



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ С ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Лаврук С.А., Тропин Д.А.

Институт теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича СО РАН

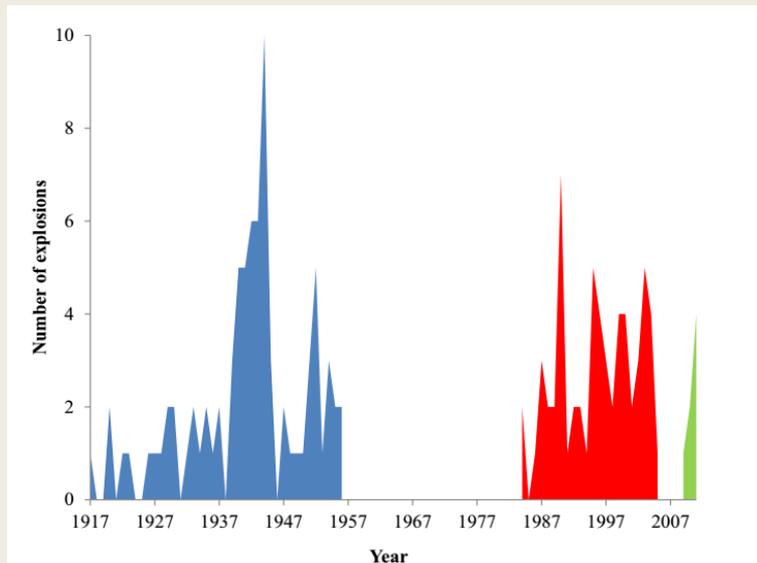
Забабахинские Научные Чтения 2023

Снежинск, Челябинская область, Россия

29 мая – 2 июня 2023 г.

Актуальность

- Частицы алюминия, бора и магния применяются в различных отраслях промышленности.
- При производстве, транспортировке и хранении микро- и наночастиц особняком стоит вопрос взрыво-пожаробезопасности. Особую опасность представляют скопления и распылы мелкодисперсной органической или металлической пыли в ограниченных объемах (помещениях, вентиляционных шахтах, закрытых транспортерах).



Количество взрывов
металлической пыли по годам



Фильтр до и после взрыва
алюминиевой пыли

Цель работы

Исследование взаимодействия гетерогенных детонационных волн (ДВ) с пористой вставкой, состоящей из инертного наполнителя, и определение критических условий подавления или достаточного ослабления детонации.

Содержание

1. Физико-математическая модель
2. Моделирование взаимодействия ДВ с полубесконечной пористой вставкой.
3. Моделирование взаимодействия ДВ с конечной пористой вставкой.
4. Выводы

1. Физико-математическая модель

$$\boxed{\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \Gamma} \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{pmatrix} \mathbf{\Gamma}_{2,3} \\ \mathbf{\Gamma}_2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{W}_1 = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_1 u_1 \\ \rho_1 v_1 \\ \rho_1 E_1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_1 = \begin{pmatrix} \rho_1 u_1 \\ p + \rho_1 u_1^2 \\ \rho_1 u_1 v_1 \\ \rho_1 u_1 E_1 + p u_1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{G}_1 = \begin{pmatrix} \rho_1 v_1 \\ \rho_1 u_1 v_1 \\ p + \rho_1 v_1^2 \\ \rho_1 v_1 E_1 + p v_1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{W}_2 = \begin{pmatrix} \rho_2 \\ \rho_2 u_2 \\ \rho_2 v_2 \\ \rho_2 E_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_2 = \begin{pmatrix} \rho_2 u_2 \\ \rho_2 u_2^2 \\ \rho_2 u_2 v_2 \\ \rho_2 u_2 E_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{G}_2 = \begin{pmatrix} \rho_2 v_2 \\ \rho_2 u_2 v_2 \\ \rho_2 v_2^2 \\ \rho_2 v_2 E_2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{2,3} = \begin{pmatrix} J \\ -f_{x3} - f_{2x} \\ -f_{y3} - f_{2y} \\ -(q_2 + f_{2x} u_2 + f_{2y} v_2) - (q_3 + f_{x3} u_1 + f_{y3} v_1) \end{pmatrix} \quad \mathbf{\Gamma}_2 = \begin{pmatrix} -J \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ q_2 + f_{2x} u_2 + f_{2y} v_2 \end{pmatrix}$$

Силы межфазных взаимодействий и теплообмен:

$$\bar{f} = \frac{3m_2\rho_{11}}{4d} c_D |\bar{u}_1 - \bar{u}_2| (\bar{u}_1 - \bar{u}_2)$$

$$q = \frac{6m_2\lambda_1}{d^2} Nu(T - T_2)$$

$$c_D(\text{Re}, M_{12}) = \left[1 + \exp\left(-\frac{0.43}{M_{12}^{4.67}}\right) \right] \left(0.38 + \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} \right) \quad Nu = 2 + 0.6\text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$$

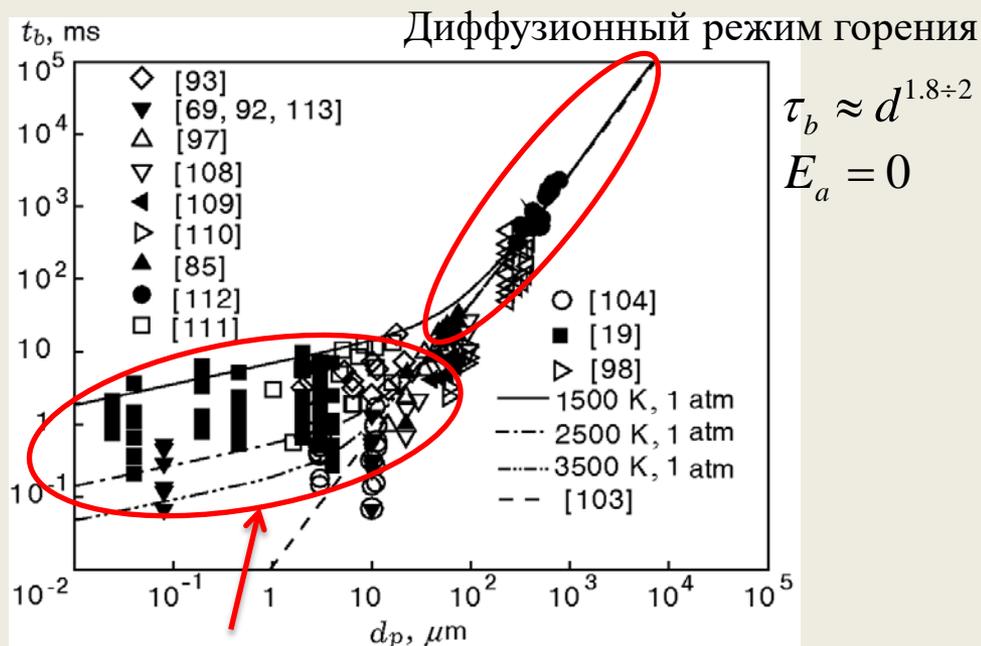
$$M_{12} = \frac{|u_1 - u_2| \sqrt{\rho_{11}}}{\sqrt{\gamma_1 p}} \quad \text{Re} = \frac{\rho_{12} d |u_1 - u_2|}{\mu}$$

Уравнение состояния при условии малой объемной концентрации второй фазы :

$$p = \rho_1 RT \quad E_i = (u_i^2 + v_i^2) / 2 + c_{v,i} T_i + (i - 1) Q$$

Температура воспламенения и механизм горения частиц алюминия

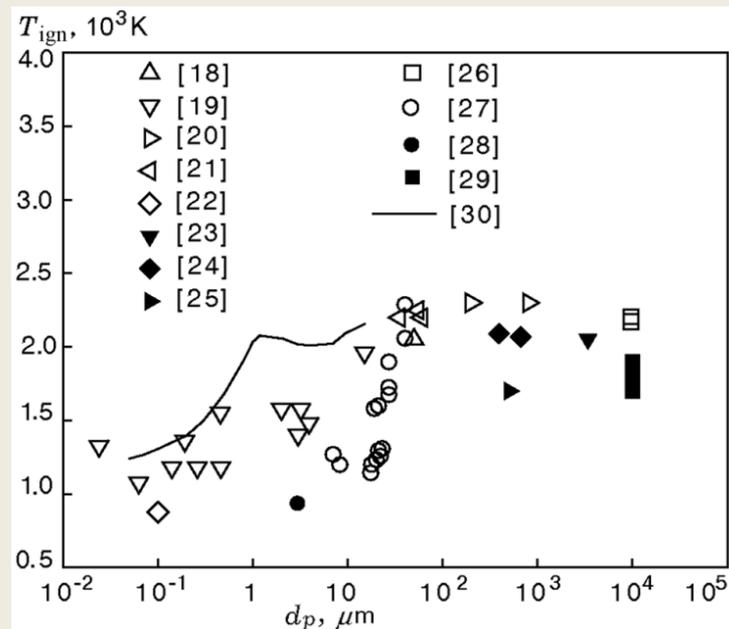
Зависимость времени горения от размера частиц



Переход к кинетическому режиму горения $\tau_b \approx d^{0.3}$

Горение крупных частиц протекает в диффузионном режиме (время горения не зависит от температуры и слабо зависит от давления). Горение частиц размером менее 10 мкм происходит в переходном режиме от диффузионного к кинетическому.

Минимальная температура окружающего газа для воспламенения частиц алюминия



$$T_{ign} = T_{melt} = 930\text{K}$$

Описание горения частиц алюминия в детонации

$$J = \begin{cases} (\rho_2 - \rho_k) / \tau_\xi, T_2 \geq T_{ign}, \rho_2 > \rho_k \\ 0, T_2 < T_{ign}, \\ 0, \rho_2 \leq \rho_k \end{cases}$$

Температурный критерий воспламенения, Федоров А.В. (1986, 1992).

Неполное сгорание частиц, Strauss W.A. (1968)

$$T_{ign} = 900 \div 930\text{K}$$

Микронные частицы 3.5 - 10 мкм

$$\tau_\xi \approx d^2 \exp(E_a / RT_2)$$

$$E_a = 32\text{kJ/mol}$$

Микронные частицы до 3.5мкм

$$\tau_\xi \approx d^{0.3} \exp(E_a / RT_2)$$

Субмикронные частицы
150 нм – 1мкм

$$\tau_\xi \approx d^{0.3} p^{-m} \exp(E_a / RT_1)$$

$$m = -0.25 \ln d[\mu\text{m}]$$

$$E_a = (32 - 14 \ln d[\mu\text{m}]) \text{kJ/mol}$$

Наночастицы до 150 нм

$$\tau_\xi \approx d^{0.3} p^{-0.5} \exp(E_a / RT_1)$$

$$E_a = 60\text{kJ/mol}$$

Пористая вставка

Пористое тело представляет собой набор цилиндров, для которого задается дополнительное уравнение энергии, моделирующее воздействие, вносимое данным телом

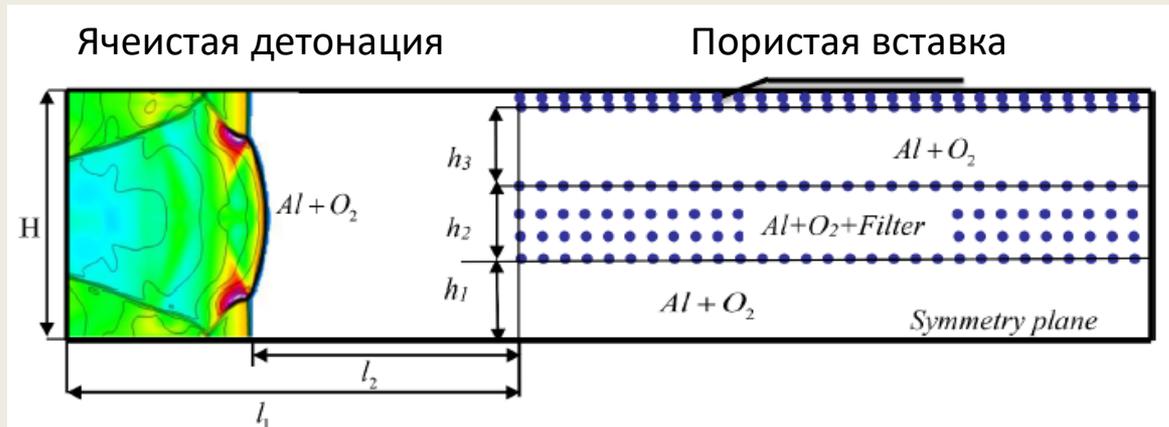
$$\frac{dE_3}{dt} = q_3 + f_{x3}u_1 + f_{y3}v_1$$

$$\vec{f}_{3i} = \frac{\rho_3}{\tau_{u3}} \vec{u}_1 \quad q_3 = \frac{\rho_3 c_{v,3}}{\tau_{T3}} (T_1 - T_3) \quad \tau_u = 4d \rho_{33} / 3c_D \rho_{11} |u_1|$$

$$c_D(\text{Re}, M_{12}) = \left(1 + \exp\left(-\frac{0.43}{M_{12}^{4.67}}\right) \right) \left(0.38 + \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} \right) \quad \tau_T = d^2 \rho_{33} c_{v3} / 6\lambda_1 \text{Nu}$$

$$\text{Nu} = 2 + 0.6\text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad \text{Re} = \frac{\rho_{11} d |u_1|}{\mu_1} \quad M_{12} = \frac{|u_1| \sqrt{\rho_{11}}}{\sqrt{\gamma_1 p}}$$

2. Полубесконечная пористая вставка. Постановка задачи

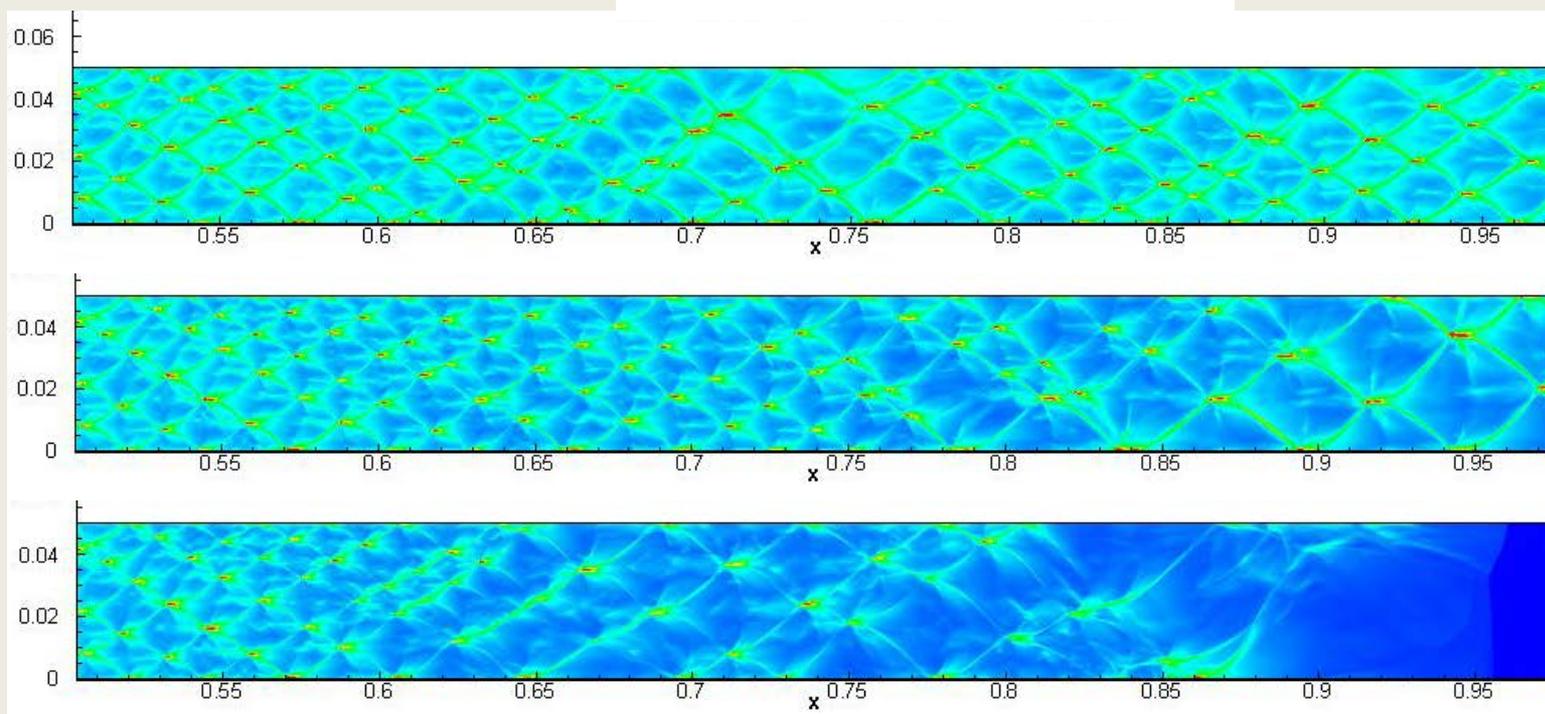
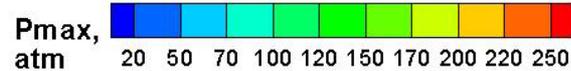


Расчётная схема

Параметры пористой вставки:

- Пористая вставка формируется из статических цилиндров ($d_3=50 \dots 200$ мкм);
- Объемная концентрация ($1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-3}$)
- Высота пористой вставки ($h_1=1 \dots 9$ см)

2D моделирование наночастиц (200 нм)



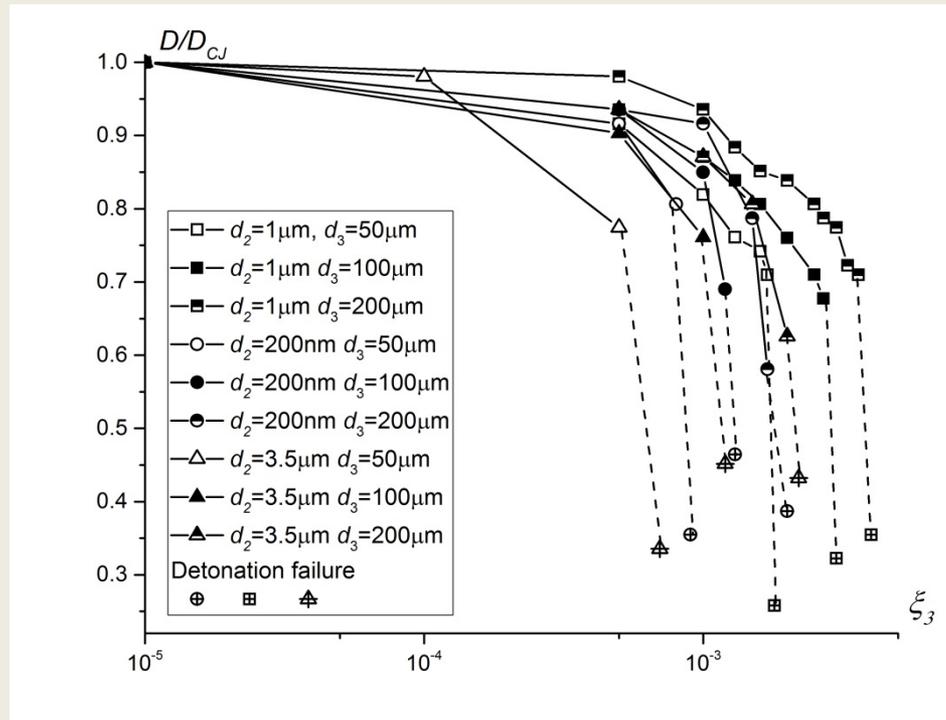
$d_3=200 \mu\text{m}$,
 $v=7 \cdot 10^{-4}$
 $D=1.52 \text{ км/с}$

$d_3=200 \mu\text{m}$,
 $v=9 \cdot 10^{-4}$
 $D=1.3 \text{ км/с}$

$d_3=200 \mu\text{m}$,
 $v=1.2 \cdot 10^{-3}$
 $D=0.6 \text{ км/с}$

Из-за более высокой энергии активации наночастиц возникает нерегулярная ячеистая структура. В пористой вставке она по-прежнему имеет нерегулярную структуру, но размер ячеек увеличивается с увеличением объемной концентрации инертных частиц. Срыв детонации характеризуется увеличением размера ячейки.

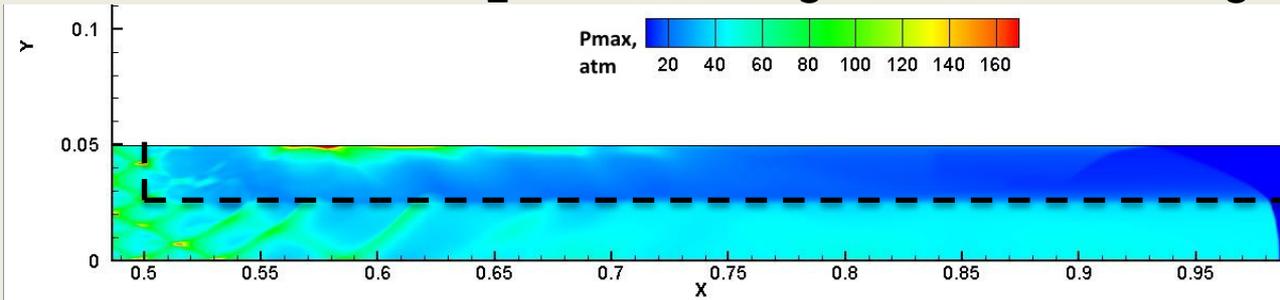
Зависимость приведенной скорости детонации в пористой вставке



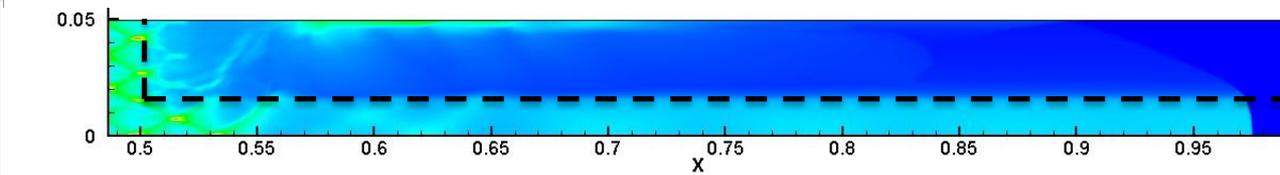
Критические условия срыва детонации для микронных и субмикронных частиц достаточно близки друг к другу.

Пористая вставка, занимающая часть канала

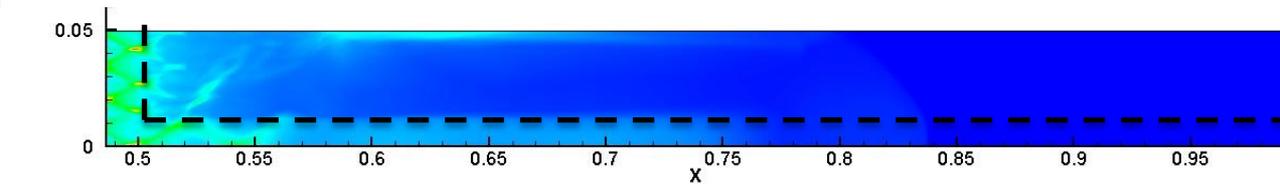
$$d_2=1\text{мкм}, d_3=100\text{ мкм}, m_3=1\cdot 10^{-2}$$



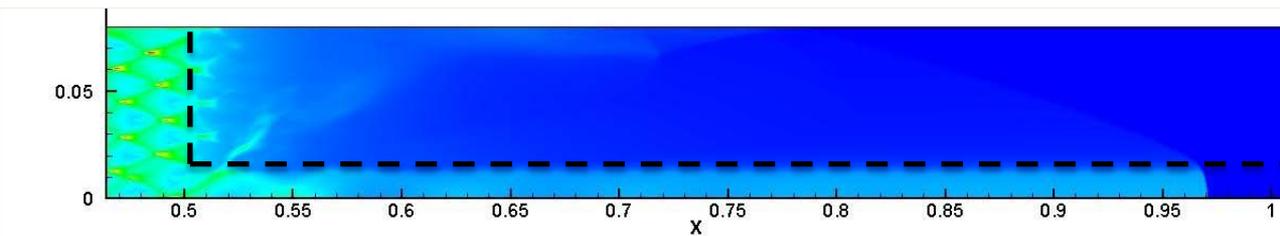
$$h_1=2.5\text{ cm}, D=1.5\text{ км/с}$$



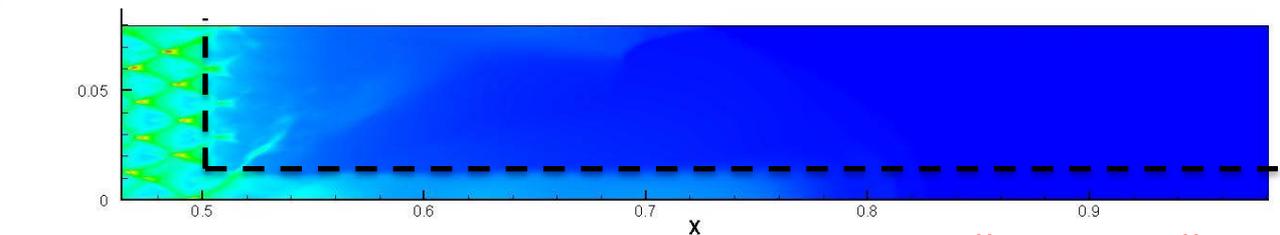
$$h_1=1.5\text{ cm}, D=1.48\text{ км/с}$$



$$h_1=1.2\text{ cm}, D=0.7\text{ км/с}$$



$$h_1=1.3\text{ cm}, D=1.4\text{ км/с}$$

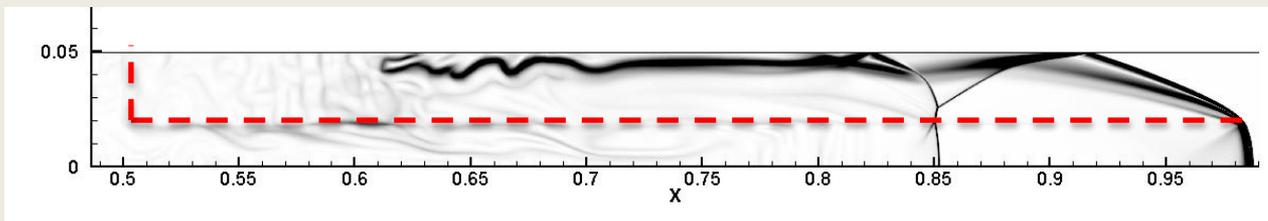


$$h_1=1.2\text{ cm}, D=0.7\text{ км/с}$$

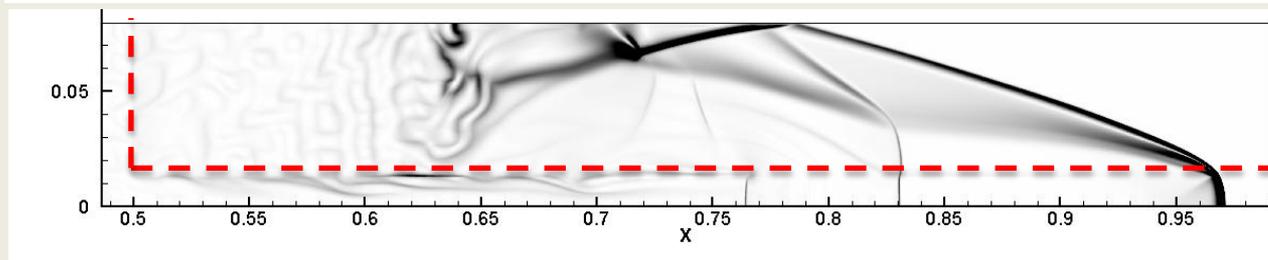
Критическая ширина канала остается той же самой – 12мм.

Пористая вставка, занимающая часть канала

$d_2=1$ мкм

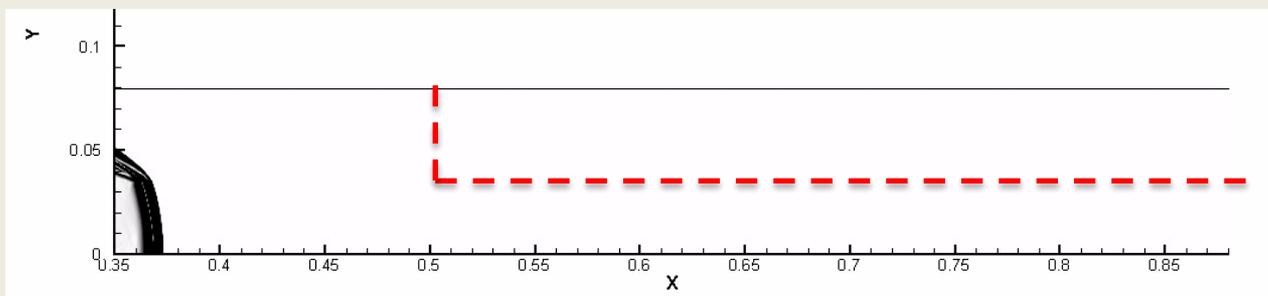


$d_3=100 \mu\text{m}$, $m_3=1 \cdot 10^{-2}$
 $h_1=1.8$ cm, $D=1.48$ km/s



$d_3=100 \mu\text{m}$, $m_3=1 \cdot 10^{-2}$
 $h_1=1.3$ cm, $D=1.4$ km/s

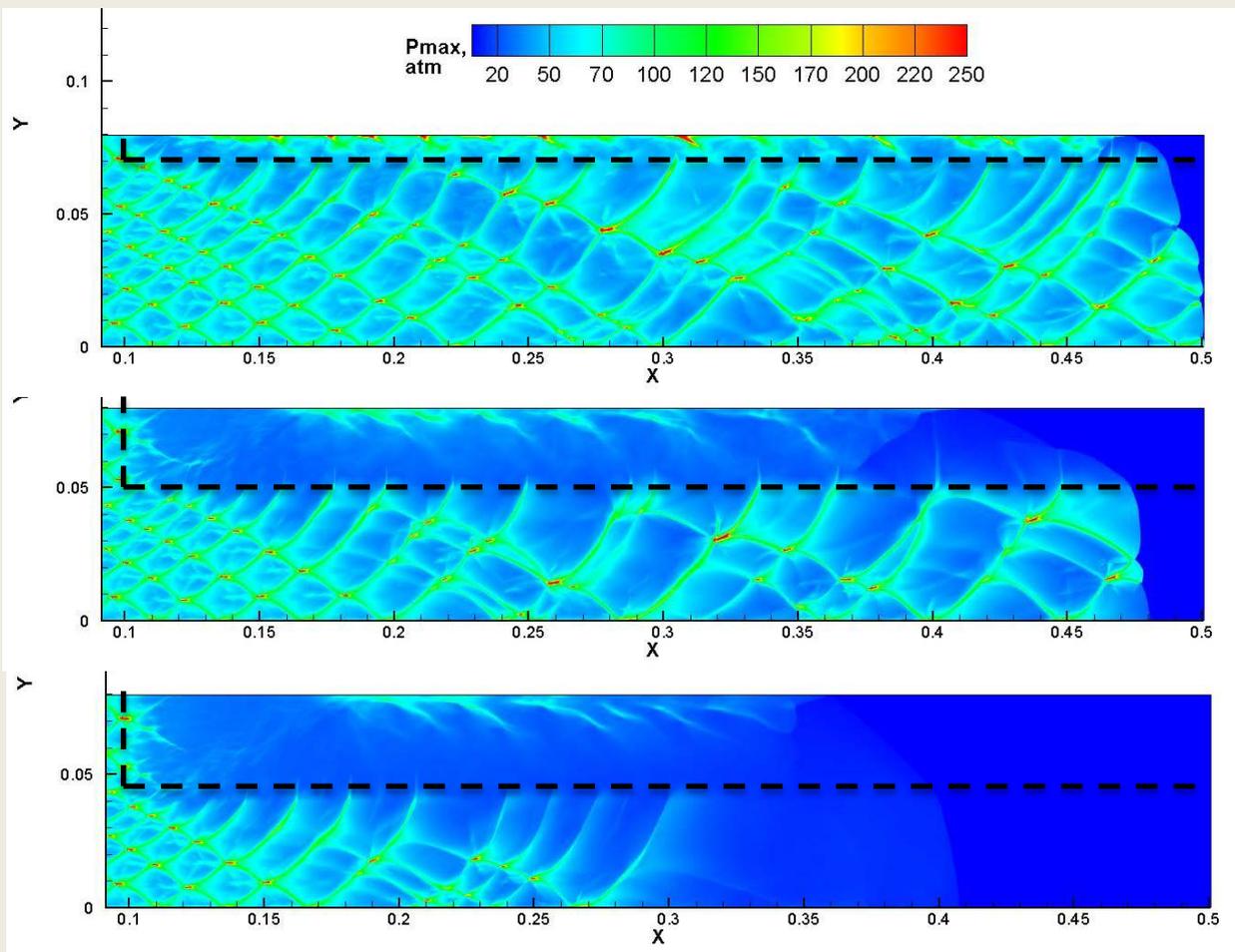
$d_2=3.5$ мкм



$d_3=100 \mu\text{m}$, $m_3=1 \cdot 10^{-2}$
 $h_1=3.5$ cm, $D=0.85$ км/с

Образуется сложная структура с наклонными ударными волнами и фронтами вторичных скачков уплотнения. Горение в пористой зоне продолжается за косым фронтом ударной волны. Вблизи верхней стенки образуются неустойчивости.

Пористая вставка, занимающая часть канала



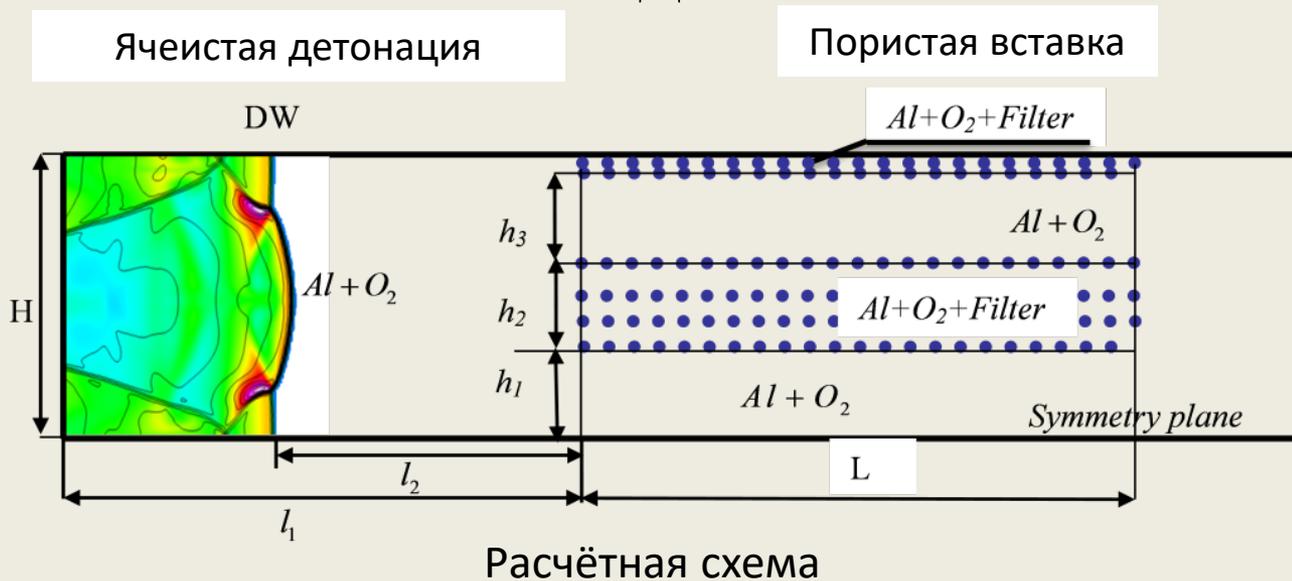
$$d_3 = 100 \mu\text{m}, m_3 = 1 \cdot 10^{-2}$$
$$h_1 = 7.0 \text{ cm}, D = 1.55 \text{ км/с}$$

$$d_3 = 100 \mu\text{m}, m_3 = 1 \cdot 10^{-2}$$
$$h_1 = 5.0 \text{ cm}, D = 1.5 \text{ км/с}$$

$$d_3 = 100 \mu\text{m}, m_3 = 1 \cdot 10^{-2}$$
$$h_1 = 4.5 \text{ cm}, D = 0.7 \text{ км/с}$$

Срыв детонации происходит при ширине открытого пространства 4,5 см. Видно, что по открытому пространству проходит только одна поперечная волна, и этого недостаточно для повторного инициирования детонации. Это приводит к провалу детонации.

3. Конечная пористая вставка. Постановка задачи



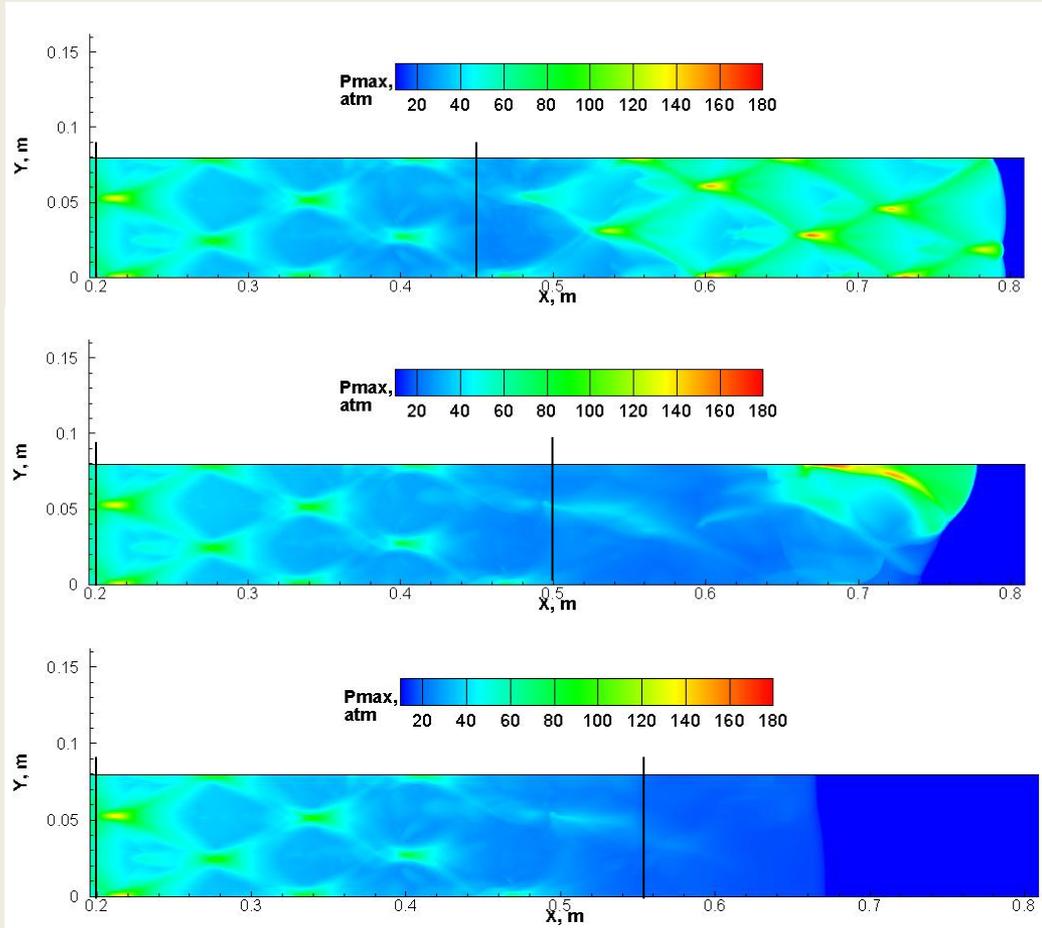
Расчётная схема

Параметры пористой вставки:

- Пористая вставка формируется из статических цилиндров ($d_3=50 \dots 200$ мкм);
- Объемная концентрация ($1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-3}$)
- Высота пористой вставки ($h_1=1 \dots 9$ см)
- Длина пористой вставки $L=10 \dots 150$ см

Пористая вставка конечной длины

$d_3=100 \text{ мкм}, m_3 = 4.2 \cdot 10^{-2}$



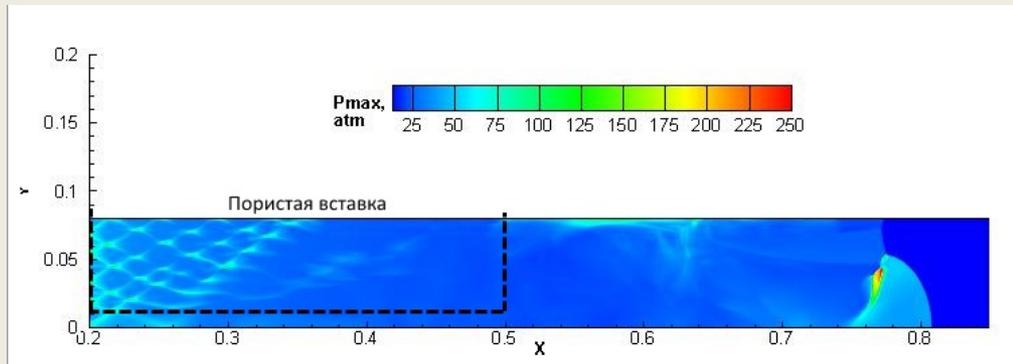
$d_2=3.5 \text{ }\mu\text{m}$
 $L=25 \text{ cm}$

$d_2=3.5 \text{ }\mu\text{m}$
 $L=30 \text{ cm}$

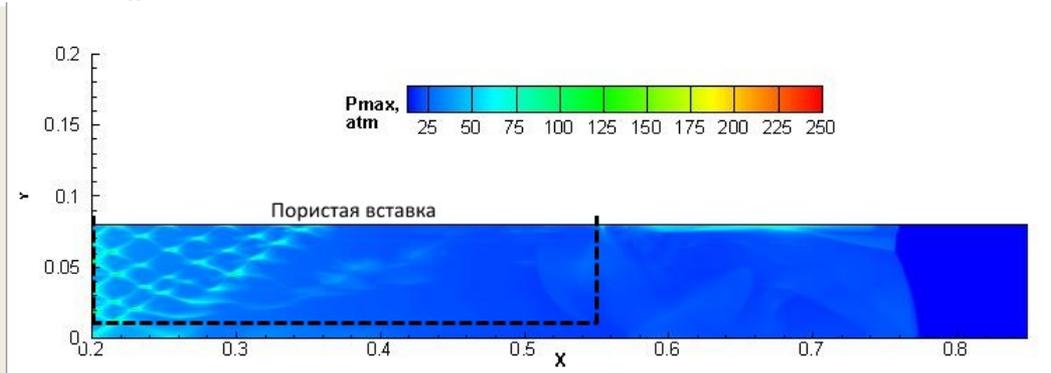
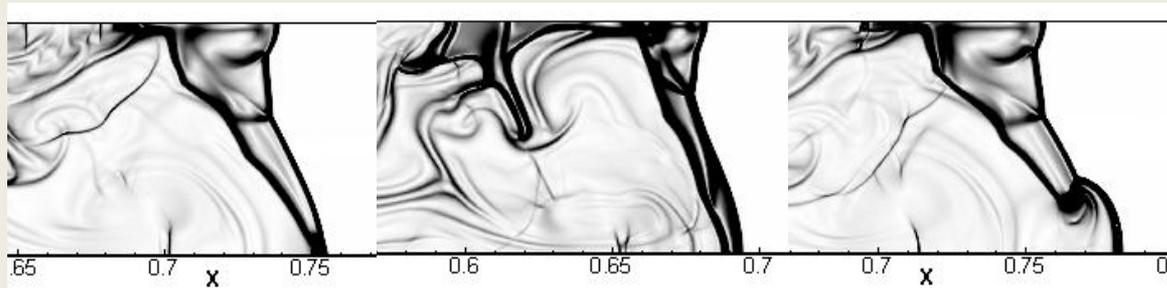
$d_2=3.5 \text{ }\mu\text{m}$
 $L=35 \text{ cm}$

Пористая вставка конечной длины

$$d_3 = 100 \text{ мкм}, m_3 = 4.5 \cdot 10^{-2}$$



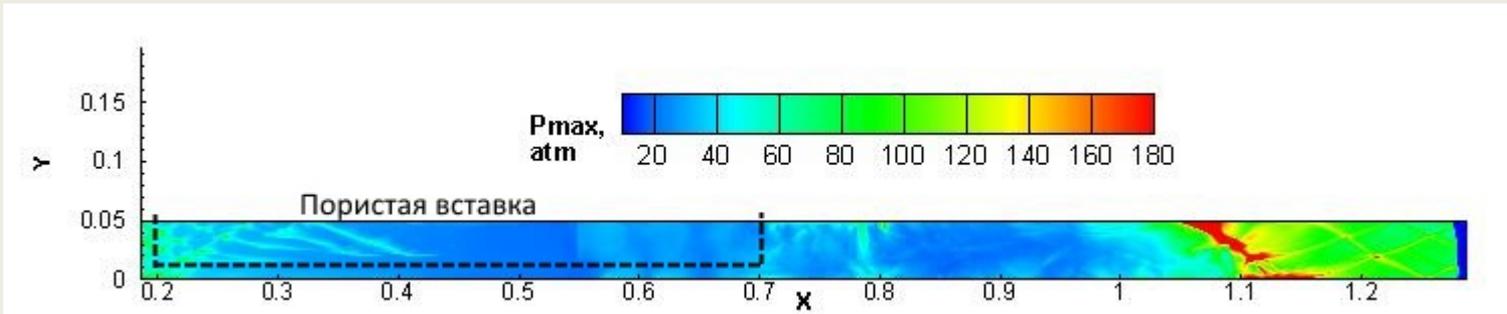
$d_2 = 1 \text{ }\mu\text{m}$
 $h_1 = 1.1 \text{ cm}$
 $L = 30 \text{ cm}$



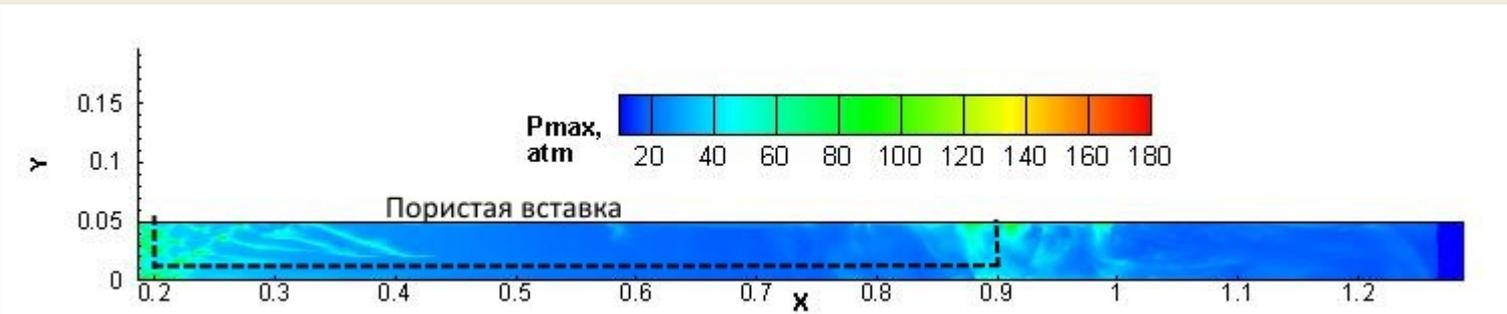
$d_2 = 1 \text{ }\mu\text{m}$
 $h_1 = 1.1 \text{ cm}$
 $L = 35 \text{ cm}$

Пористая вставка конечной длины

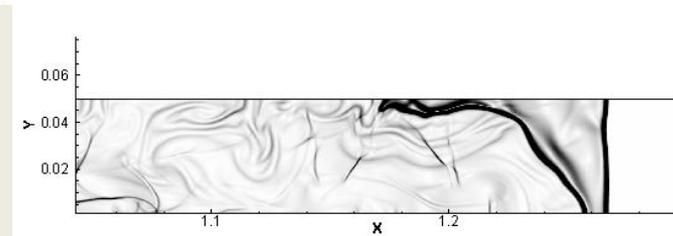
$d_3=100 \text{ мкм}, m_3=4.5 \cdot 10^{-2}$



$d_2=1 \mu\text{m}$
 $h_1=1.1 \text{ cm}$
 $L=50 \text{ cm}$



$d_2=1 \mu\text{m}$
 $h_1=1.1 \text{ cm}$
 $L=70 \text{ cm}$



Значительное увеличение пористого элемента

Выводы

- В ходе исследования изучены основные режимы распространения детонации в каналах с пористыми вставками занимающими часть или всю ширину канала. Для пористых вставок, занимающих весь канал, найдена зависимость нормированной скорости детонационной волны в пористой зоне от объемной концентрации. Критические условия для микронных и субмикронных частиц близки друг к другу.
- В каналах с пористой вставкой, занимающей часть канала, существует критическая ширина канала, при которой происходит срыв детонации. Для частиц диаметром 3.5 мкм критическая ширина составляет 45 мм, для частиц 1мкм – 12мм, а для наночастиц 200 нм – 45 мм. В смеси наночастиц наличие одной поперечной волны приводит к срыву детонации.
- Определена критическая длина пористого элемента при которой происходит срыв детонации. Критическая длина канала, необходимая для срыва распространения детонационной волны, для микронных и субмикронных частиц составила около 50 см.
- Выявлена зависимость длины пористого элемента от ширины канала. В узких каналах критическая длина пористой вставки увеличивается до 1 метра.

Спасибо за внимание!