



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯЧЕЙСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ ВОДОРОД – ВОЗДУХ И ВОДОРОД – КИСЛОРОД – АРГОН С ИНЕРТНЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Тропин Д.А., Вышегородцев К.А.

**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия**

Забабахинские научные чтения, 29 мая – 2 июня 2023 г., Снежинск, Россия

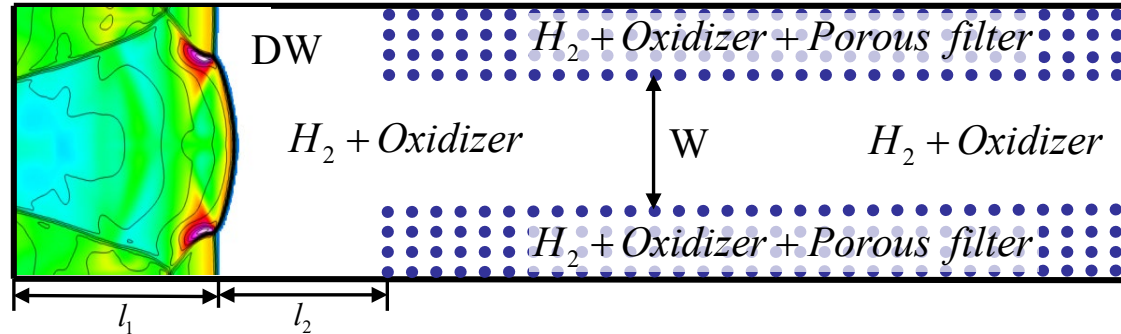


Актуальность исследования

Вопросы детонации газовзвесей реагирующих газов и твердых инертных частиц привлекают внимание многочисленных исследователей. Вызвано это тем обстоятельством, что при транспортировке смесей горючих газов к местам потребления, при использовании в промышленных производствах и быту происходят *аварийные взрывы*. Кроме того, при добыче угля в угольных шахтах выделяются взрывоопасные газы (природный газ, который состоит в основном из метана с небольшими количествами этана и других углеводородов), которые являются источником взрывов.

Встает вопрос *предотвращения* таких катастрофических взрывов. Одним из методов борьбы является добавление инертных компонент к реагирующей газовой смеси. Это приводит к различным картинам протекания детонации.

Физико-математическая постановка задачи



$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1^2 + m_1 p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 v_1)}{\partial y} = -f_x$$

$$\frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 v_1^2 + m_1 p)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 v_1)}{\partial x} = -f_y$$

$$\frac{\partial(\rho_1 E_1)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho_1 u_1 \left(E_1 + m_1 \frac{p}{\rho_1}\right)\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\rho_1 v_1 \left(E_1 + m_1 \frac{p}{\rho_1}\right)\right)}{\partial y} = -q - f_x u_1 - f_y v_1$$

$$\rho_2 c_{p,2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = q + f_x u_1 + f_y v_1$$

$$p = \rho T R \sum_{\alpha=1}^N \frac{\xi_{\alpha}}{M_{\alpha}} \quad E_1 = e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2}$$

$$e_1 = c_{v,1} T_1 + \sum_{\alpha=1}^N \xi_{\alpha} H_{\alpha}^f(0) - c_p T_{00}$$

Межфазное взаимодействие:

$$f_x = \frac{3m_2 \rho_{11}}{4d} C_{Dx} |u_1| u_1 \quad f_y = \frac{3m_2 \rho_{11}}{4d} C_{Dy} |v_1| v_1$$

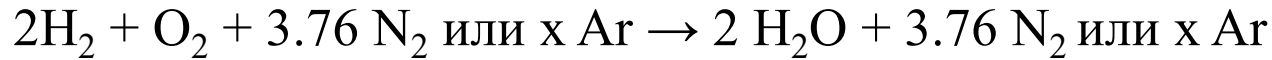
$$C_{Dx} = \left(1 + \exp\left(-\frac{0.43}{M_{12x}^{4.67}}\right)\right) \left(0.38 + \frac{24}{Re_x} + \frac{4}{\sqrt{Re_x}}\right)$$

$$C_{Dy} = \left(1 + \exp\left(-\frac{0.43}{M_{12y}^{4.67}}\right)\right) \left(0.38 + \frac{24}{Re_y} + \frac{4}{\sqrt{Re_y}}\right)$$

$$q = \frac{6m_2 \lambda_1}{d^2} Nu (T_1 - T_2)$$

Приведенная кинетика воспламенения и горения водорода

Горение смеси водорода с окислителем:



Одностадийная Аррениусовская кинетика:

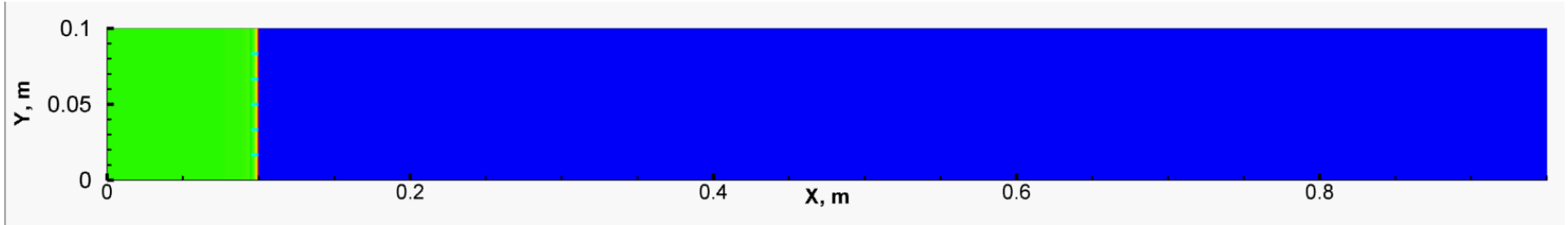
$$\frac{d\xi_i}{dt} = \chi_i, \quad i=1..3, \quad \text{где } \chi_i = -\nu_i \mu_i \chi$$

$$\chi = k \cdot T^w \cdot \left(\frac{\rho_{11} \xi_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2} \cdot 10^3} \right)^m \cdot \left(\frac{\rho_{11} \xi_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2} \cdot 10^3} \right)^n \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

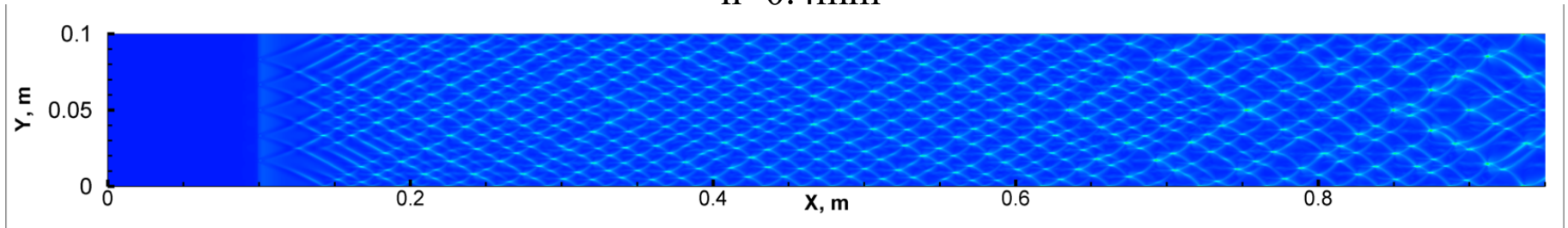
Константы модели, полученные в результате верификации:

$$E = 6 \cdot 10^4 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad w = 0.8 \quad m = n = 0.7 \quad k = 2 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^6$$

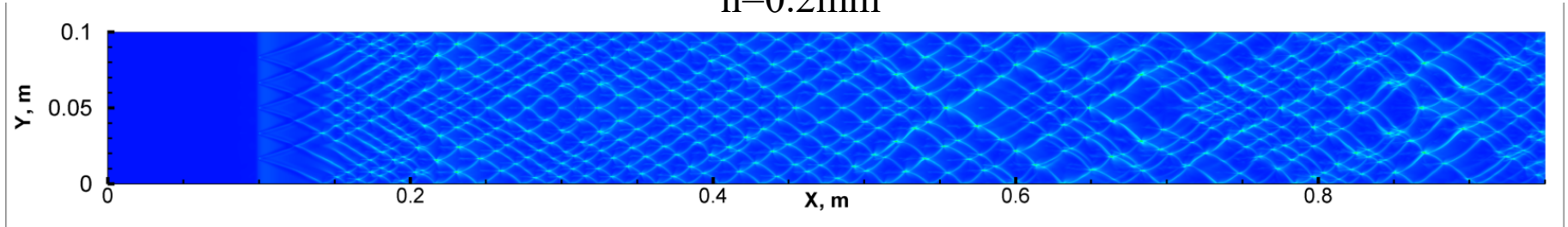
Формирование ячеистой структуры в водородо-воздушной смеси



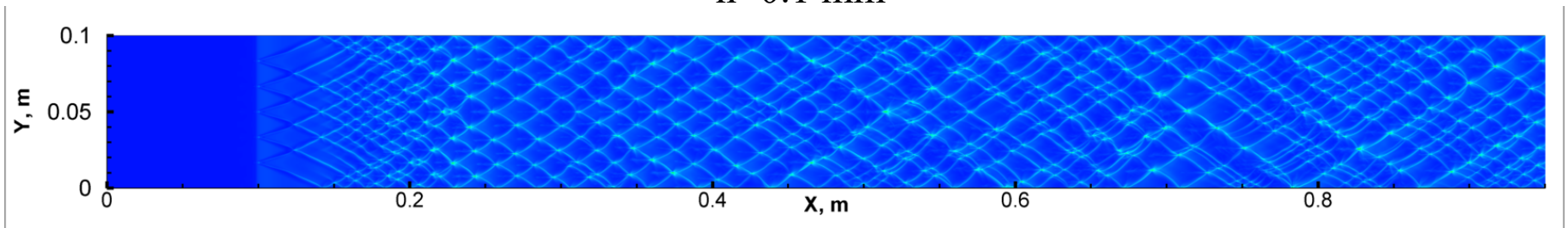
$h=0.4\text{mm}$



$h=0.2\text{mm}$

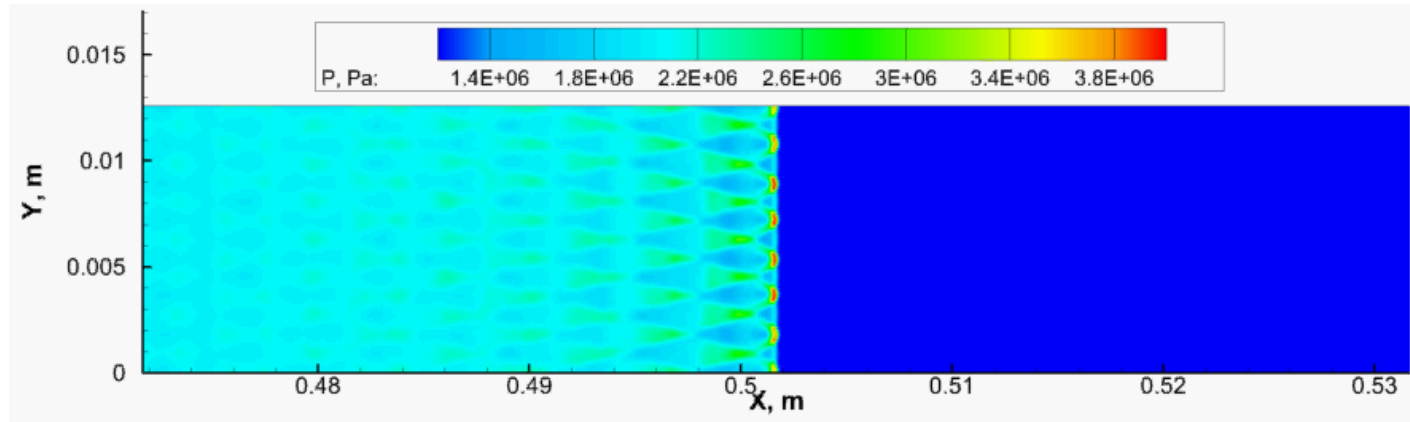


$h=0.1\text{mm}$

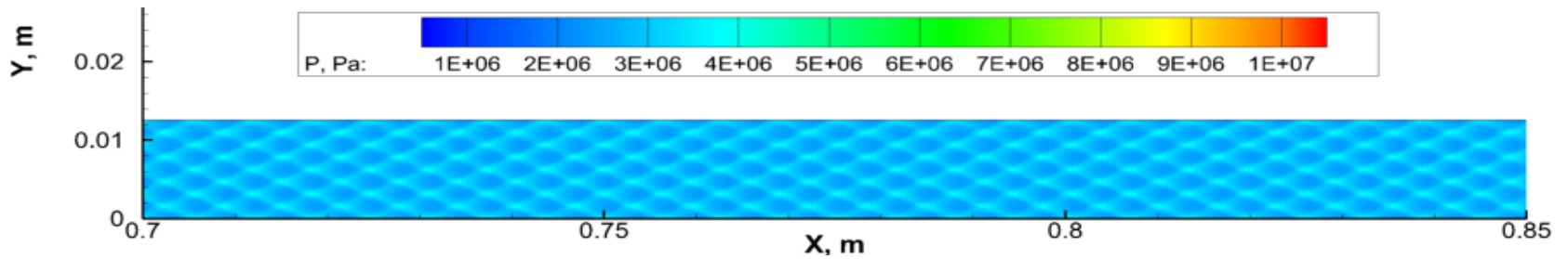


Средний размер детонационной ячейки в расчетах: 14.28 мм, в экспериментах: ~ 15 мм (Guirao 1982, Benedick 1984, Tieszen 1986). Умеренно нерегулярная структура.

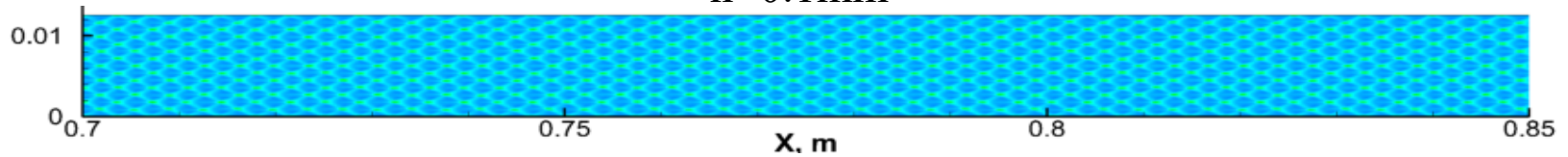
Ячеистая структура в смеси водород-кислород-аргон



$h=0.2\text{mm}$



$h=0.1\text{mm}$

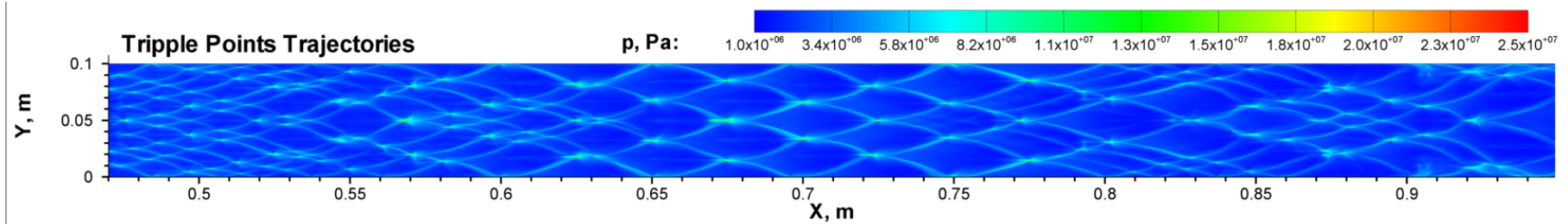
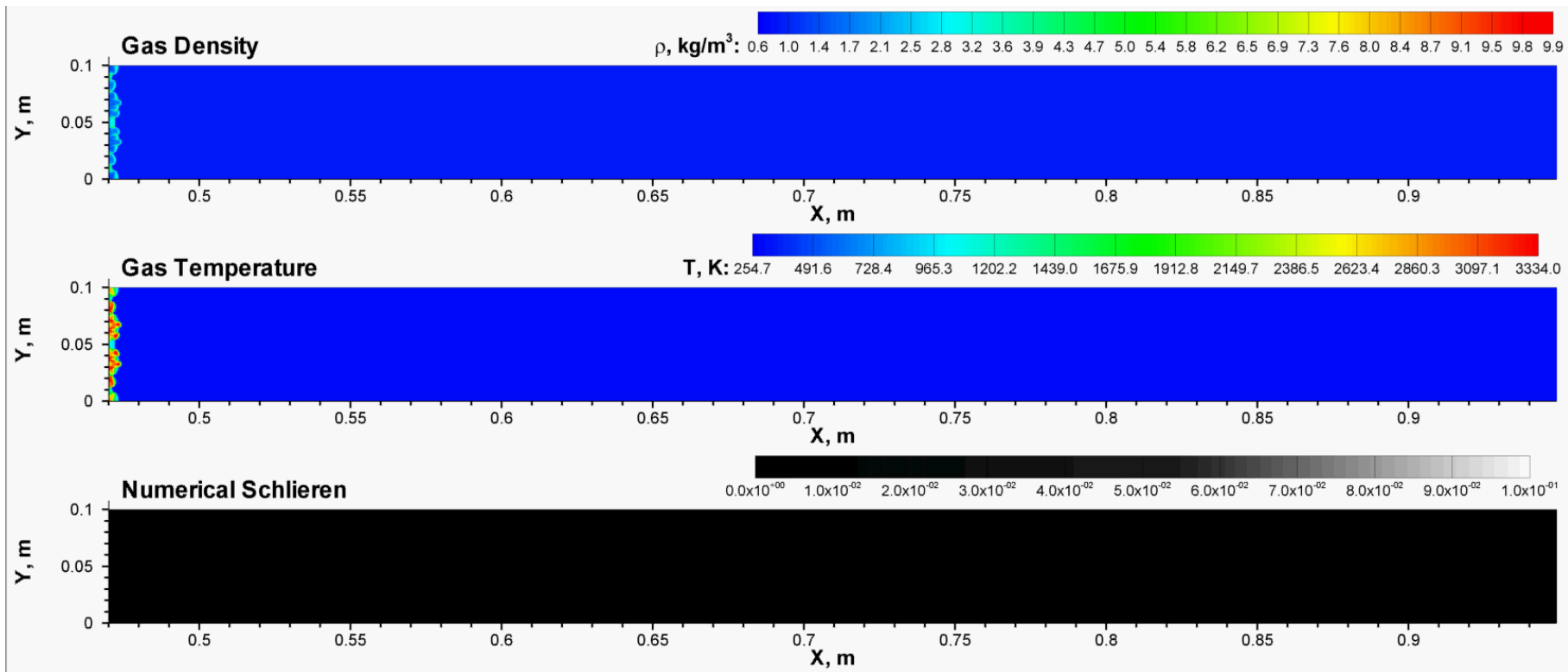


$h=0.05\text{mm}$

Размер детонационной ячейки в расчетах: 1.8 мм, в экспериментах: ~ 1.8 мм (Kumar 1990).
Регулярная ячеистая структура.

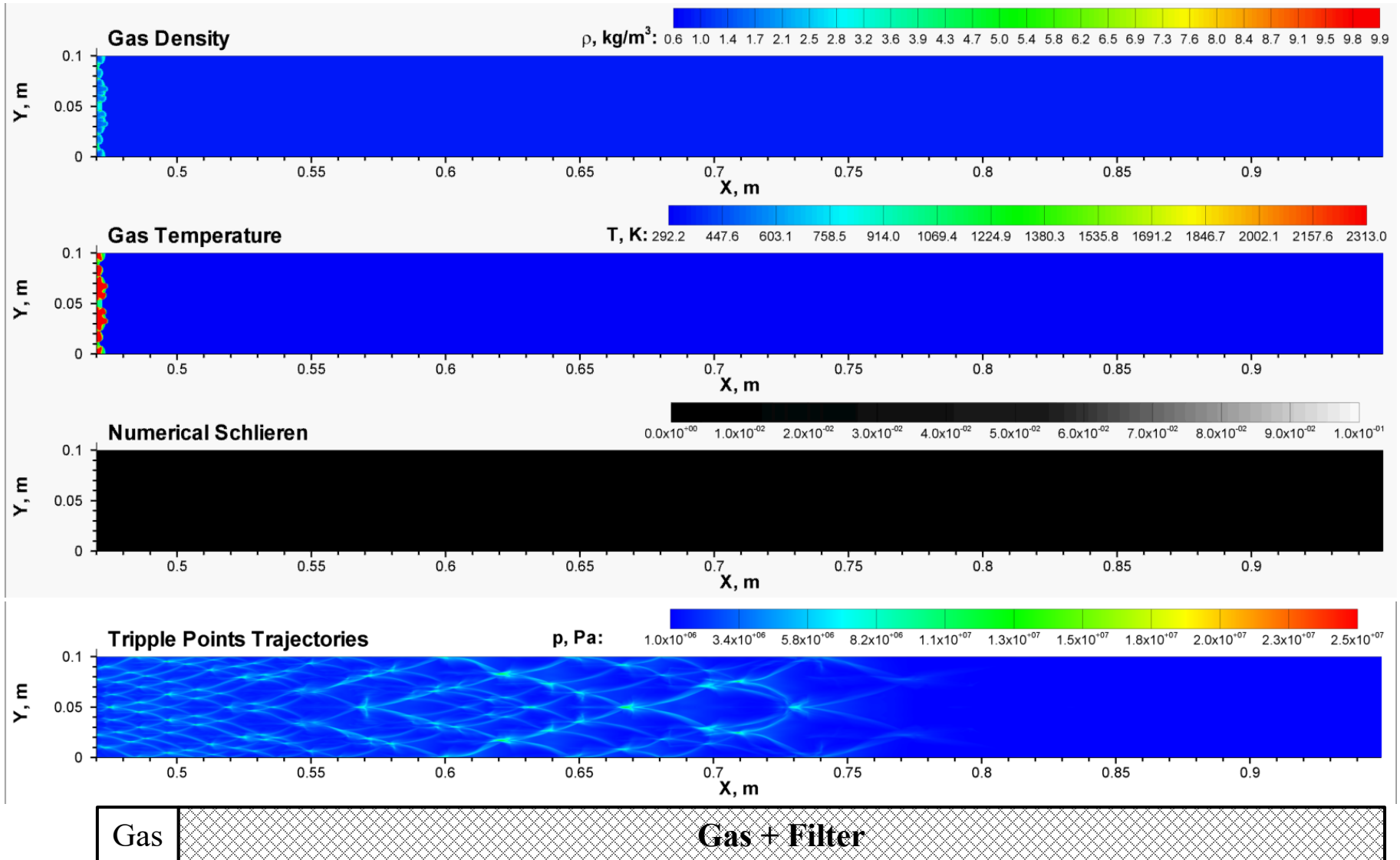
Ослабление детонации в водородо-воздушной смеси фильтром, перекрывающим всю ширину канала

$$d = 50 \mu\text{m}, \quad m_2 = 10^{-3}, \quad W = 0$$

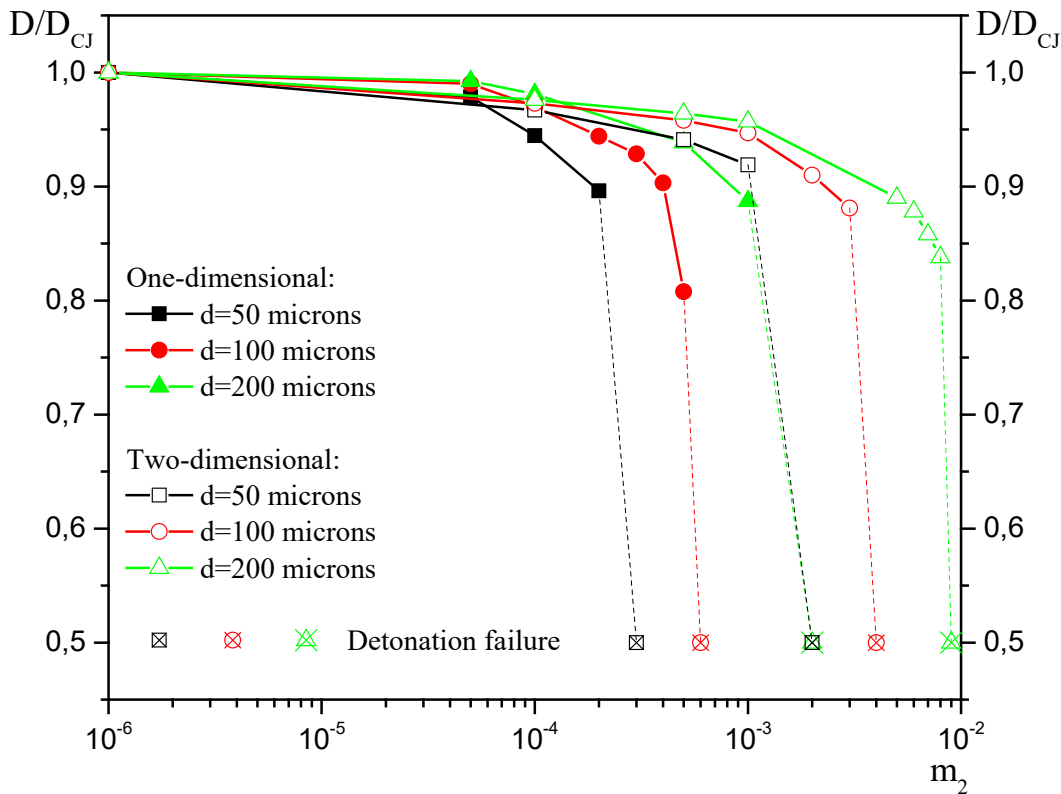


Срыв детонации в водородо-воздушной смеси фильтром, перекрывающим всю ширину канала

$$d = 50 \mu\text{m}, \quad m_2 = 2 \cdot 10^{-3}, \quad W = 0$$



Влияние объемной концентрации и диаметра частиц фильтра на скорость плоской и ячеистой детонационной волны



Зависимости нормированной скорости детонационной волны от объемной концентрации и диаметра твердой фазы

Ячеистая ДВ:

$$D_{CJ} = 1859 \text{ m / s}$$

Плоская ДВ:

$$D_{CJ} = 1919 \text{ m / s}$$

Уменьшение скорости ячеистой детонационной волны слабее, чем плоской детонационной волны.

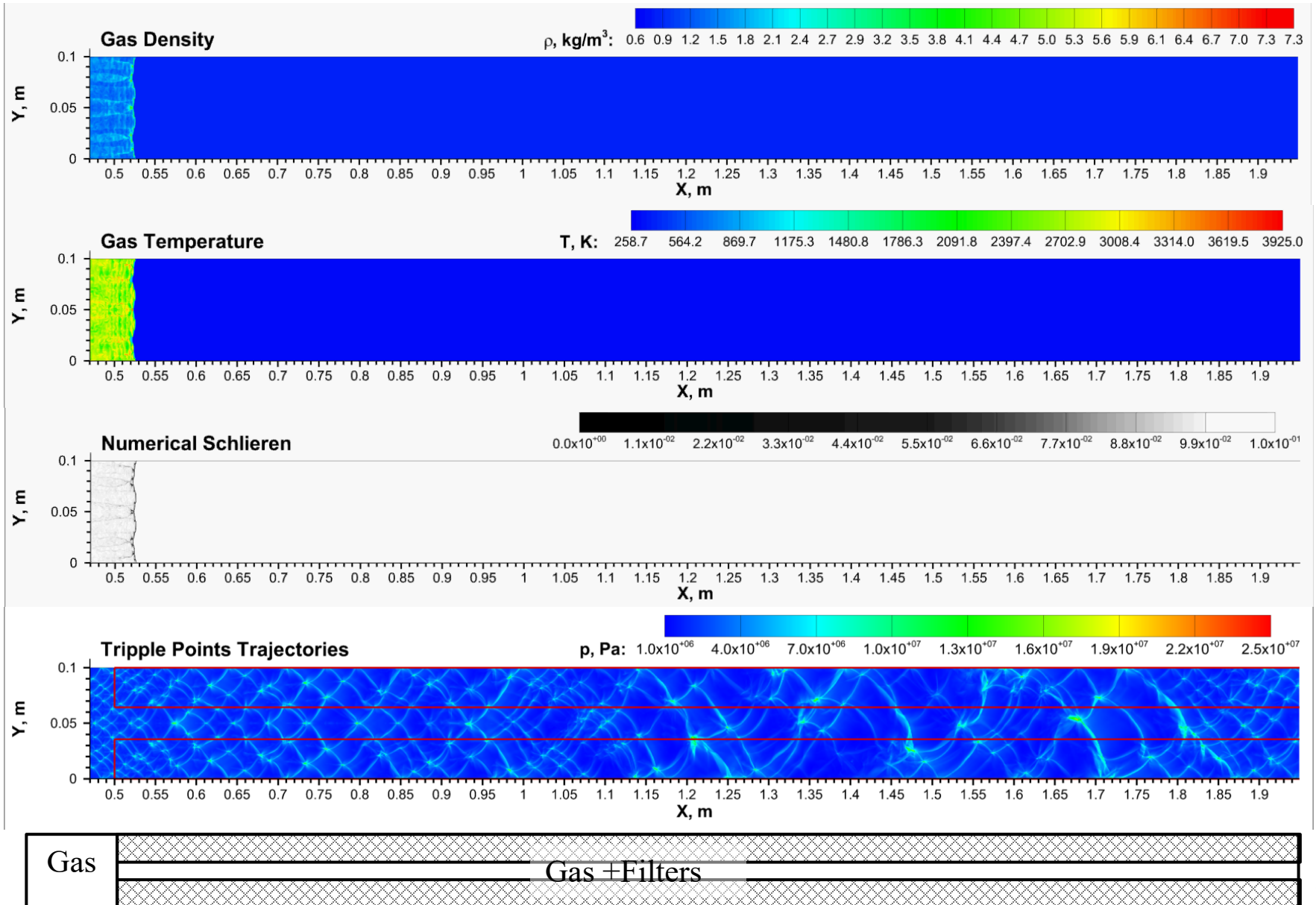
Концентрационные пределы ячеистой детонации почти на порядок превышают концентрационные пределы плоской детонационной волны.

Концентрационные пределы детонации

$d = 50 \mu\text{m}$		$d = 100 \mu\text{m}$		$d = 200 \mu\text{m}$	
1D	2D	1D	2D	1D	2D
$m_2^* = 3 \cdot 10^{-4}$	$m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$	$m_2^* = 6 \cdot 10^{-4}$	$m_2^* = 4 \cdot 10^{-3}$	$m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$	$m_2^* = 8 \cdot 10^{-3}$

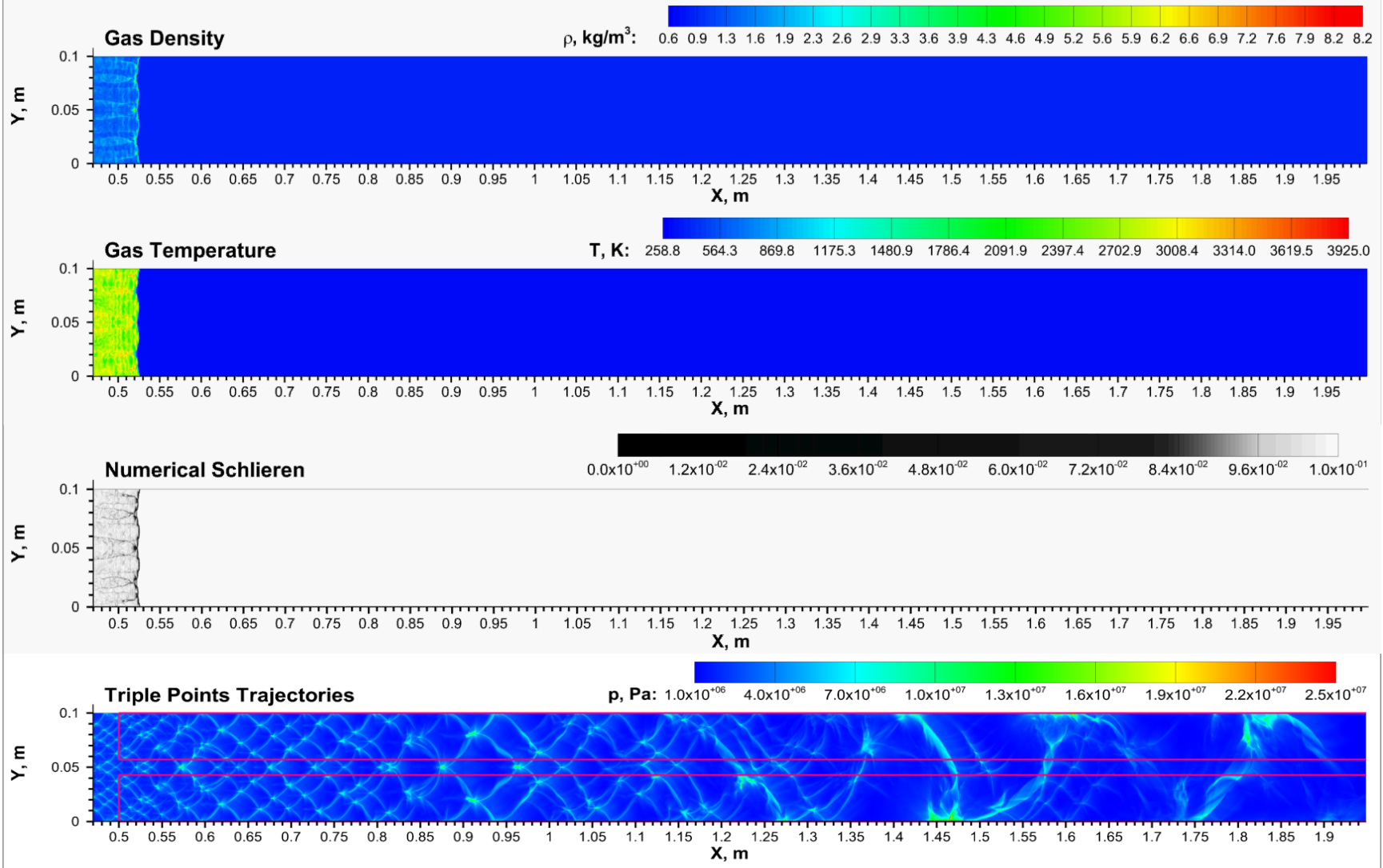
Ослабление детонации в водородо-воздушной смеси системой двух фильтров

$$d = 200 \mu\text{m}, \quad m_2 = m_2^* = 8 \cdot 10^{-3}, \quad N = 2, \quad R = 2.5 \lambda_0, \quad W = 2 \lambda_0$$

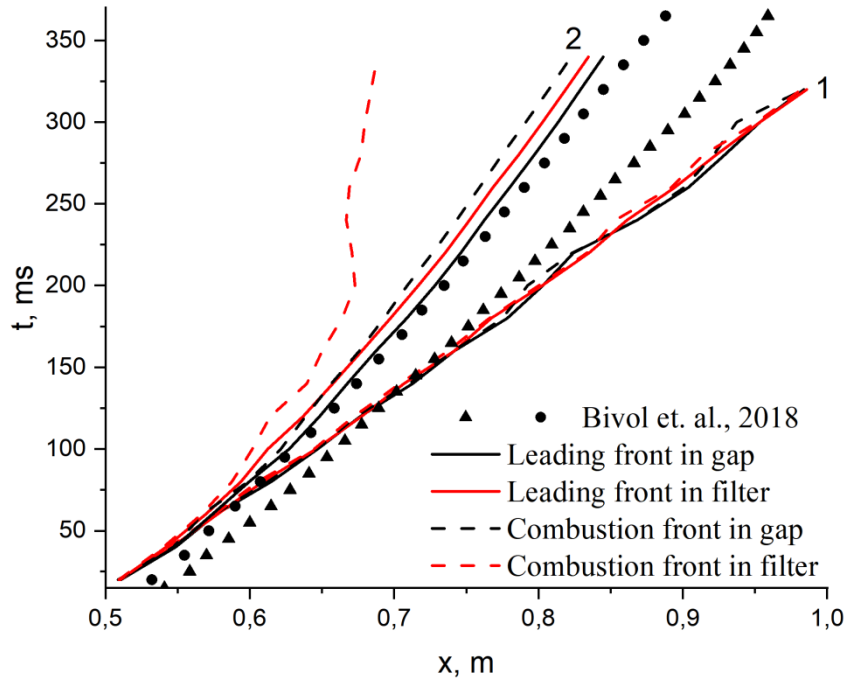


Срыв детонации в водородо-воздушной смеси системой двух фильтров

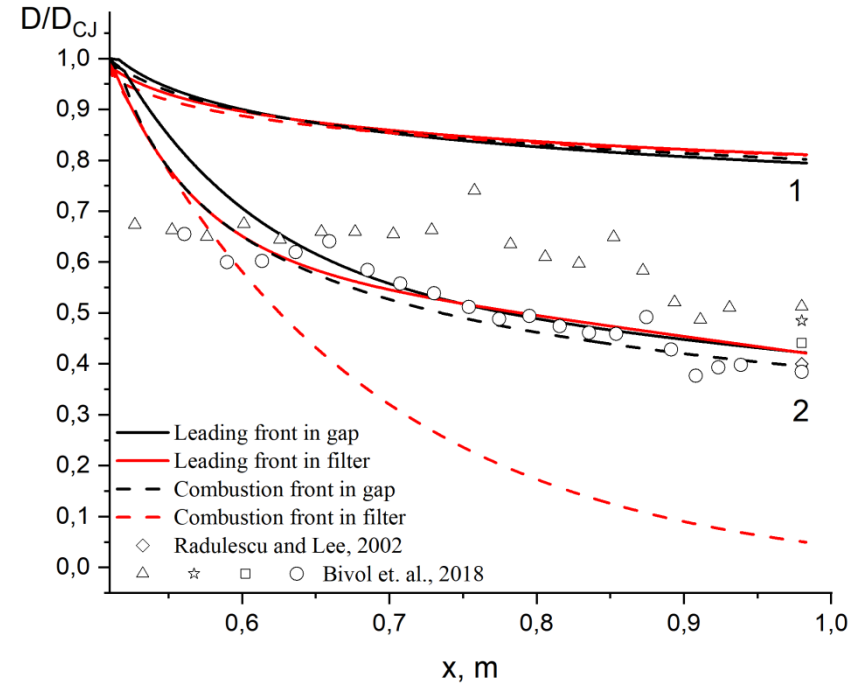
$$d = 200 \mu\text{m}, \quad m_2 = m_2^* = 8 \cdot 10^{-3}, \quad N = 2, \quad R = 3\lambda_0, \quad W = \lambda_0$$



Влияние параметров фильтра на скорость ячеистой детонационной волны



Траектории фронтов



Скорости фронтов

1 – Ослабление ДВ при $d=50\text{мкм}$, $m_2=m_2^*$; 2 – Срыв ДВ при $d=50\text{мкм}$, $m_2=2m_2^*$

Radulescu and Lee, 2002: Стальная сетка с 4 проводами на 1мм, диаметр провода 114 мкм, пористость 30.3%;

Bivol et. al, 2018:

▲ – полиуретановая пена плотностью 0.03 г/см^3 , пористость 95%, средний размер пор 0.8мм, толщина фильтра 10мм;

● – стальная вата плотностью 0.075 г/см^3 , пористость 99%, средний размер волокна 30мкм, толщина фильтра 10мм.

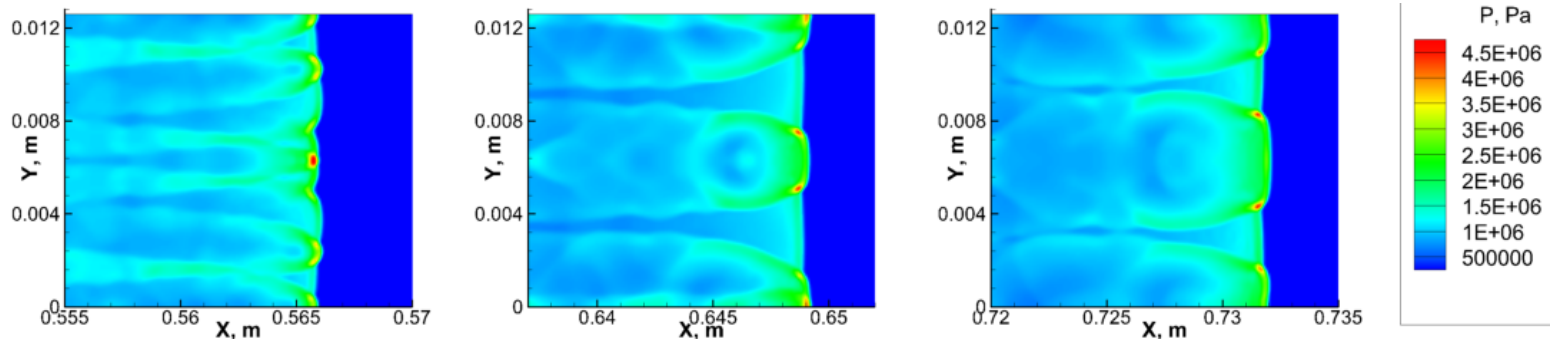
Карта детонационных режимов в водородо-воздушной смеси в системе из двух фильтров

d , мкм	m_2 / m_2^*	W / λ_0	BR	Режим
50	1	≤ 1.8	≥ 0.74	Срыв ДВ
		> 1.8	< 0.74	Ослабленная ДВ
	2	≤ 4.2	≥ 0.4	Срыв ДВ
		> 4.2	< 0.4	Ослабленная ДВ
	4	≤ 5.4	≥ 0.228	Срыв ДВ
		> 5.4	< 0.228	Ослабленная ДВ
	8	≤ 5.9	≥ 0.157	Срыв ДВ
		> 5.9	< 0.157	Ослабленная ДВ
100	1	≤ 1.2	≥ 0.828	Срыв ДВ
		> 1.2	< 0.828	Ослабленная ДВ
	2	≤ 3.7	≥ 0.471	Срыв ДВ
		> 3.7	< 0.471	Ослабленная ДВ
	4	≤ 5.2	≥ 0.257	Срыв ДВ
		> 5.2	< 0.257	Ослабленная ДВ
	8	≤ 5.7	≥ 0.185	Срыв ДВ
		> 5.7	< 0.185	Ослабленная ДВ
200	1	≤ 1.2	≥ 0.828	Срыв ДВ
		> 1.2	< 0.828	Ослабленная ДВ
	2	≤ 3.4	≥ 0.514	Срыв ДВ
		> 3.4	< 0.514	Ослабленная ДВ
	4	≤ 4.9	≥ 0.3	Срыв ДВ
		> 4.9	< 0.3	Ослабленная ДВ
	8	≤ 5.7	≥ 0.185	Срыв ДВ
		> 5.7	< 0.185	Ослабленная ДВ

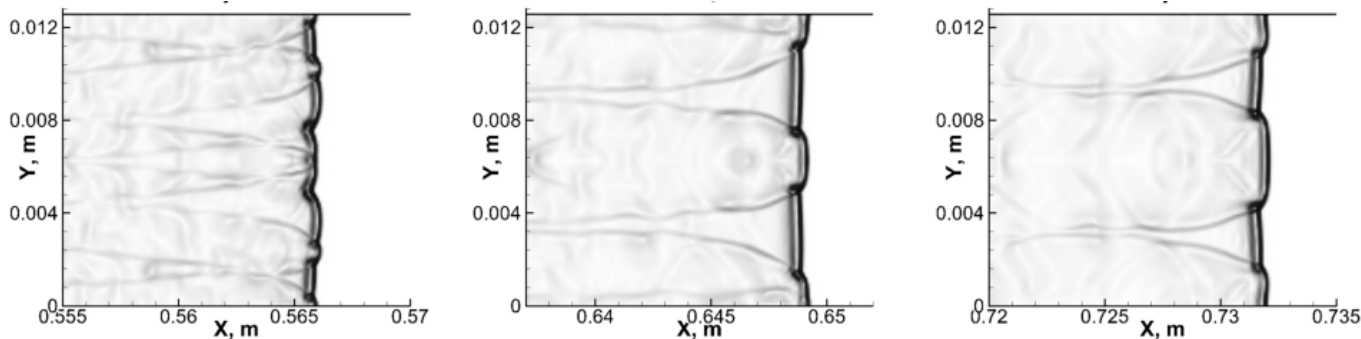
Ослабление детонации в смеси водород-кислород-аргон фильтром, перекрывающим всю ширину канала

$$d = 100 \mu\text{m}, \quad m_2 = 2 \cdot 10^{-2}$$

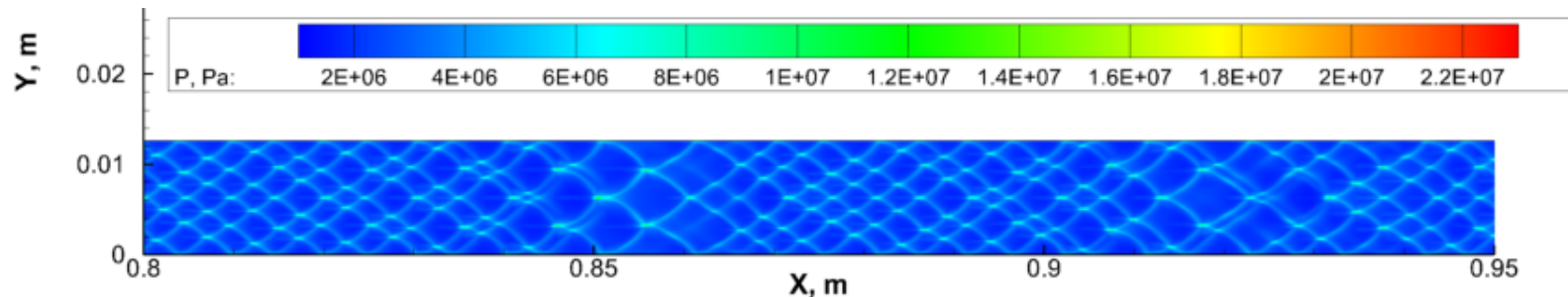
Gas Pressure



Numerical Schlieren



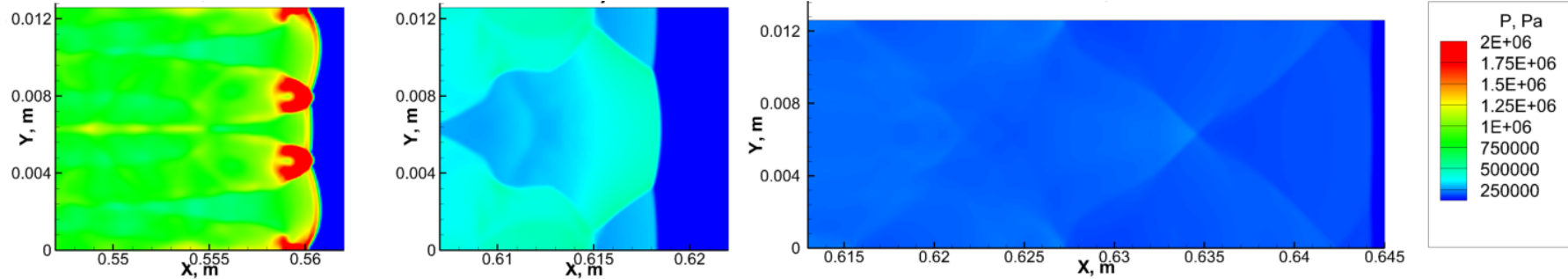
Triple Points Trajectories



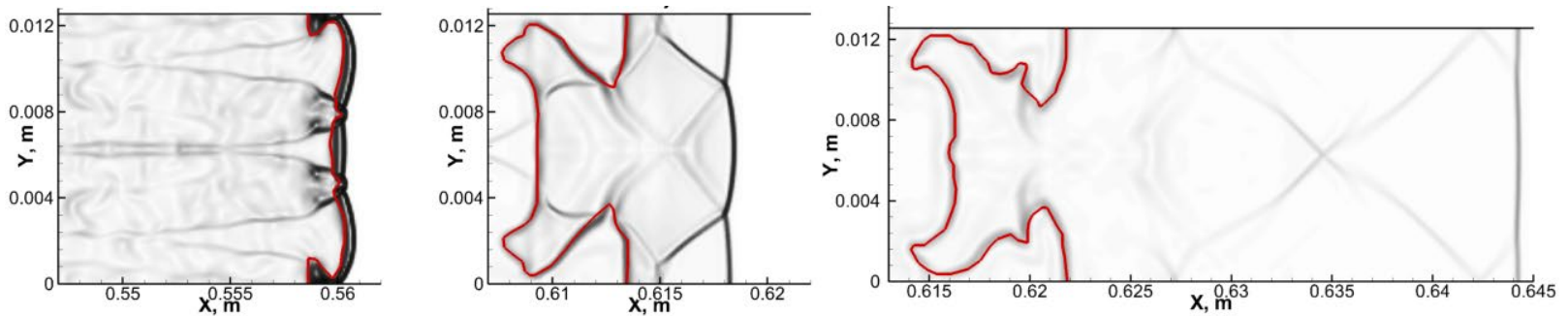
Ослабление детонации в смеси водород-кислород-аргон фильтром, перекрывающим всю ширину канала

$$d = 100 \mu m, \quad m_2 = 4 \cdot 10^{-2}$$

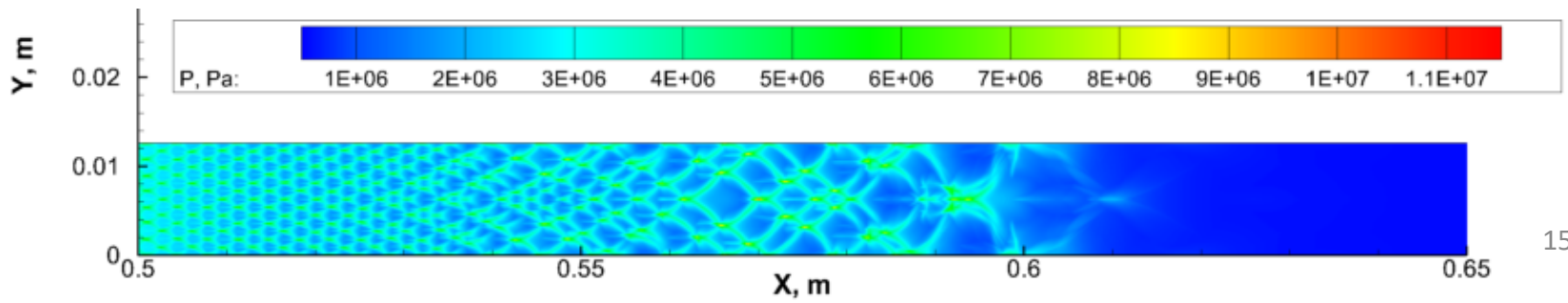
Gas Pressure



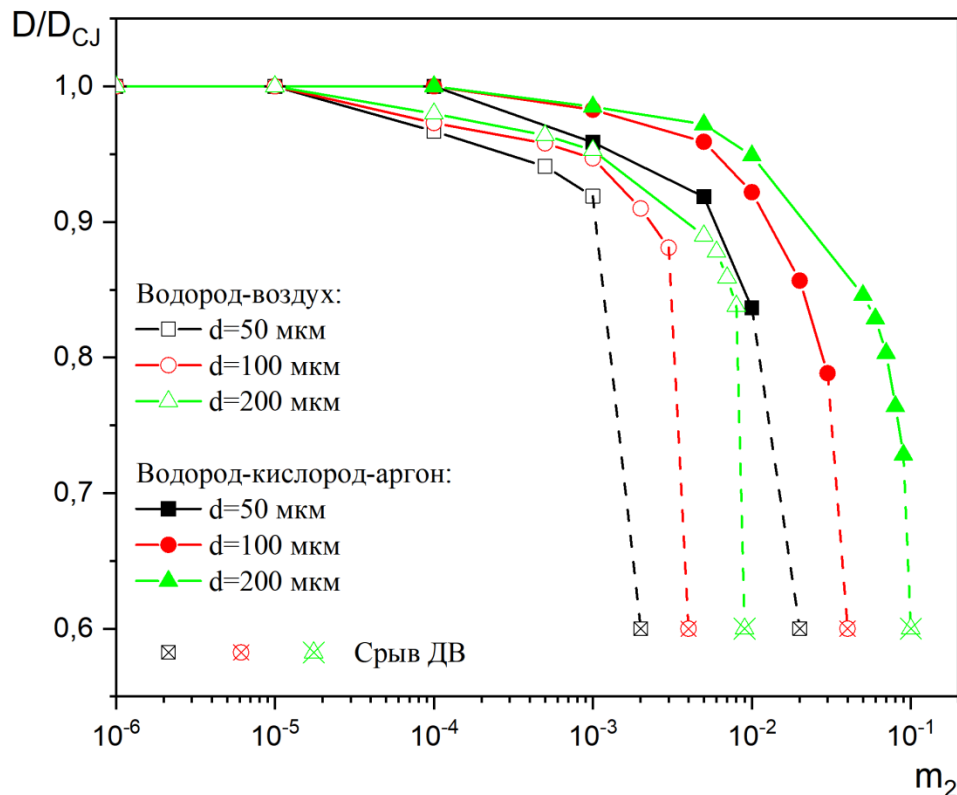
Numerical Schlieren



Triple Points Trajectories



Влияние объемной концентрации и диаметра частиц фильтра на скорость детонационной волны в смесях водород-воздух и водород-кислород-аргон



Водород-воздух:

$$D_{CJ} = 1859 \text{ m / s}$$

Водород-кислород-аргон:

$$D_{CJ} = 1946 \text{ m / s}$$

Скорости ДВ перед срывом в смеси водород-кислород-аргон ниже, чем в смеси водород-воздух.

Концентрационные пределы детонации в смеси водород-кислород-аргон в 10 раз выше чем в смеси водород - воздух.

Зависимости нормированной скорости детонационной волны от объемной концентрации и диаметра твердой фазы

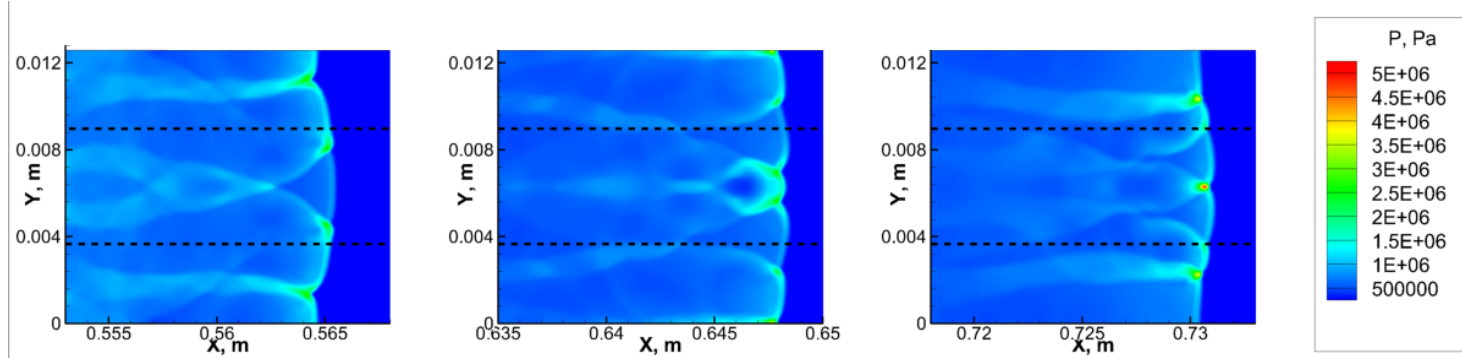
Концентрационные пределы детонации

$d = 50 \mu\text{m}$		$d = 100 \mu\text{m}$		$d = 200 \mu\text{m}$	
Ar	Air	Ar	Air	Ar	Air
$m_2^* = 2 \cdot 10^{-2}$	$m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$	$m_2^* = 4 \cdot 10^{-2}$	$m_2^* = 4 \cdot 10^{-3}$	$m_2^* = 0.1$	$m_2^* = 8 \cdot 10^{-3}$

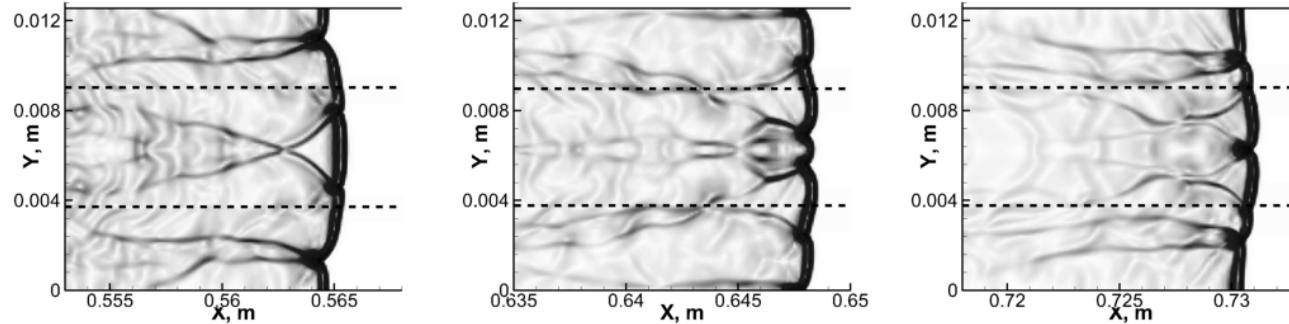
Ослабление детонации в смеси водород-кислород-аргон системой двух фильтров

$$d = 100 \mu m, \quad m_2 = m_2^* = 4 \cdot 10^{-2}, \quad N = 2, \quad R = 2\lambda_0, \quad W = 3\lambda_0$$

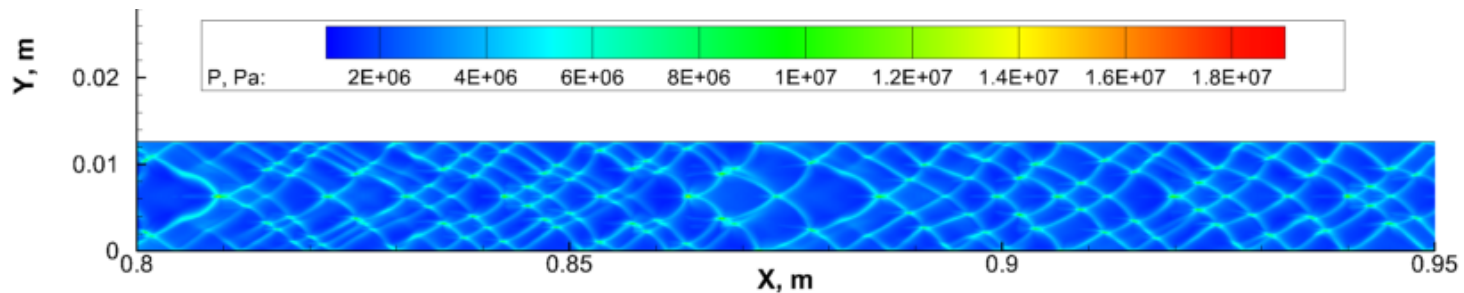
Gas Pressure



Numerical Schlieren



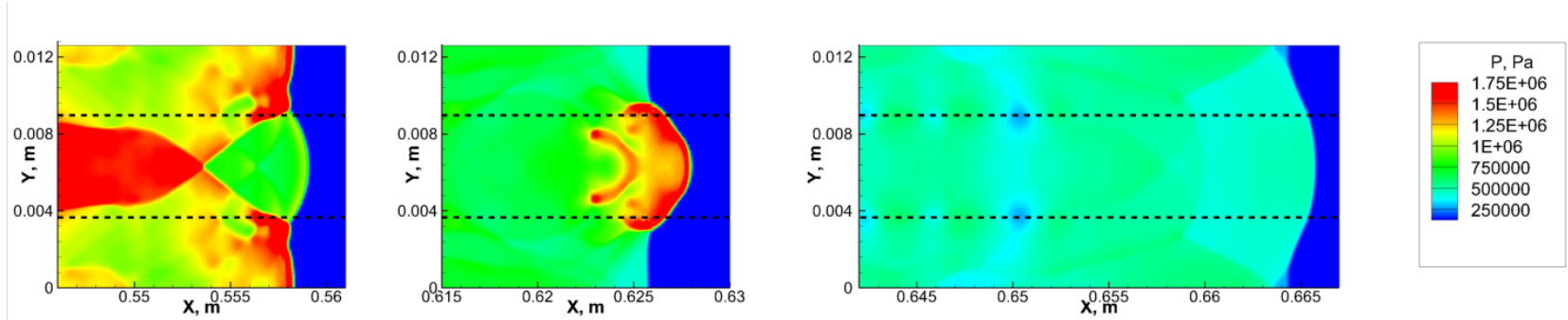
Triple Points Trajectories



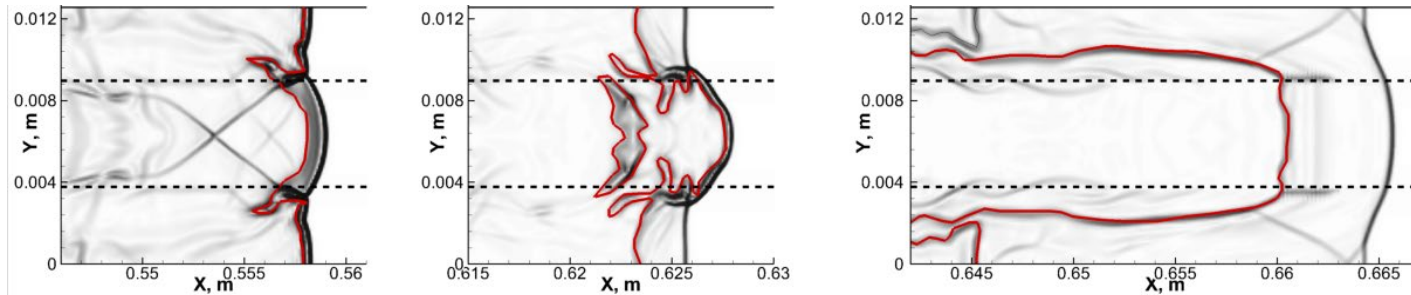
Срыв детонации в смеси водород-кислород-аргон системой двух фильтров

$$d = 100 \mu m, \quad m_2 = 2m_2^* = 8 \cdot 10^{-2}, \quad N = 2, \quad R = 2\lambda_0, \quad W = 3\lambda_0$$

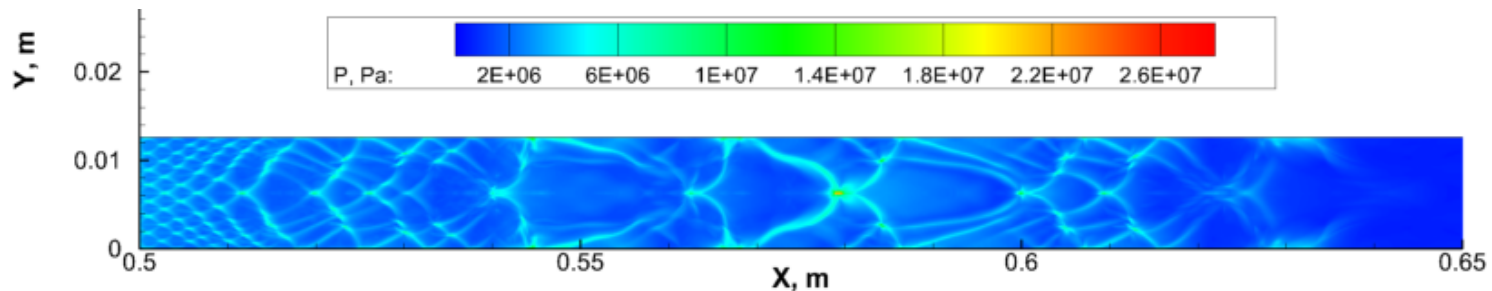
Gas Pressure



Numerical Schlieren



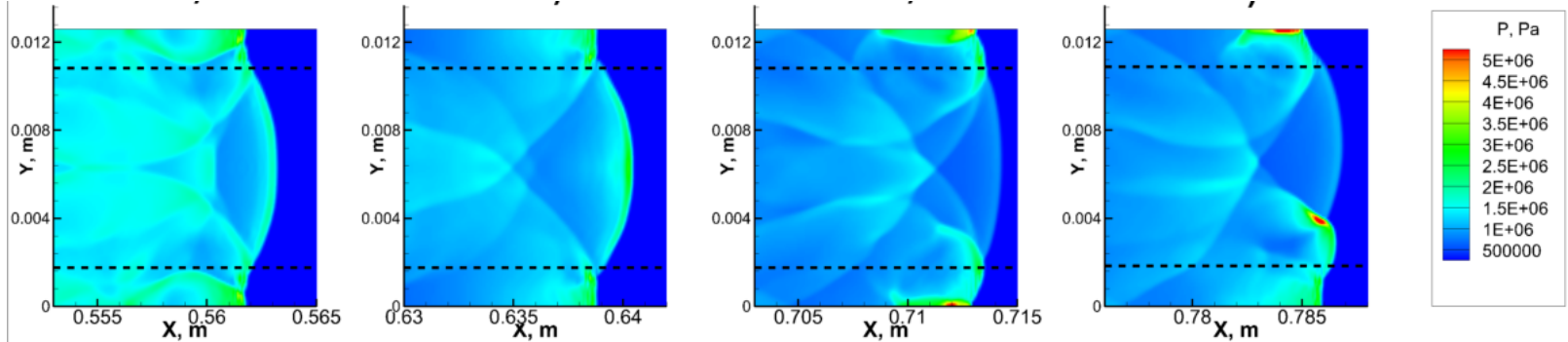
Triple Points Trajectories



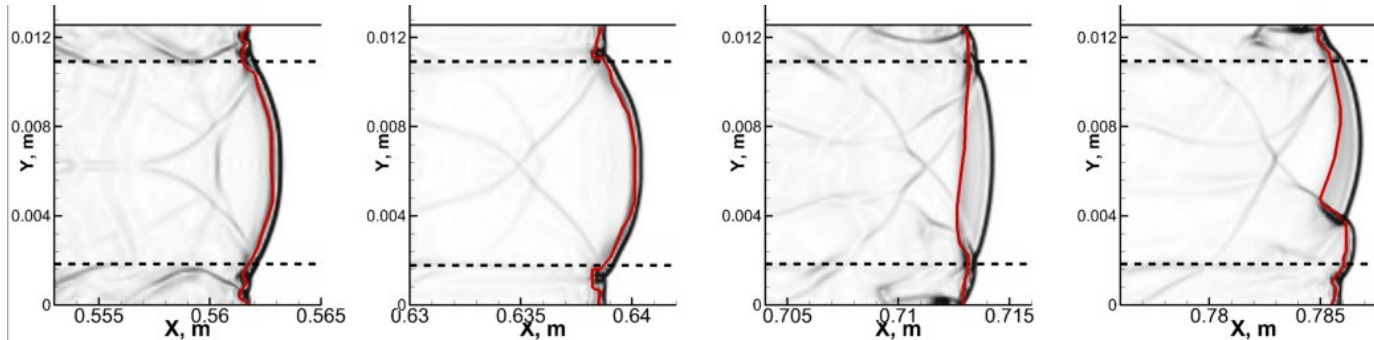
Галопирующий режим распространения детонации в смеси водород-кислород-аргон в системе двух фильтров сверхкритической концентрации

$$d = 100 \mu\text{m}, \quad m_2 = 4m_2^* = 16 \cdot 10^{-2}, \quad N = 2, \quad R = 1\lambda_0, \quad W = 5\lambda_0$$

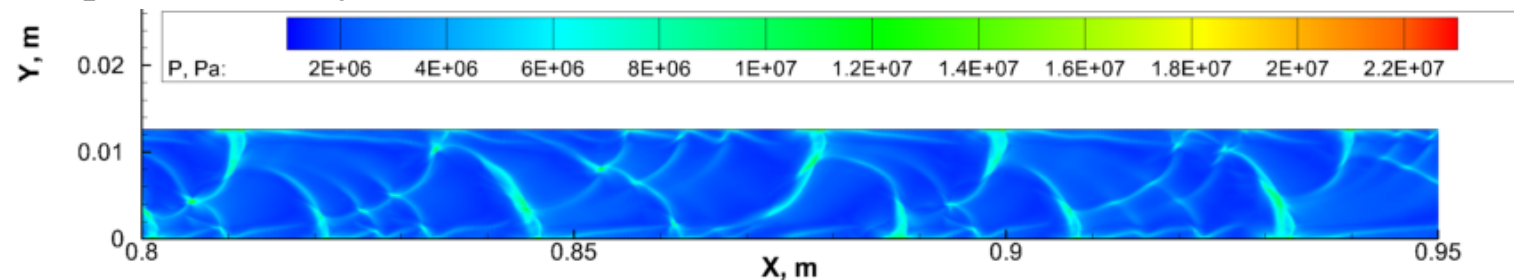
Gas Pressure



Numerical Schlieren



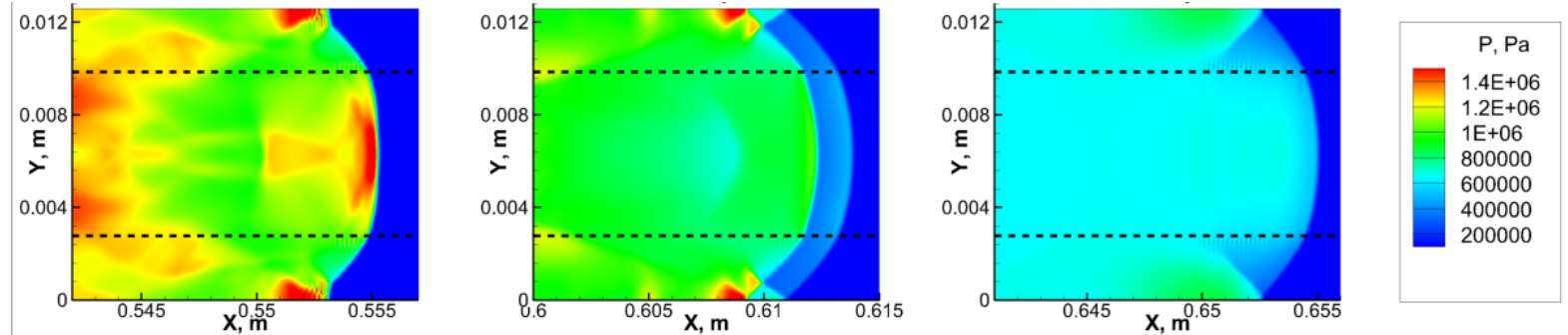
Triple Points Trajectories



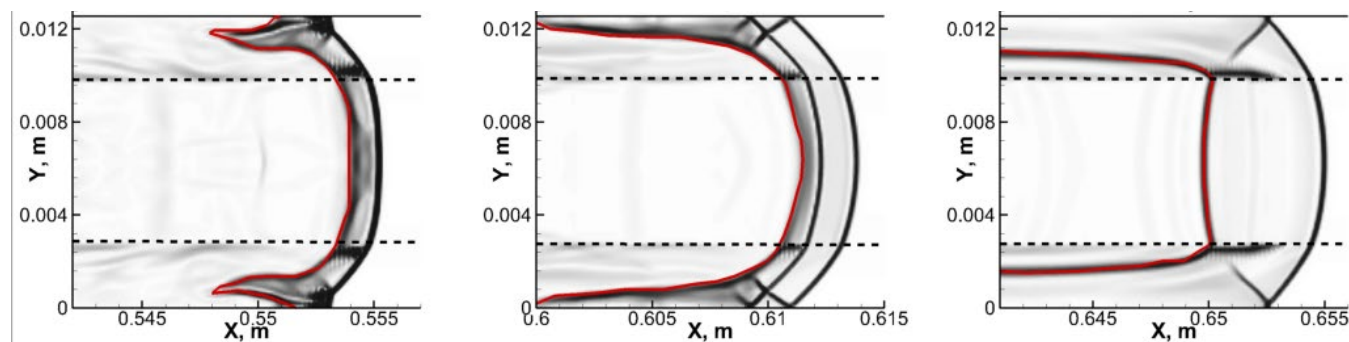
Срыв детонации в смеси водород-кислород-аргон системой двух фильтров сверхкритической концентрации

$$d = 100 \mu\text{m}, \quad m_2 = 4m_2^* = 16 \cdot 10^{-2}, \quad N = 2, \quad R = 1.5\lambda_0, \quad W = 4\lambda_0$$

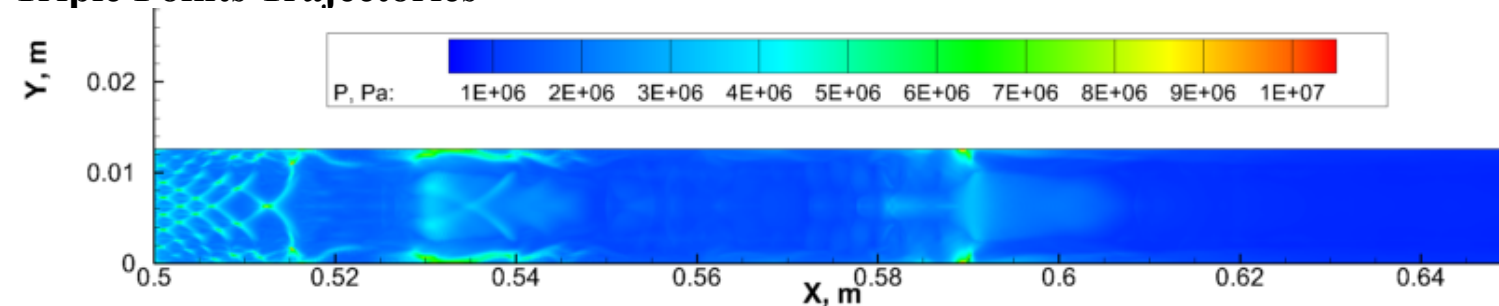
Gas Pressure



Numerical Schlieren



Triple Points Trajectories



Карта детонационных режимов в водородо-воздушной смеси в системе из двух фильтров

d , мкм	m_2 / m_2^*	W / λ_0	BR	Режим
50	1	≤ 2	≥ 0.71	Срыв ДВ
		> 2.1	< 0.7	Ослабленная ДВ
	2	≤ 3.7	≥ 0.47	Срыв ДВ
		> 3.8	< 0.45	Ослабленная ДВ
	4	≤ 5	≥ 0.285	Срыв ДВ
		> 5.5	< 0.214	Ослабленная ДВ
	8	≤ 6	≥ 0.143	Срыв ДВ
		> 6.1	< 0.129	Ослабленная ДВ
100	1	≤ 1.1	≥ 0.843	Срыв ДВ
		> 1.2	< 0.828	Ослабленная ДВ
	2	≤ 3.2	≥ 0.543	Срыв ДВ
		> 3.3	< 0.529	Ослабленная ДВ
	4	≤ 4.5	≥ 0.357	Срыв ДВ
		> 5	< 0.286	Ослабленная ДВ
	8	≤ 5.7	≥ 0.185	Срыв ДВ
		> 5.8	< 0.171	Ослабленная ДВ
200	1	≤ 1.1	≥ 0.843	Срыв ДВ
		> 1.2	< 0.828	Ослабленная ДВ
	2	≤ 3.3	≥ 0.528	Срыв ДВ
		> 3.4	< 0.514	Ослабленная ДВ
	4	≤ 5	≥ 0.285	Срыв ДВ
		> 5.5	< 0.214	Ослабленная ДВ
	8	≤ 5.6	≥ 0.2	Срыв ДВ
		> 5.7	< 0.185	Ослабленная ДВ

Выводы

- ✓ Проведены расчеты взаимодействия ячеистых детонационных волн в смесях водород-воздух и водород-кислород-аргон с инертными пористыми фильтрами. Выявлены реализующиеся режимы детонации:
 - стационарное распространение затухающей ячеистой ДВ с укрупненной детонационной ячейкой при параметрах фильтра ниже критических,
 - галопирующий режим распространения ДВ при параметрах фильтра близких критическим,
 - срыв детонации с разрушением ячеистой структуры и расщеплением ДВ на замороженную ударную волну и отстающий от нее фронт воспламенения и горения при параметрах фильтра, равных или превышающих критические.
- ✓ Определены концентрационные пределы детонации. Выявлено, что концентрационные пределы детонации в смеси водород-кислород-аргон в 10 раз выше чем в смеси водород - воздух.
- ✓ Установлено, что увеличение объемной концентрации частиц фильтра приводит к увеличению критической ширины зазора, при котором наблюдается срыв детонации без последующего ее реинициирования, и уменьшению критического уровня перекрытия канала. Построены карты детонационных режимов, из анализа которых следует, что увеличение объемной концентрации частиц в 8 раз по сравнению с критической позволяет увеличить ширину зазора до $5.7\lambda_0$ и уменьшить уровень перекрытия канала до 15.7% (водородо-воздушная смесь) и до 14.3% (смесь водород-кислород-аргон).