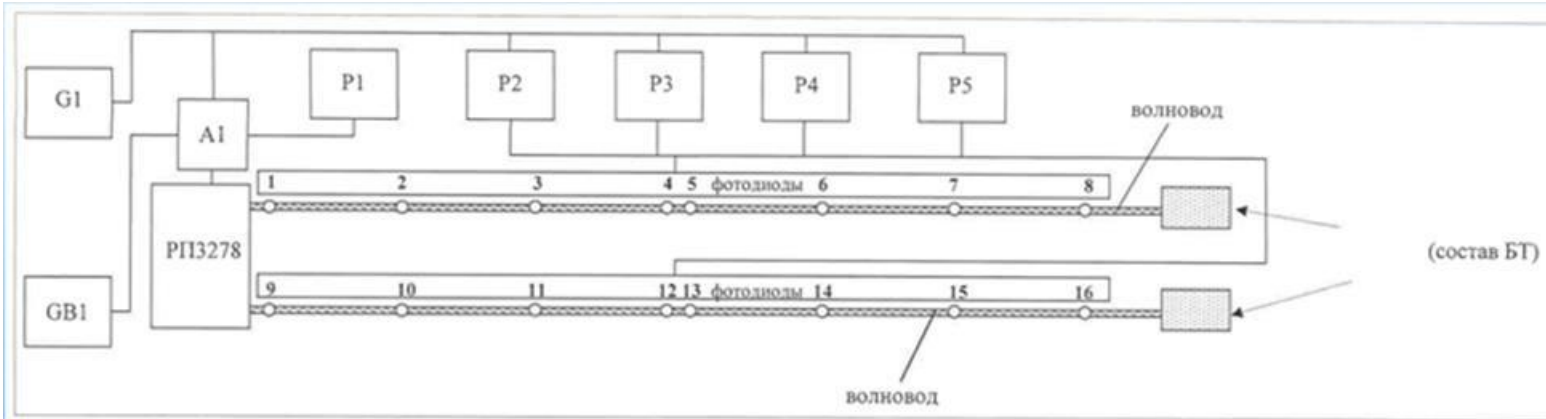


Схема задействия и регистрации опытов

A1 – электрическая схема

G1 – генератор импульсов

GB1 – источник питания

P1...P5 – осциллограф цифровой

Длина волновода и расположение фотодиодов различны в зависимости от номера опыта и указаны в таблице

Расположение фотодиодов по отношению к осциллографам: №№1 – 4 к P2, №№5 – 8 к P3, №№9 – 12 к P4, №№13 – 16 к P5.

№ф	х, мм	лабораторный макет №1			№ф	х, мм	лабораторный макет №2		
1	7	Δx , мм	Δt , мкс	v , м/сек	9	7	Δx , мм	Δt , мкс	v , м/сек
2	57	50	26	1923	10	57	50	30	1667
3	107	50	30	1667	11	107	50	32	1563
4	157	50	24	2083	12	157	50	25	2000
5	167				13	167			
6	217	50	29	1724	14	217	50	29	1724
7	267	50	27	1852	15	267	50	27	1852
8	317	50	29	1724	16	317	50	28	1786

№т	х, мм	Расчёт		
1	7	Δx , мм	Δt , мкс	D , м/с
2	43	36	35,5	1014
3	45	2	1,0	2000
4	57	12	7,0	1714
5	107	50	30,5	1640
6	157	50	30,0	1667
7	167	10	6,0	1667
8	217	50	30,5	1640
9	267	50	30,0	1667
10	317	50	30,5	1640

Достоверность результатов численного моделирования детонационных процессов в УВТ



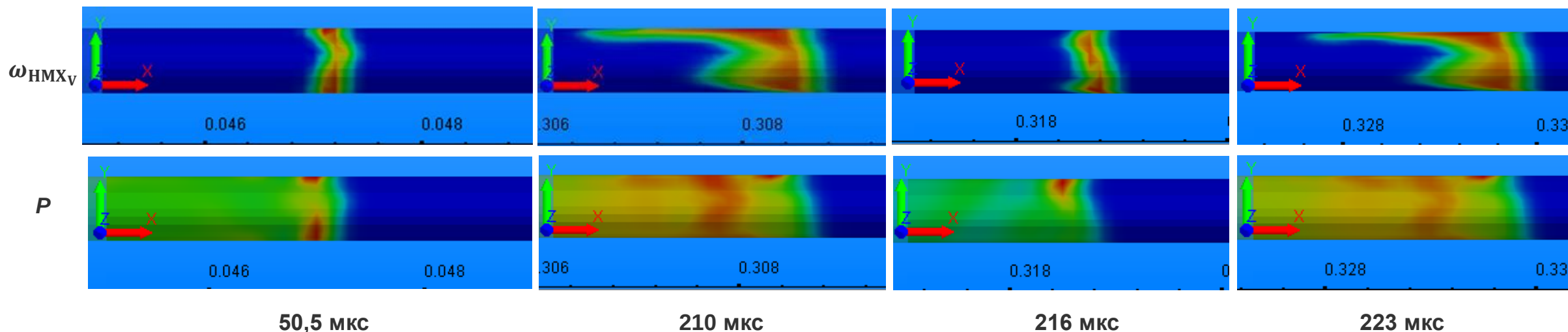
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Скорость детонации в УВТ (эксперимент: $\varnothing$ 0,6 мм, октоген + 5%Al, $m = 5 \div 6$ мг/м; расчёт: $\varnothing$ 0,6 мм, октоген, $m = 5$ мг/м).

Эксперимент [2]			Расчёт		
Газ	P_0 , Па	D , м/с	Газ	P_0 , Па	D , м/с
Воздух	10^5	1540	Азот	$2,5 \cdot 10^5$	1632
Примечание – Признаки спина не обнаружены [2]; В расчёте наблюдается галопирующая детонация					

Переход к детонации

Установившаяся галопирующая детонация





Анализ результатов расчётов позволяет сделать следующие выводы:

- Спиновая детонация в УВТ возникает вблизи пределов детонации в соответствии со схемой: *инициирование дефлаграции → самоускорение дефлаграции, кумуляция слабых ударных волн, возбуждаемых фронтом пламени → самовоспламенение (тепловой взрыв) → возникновение и взаимодействие поперечных детонационных волн по схеме распада произвольного разрыва (пересжатая детонация) → возникновение спиновой детонации как динамически устойчивого автоколебательного процесса с конфигурацией «шлейф» спина + «голова» спина + фронт детонации»;*
- «Голова» спина – локализованная вблизи стенки зона химической реакции с аномальным давлением, вращающаяся вокруг оси волновода одновременно с поступательным движением детонационного фронта и обусловленная дефицитом скорости химической реакции;
- «Шлейф» спина – возникающая за детонационным фронтом поперечная акустическая волна, вытянутая вдоль образующей ударной трубки и вращающаяся вместе с «головой» спина. Существование такой волны согласуется с решением волнового уравнения для радиальных и тангенциальных колебаний объема продуктов горения в волноводе. Это решение описывает вращение фазовой пучности давления газа при сложном колебании с некоторой поперечной скоростью (теория акустической детонации Мансона - Тейлора - Фэя - Чу) [11 - 13].

11. Солоухин Р. И. Детонационные волны в газах. УФН. Т. LXXX, вып. 4, 525. (1963).

12. Солоухин Р. И. Физические исследования газов с помощью ударных волн. УФН. Т. LXVIII, вып. 3, 513. (1959).

13. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчий М. Е. Структура фронта детонации в газах. – Новосибирск: Издательство СО АН СССР, 1963.

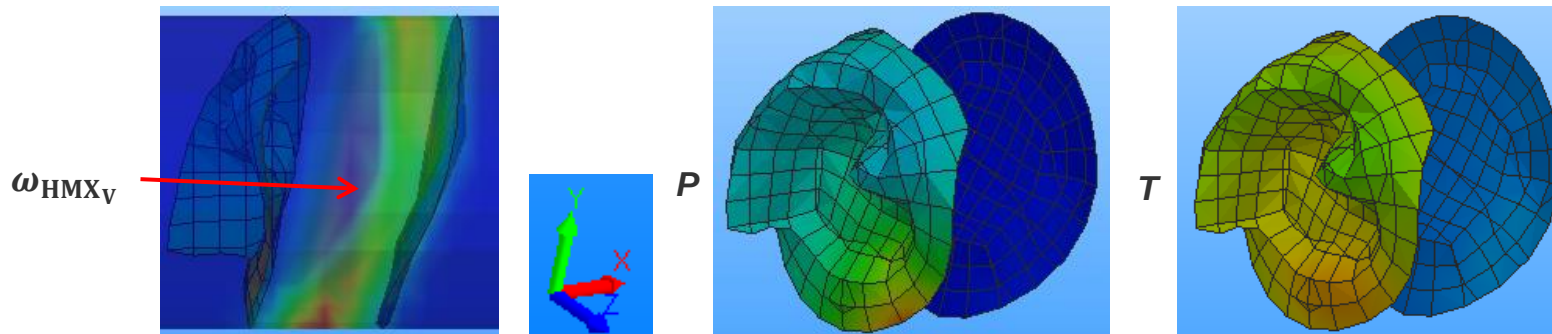
Анализ результатов численного моделирования



РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Параметры установившейся в УВТ спиновой детонации:

Диаметр УВТ d :	1,2	мм
Погонная плотность октогена:	17	мг/м
Начальное давление $P_{г.0}$:	0,227	МПа
Средняя скорость детонации:	1654	м/с
Давление в «голове» спина:	75	МПа
Температура в «голове» спина:	2455	К
Среднее давление на изоповерхности $M = 1$:	18,6	МПа
Средняя температура на изоповерхности $M = 1$:	2207	К
Шаг спина $\frac{L}{\pi d}$ (L):	1,0345	(3,245· d)
Угол наклона спина к образующей УВТ $\arcsctg\left(\frac{L}{\pi d}\right)$:	44°	
Частота вращения спина:	421052	Гц
Тангенциальная скорость «головы» спина близка к скорости детонации.		



Поверхности P и T построены по уровню $M = 1$

Выводы



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

- Предложена математическая модель нестационарных детонационных процессов в УВТ со слоем октогена, основанная на уравнениях RANS, уравнении состояния для смеси идеальных газов, модифицированной $k-\omega$ модели турбулентности SST Ментера и двухстадийной кинетической модели термического разложения октогена, включающей прямые химические реакции первого порядка в конденсированной и газовой фазах.
- На основе предложенной математической модели изучаемых процессов в расчетах воспроизведен режим детонации с одноголовым спином, получены данные об основных параметрах спинового режима детонации в УВТ $\varnothing 1,2$ мм с навеской октогена 17 мг/м.
- Анализ результатов численного моделирования показывает, что в рассматриваемой УВТ спиновая детонация возникает в соответствии со схемой: инициирование дефлаграции → самоускорение дефлаграции, кумуляция слабых ударных волн, возбуждаемых фронтом пламени → самовоспламенение (тепловой взрыв) → возникновение и взаимодействие поперечных детонационных волн по схеме распада произвольного разрыва (пересжатая детонация) → возникновение спиновой детонации как динамически устойчивого автоколебательного процесса с конфигурацией «шлейф» спина + «голова» спина + фронт детонации»;
- Скорость спиновой детонации, определенная по результатам расчётов, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными по измерению скорости детонации в рассматриваемой УВТ.