



**XVI Международная конференция
"Забабахинские научные чтения"
22-26 мая 2023 г., г. Снежинск**



**РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ**

Численное исследование распространения газовой детонации в плоском прямоугольном канале с препятствиями

Темербеков В. М., Тропин Д. А.

*Институт Теоретической и Прикладной Механики
им. С.А. Христиановича СО РАН*

Актуальность

В настоящее время стоит вопрос об использовании высокоэффективных газообразных топлив для различных энергетических установок. Из-за высокого тепловыделения при окислении горючих газов существует опасность возникновения чрезвычайных ситуаций при их эксплуатации. Аварии с выбросом газообразного горючего зачастую приводят к пожарам и взрывам, в связи с чем большой интерес вызывают исследования связанные с вопросами взрыво- и пожаробезопасностью, а в частности работы направленные на выявление возможности ослабления и подавления газовой детонации, ее инициирования и взаимодействия с различными препятствиями.

Цели работы:

- Численное исследование влияния пористой проницаемой преграды на процессы распространения и ослабления ДВ;
- Выявление степени влияния геометрических параметров преграды на ослабление детонации.

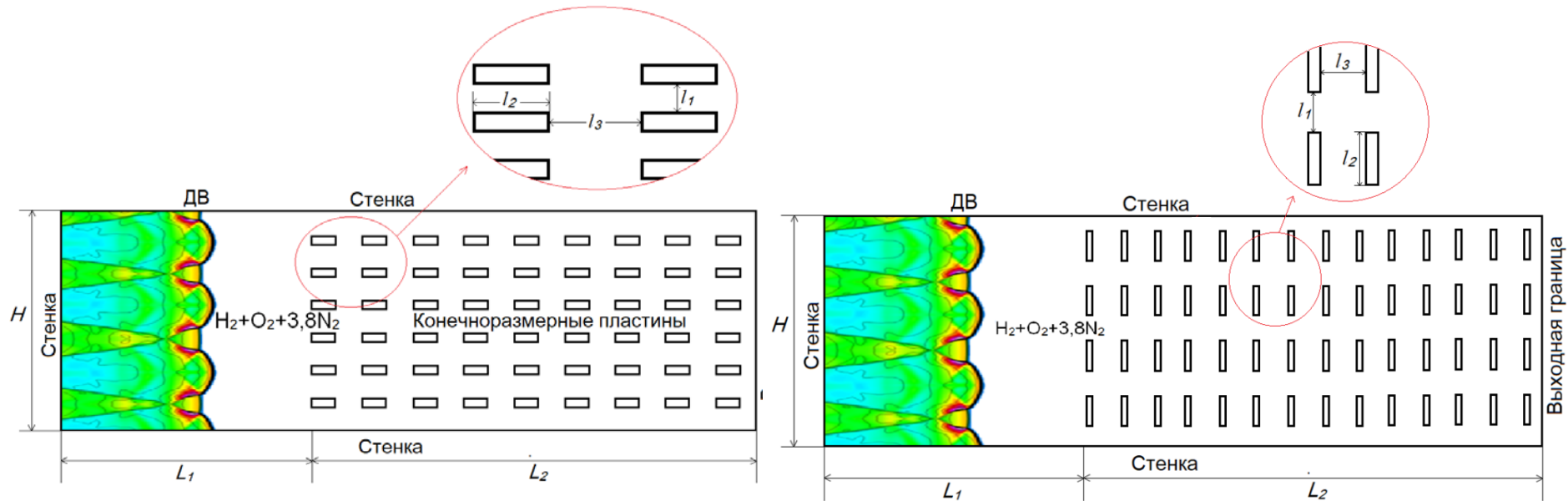
Постановка задачи

Схема моделируемой области

Начальные условия:

Подготовленная, стехиометрическая смесь $\text{H}_2 + \text{Air}$

$$T_{\text{ст}} = 300 \text{ К}, P_{\text{ст}} = 100 \text{ кПа}, \lambda = 12.5 \text{ мм}$$



Геометрические параметры:

$$L_1 = 500 \text{ мм}, L_2 = 1000 \text{ мм}, H = 100 \text{ мм}, l_1 = 0,3 - \lambda, w = 2 \text{ мм}, l_2 = 5 - 25 \text{ мм}, l_3 = 5 - 20 \text{ мм}$$

Детали математической модели и вычислительной технологии для 2-D расчетов

Математическая модель:

осредненные по Фавру уравнения Навье-Стокса с учетом многокомпонентности газовой смеси и химической кинетики [1-2]

+

двухпараметрическая $k-\omega$ модель в SST модификации Ментора [3].

Решатель ANSYS Fluent:

- Нестационарный
- Density based

Численный метод:

- Аппроксимация по времени – неявная схема второго порядка
- Аппроксимация по пространству – противопотоковая второго порядка
- Метод расщепления вектора потоков – метод AUSM

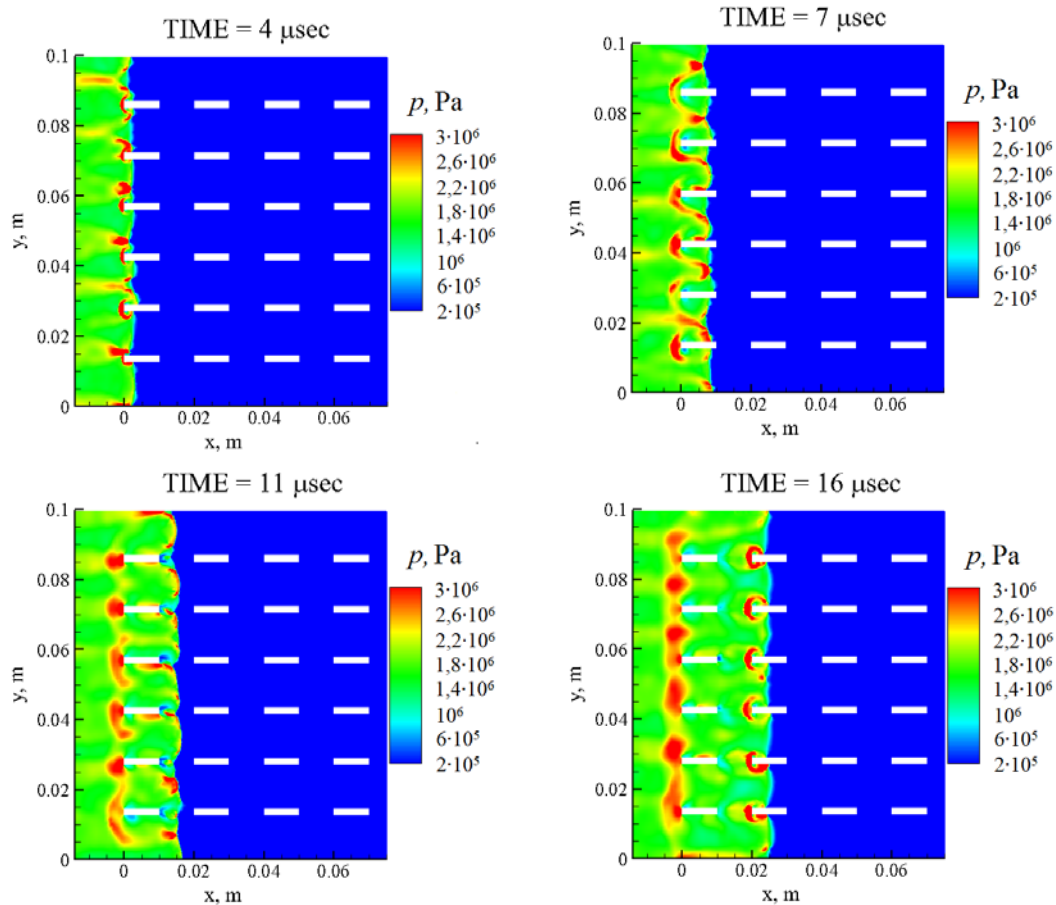
Используемая кинетическая схема была верифицирована по времени задержки воспламенения, скорости детонации и размеру детонационной ячейки [1-2].

Тестирование данной математической модели и численного метода было проведено на задаче о формировании наклонных детонационных волн [4].

Проверка сходимости решения по расчетной сетке и исследование влияния теплофизических параметров стенок каналов на распространение детонации [5].

1. **Бедарев И.А., Федоров А.В., Рылова К.В.** Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водородо-воздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 5. С. 22-33
2. **Tropin D.A., Bedarev I.A.** Problems of detonation wave suppression in hydrogen-air mixtures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation // Combustion Science and Technology. 2021. Vol. 193, No. 2. P. 197-210.
3. **Menter F. R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994; 32: 1598–1605.
4. **Bedarev I.A., Temerbekov V.M.** Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high velocity projectile // Thermal Science. 2021. Vol. 25, No 5. P. 3889 – 3897.
5. **Tropin D.A., Temerbekov B.M.** Numerical simulation of detonation wave propagation through a rigid permeable barrier // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47, No. 87. P. 37106-37124.

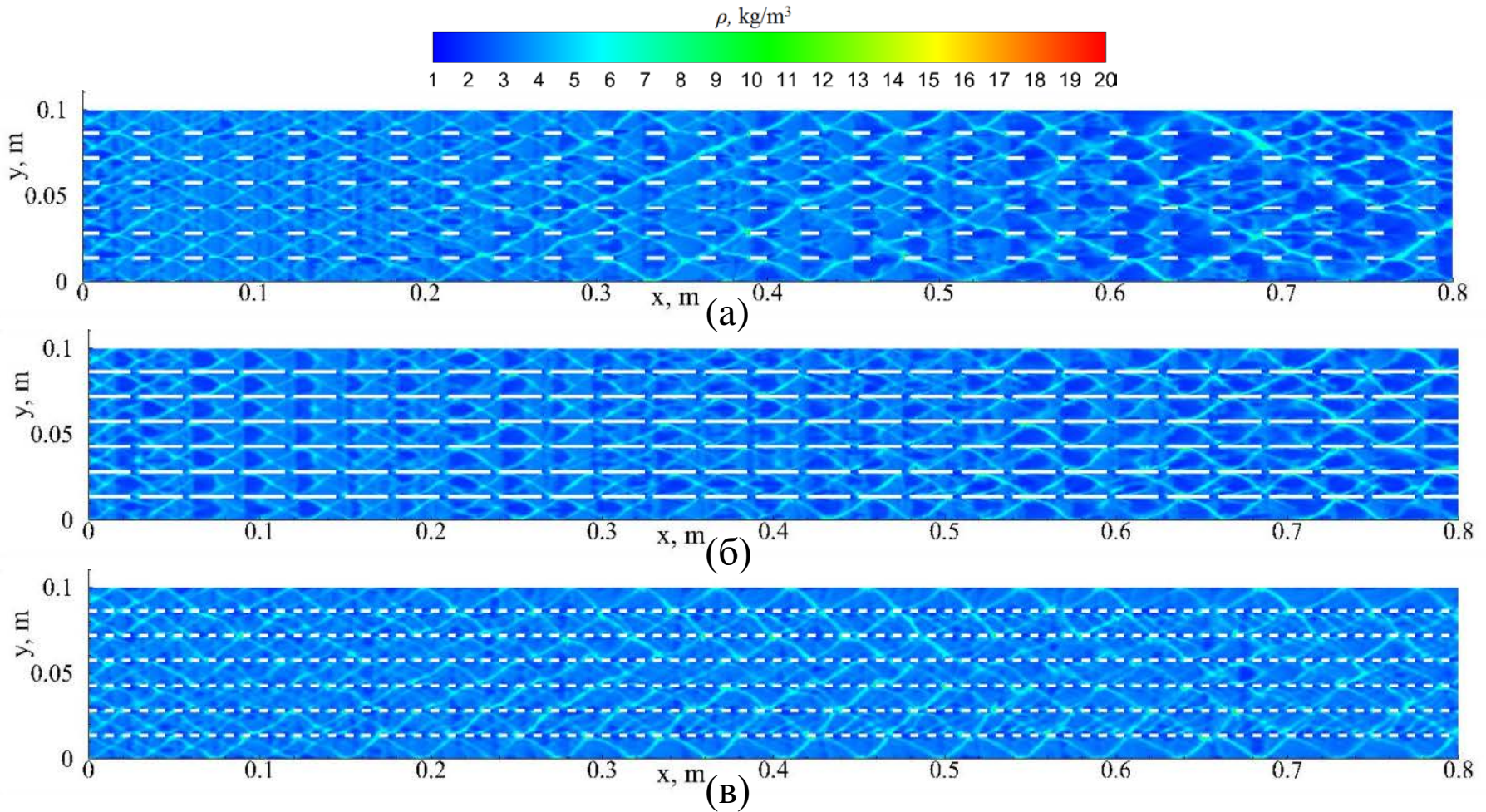
Конечноразмерные пластины при $l_1 = \lambda$



Поля статического давления для конечноразмерных пластин при $l_2 = l_3 = 10\text{мм}$.

Регулярное взаимодействие детонационной волны с конечноразмерными пластинами приводит к ослаблению детонации и реализации режима распространения, при котором скорость ДВ осциллирует около некоторого значения, которое оказывается меньше, чем для случаев свободного канала и сплошных малых каналов соответствующей ширины.

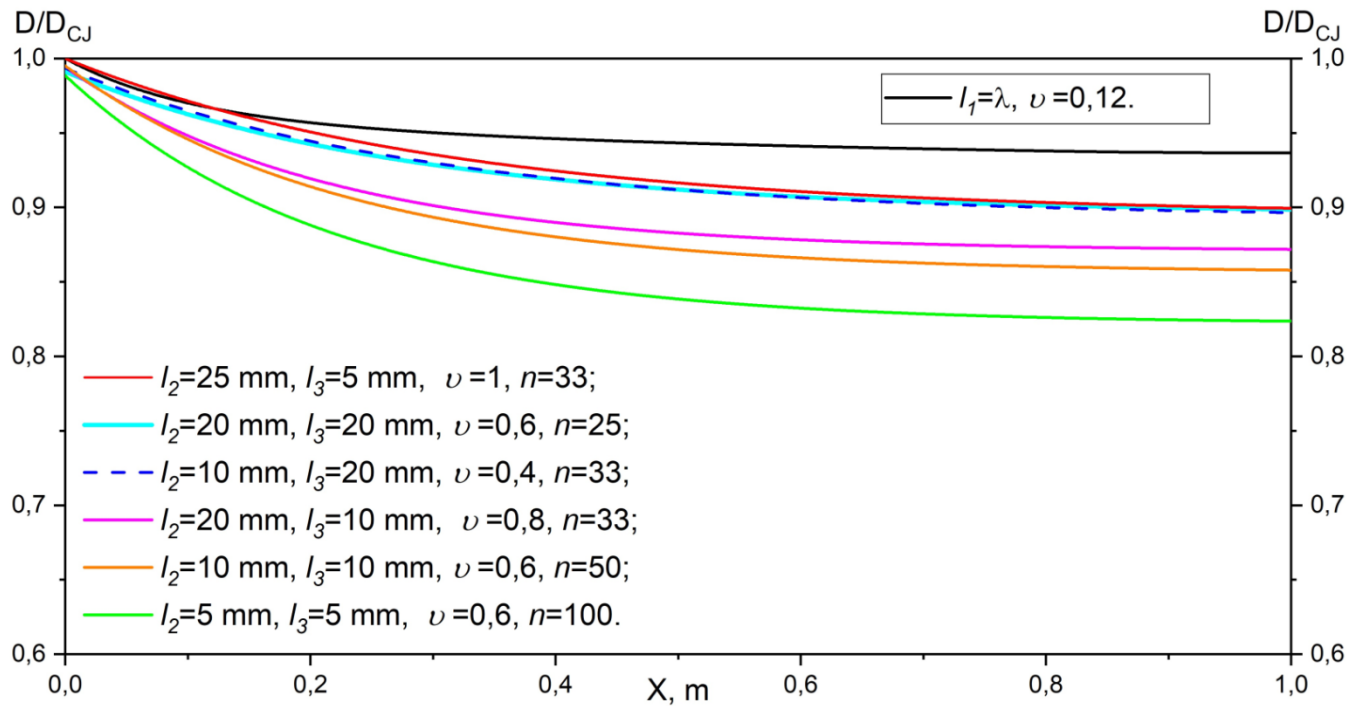
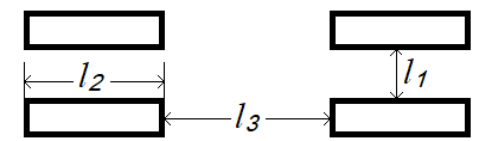
Конечноразмерные пластины при $l_1 = \lambda$



Поля максимумов плотности для конечноразмерных пластин при:
(а) - $l_2 = 10\text{мм}$ и $l_3 = 20\text{мм}$; (б) - $l_2 = 25\text{мм}$ и $l_3 = 5\text{мм}$; (в) - $l_2 = 5\text{мм}$ и $l_3 = 5\text{мм}$.

Увеличение длины пластин в совокупности с уменьшением расстояния между ними приводит к режиму распространения схожему с течением в сплошных каналах. Увеличение количества рядов пластин приводит к более раннему разрушению ячеистой структуры детонации.

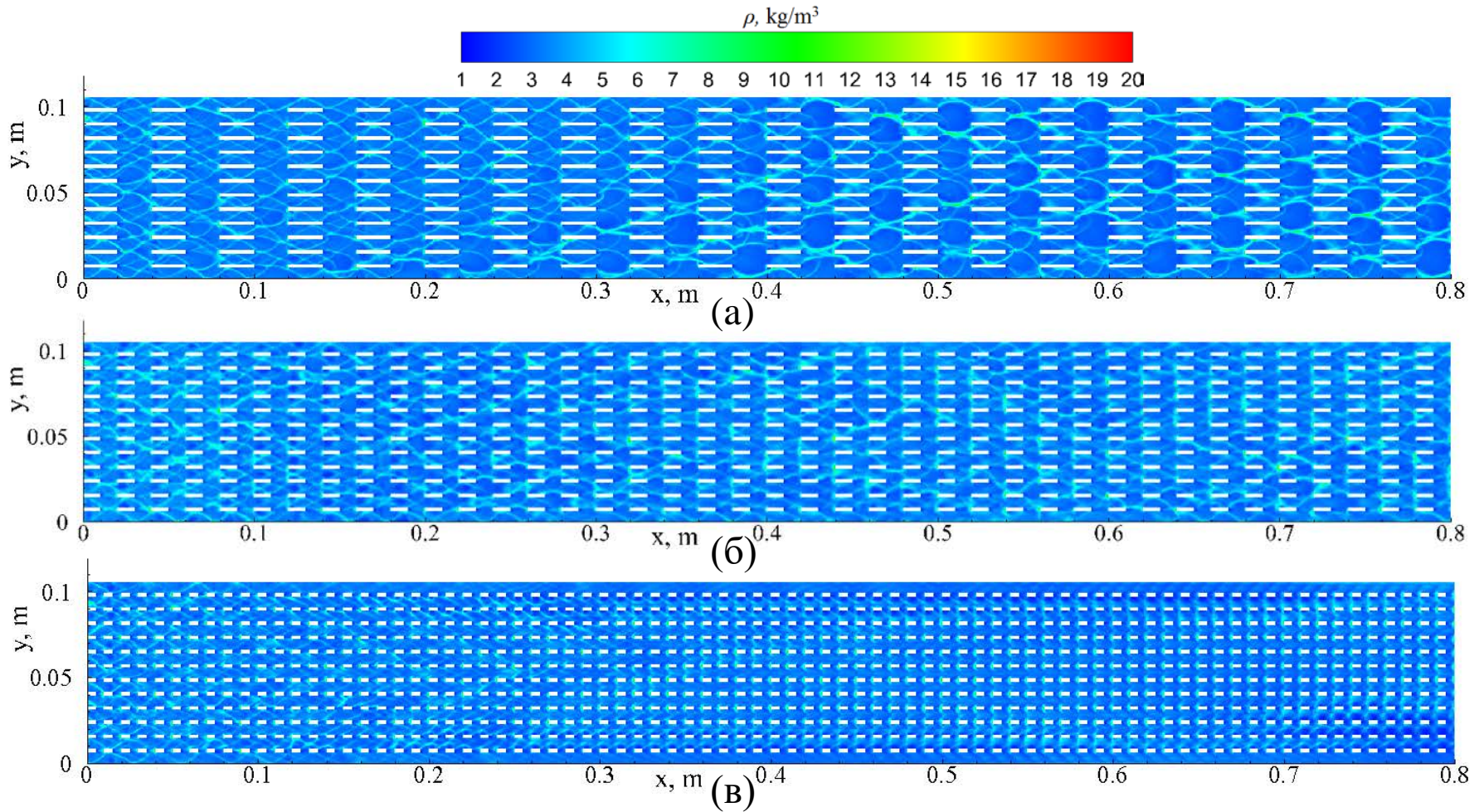
Сравнение скоростей распространения ДВ для конечноразмерных пластин при $l_1 = \lambda$



l_2 , мм	l_3 , мм	ν	n	D_{CJ}^f , м/с	ΔD_{CJ}^f , м/с
25	5	0,1	33	1742	195
20	20	0,06	25	1740	197
10	20	0,04	33	1736	193
20	10	0,08	33	1688	249
10	10	0,06	50	1661	275
5	5	0,06	100	1595	342

Увеличение количества рядов пластин и увеличение их удельного объема приводит к уменьшению скорости распространения детонации. При этом возрастание количество рядов пластин влияет на дефицит скорости значительно, чем увеличение их удельного объема.

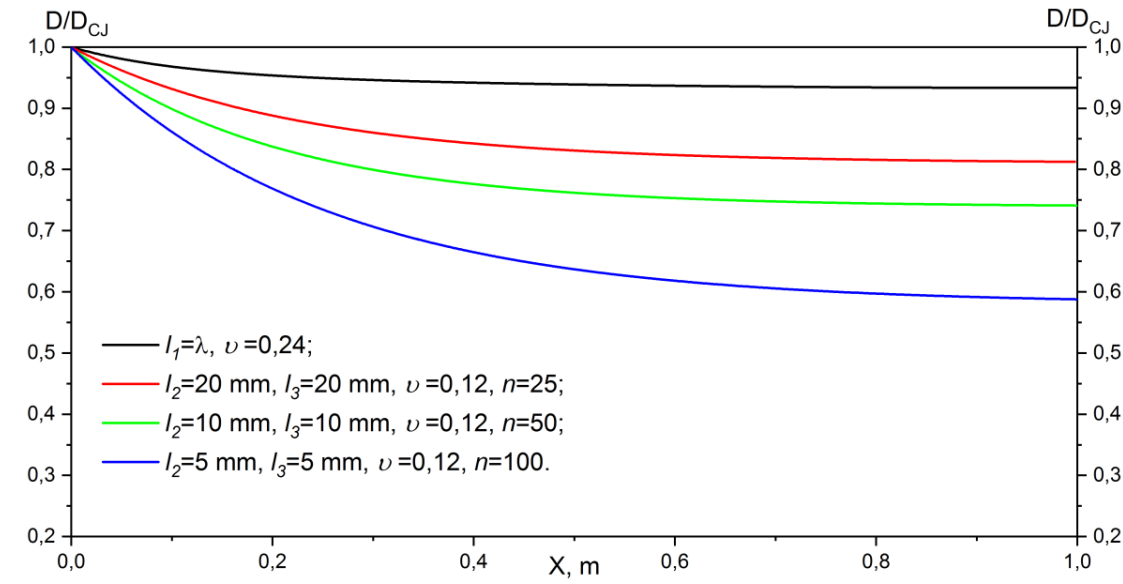
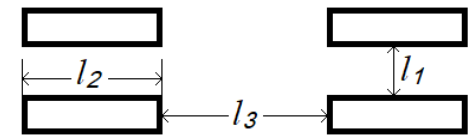
Конечноразмерные пластины при $l_1 = 0,5\lambda$



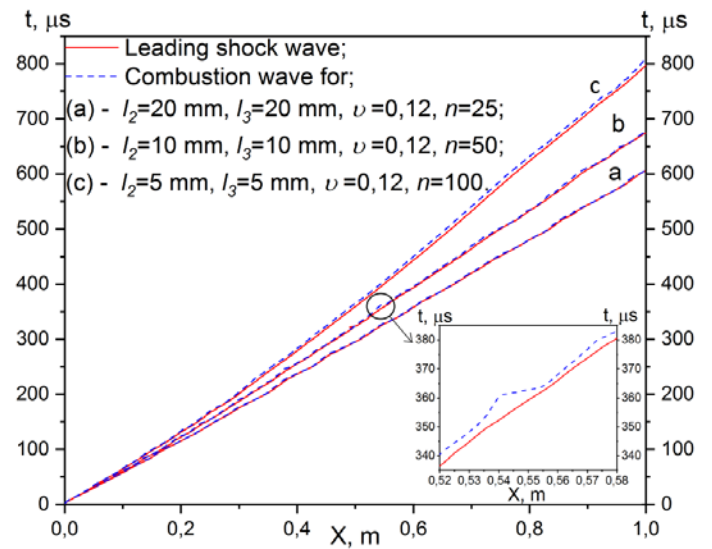
Поля максимумов плотности для конечноразмерных пластин при:
(а) - $l_2 = 20\text{mm}$ и $l_3 = 20\text{mm}$; (б) - $l_2 = 10\text{mm}$ и $l_3 = 10\text{mm}$; (в) - $l_2 = 5\text{mm}$ и $l_3 = 5\text{mm}$.

Уменьшение ширины зазора между пластины в два раза приводит к вырождению ячеистой структуры детонации а также к локальному расщеплению детонационной волны.

Сравнение скоростей распространения ДВ для конечноразмерных пластин при $l_1 = \lambda$

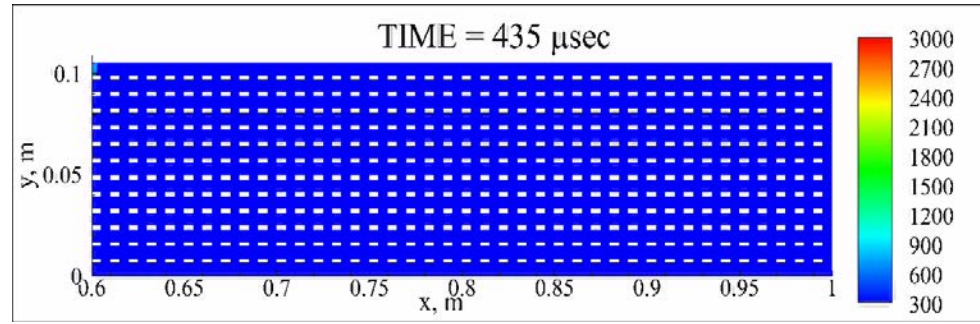


Сравнение скоростей распространения ДВ



Траектории фронта лидирующей волны и фронта горения

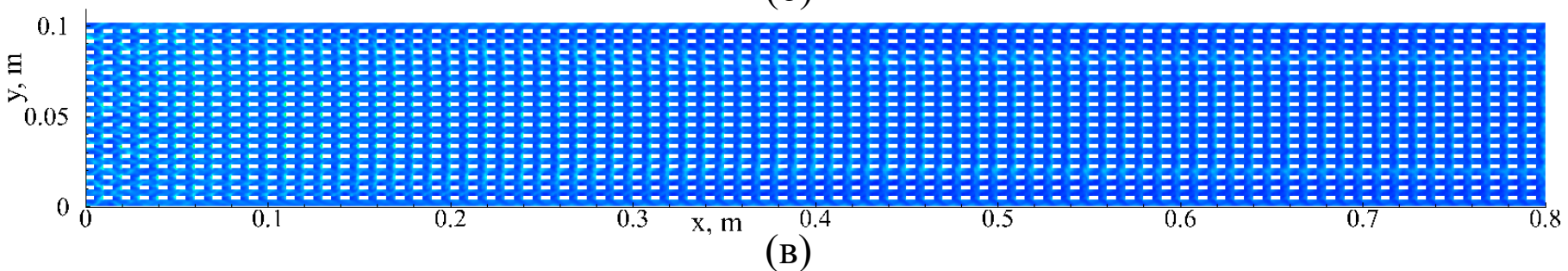
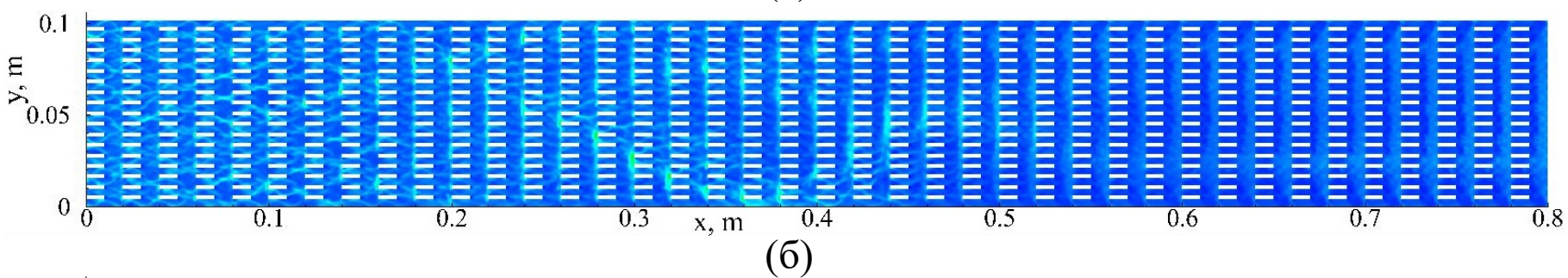
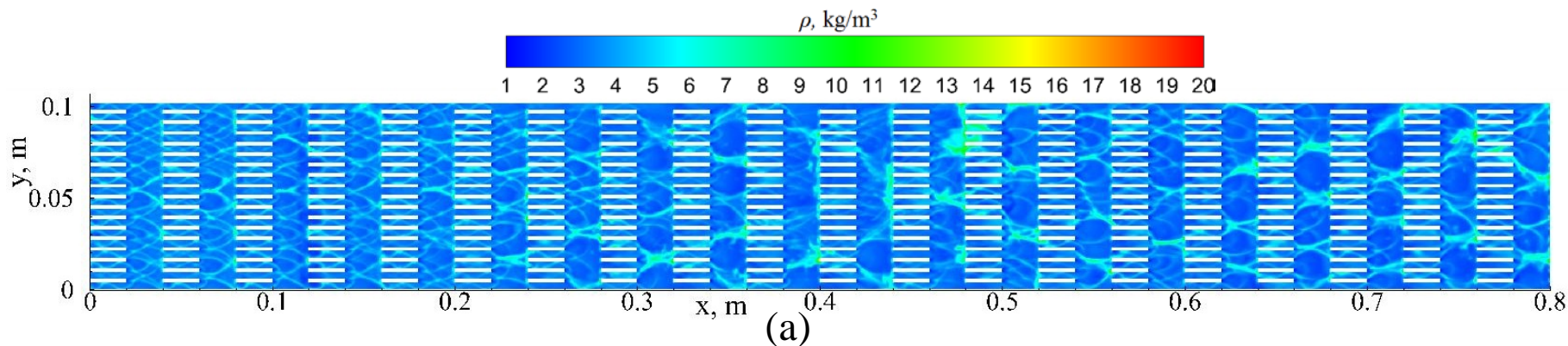
l_2 , мм	l_3 , мм	ν	n	D_{CJ}^f , м/с	ΔD_{CJ}^f , м/с
20	20	0.12	25	1573	364
10	10	0.12	50	1472	465
5	5	0.12	100	1139	798



Поле статической температуры

Уменьшение зазора между пластинами приводит к большему влиянию частоты взаимодействия лидирующего фронта с торцевыми поверхностями пластин на ослабление детонации

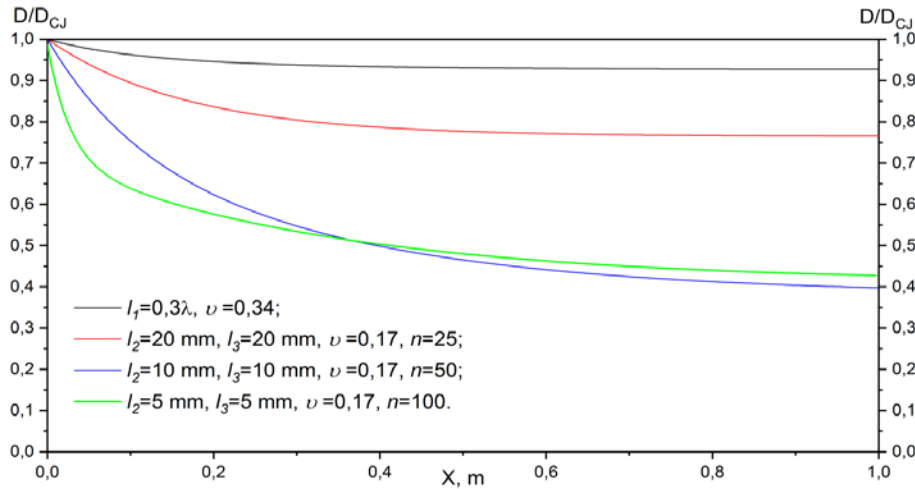
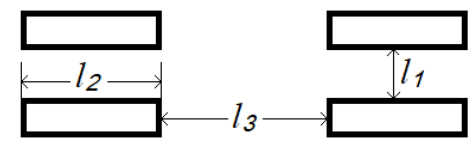
Конечноразмерные пластины при $l_1 = 0,3\lambda$



Поля максимумов плотности для конечноразмерных пластин при:
(а) - $l_2 = 20\text{мм}$ и $l_3 = 20\text{мм}$; (б) - $l_2 = 10\text{мм}$ и $l_3 = 10\text{мм}$; (в) - $l_2 = 5\text{мм}$ и $l_3 = 5\text{мм}$.

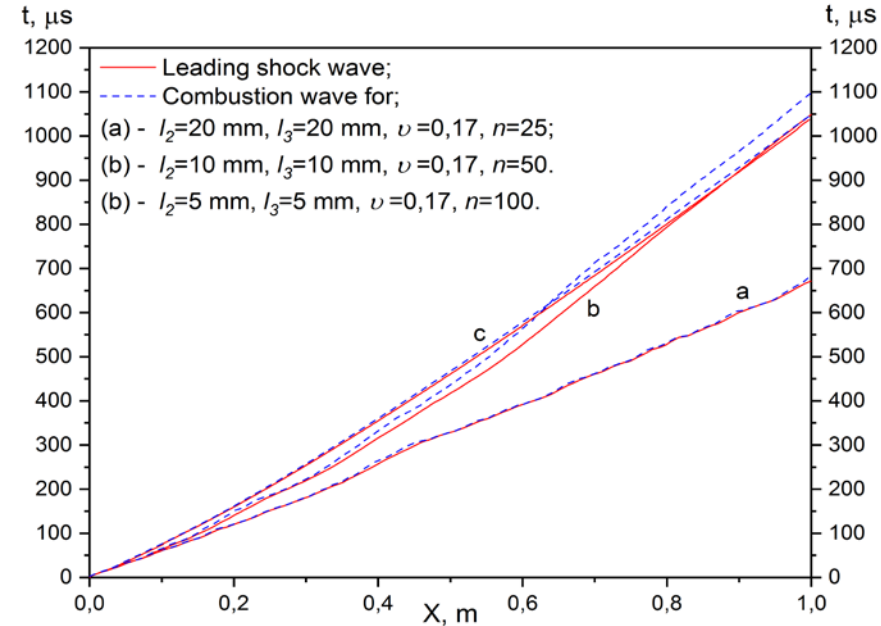
Уменьшение ширины зазора до $0,3\lambda$ приводит к изменению ячеистой структуры детонации, а также к ослаблению и вырождению тройных точек.

Сравнение скоростей распространения ДВ для конечноразмерных пластин при $l_1=0,3\lambda$



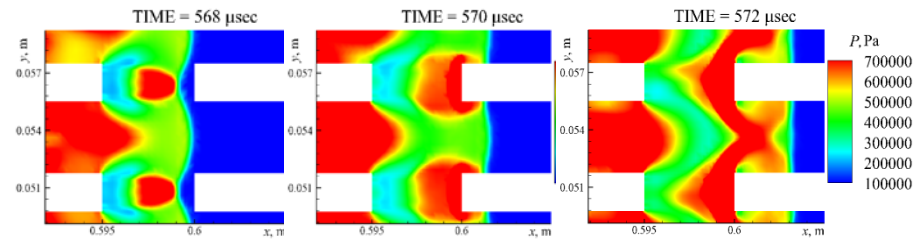
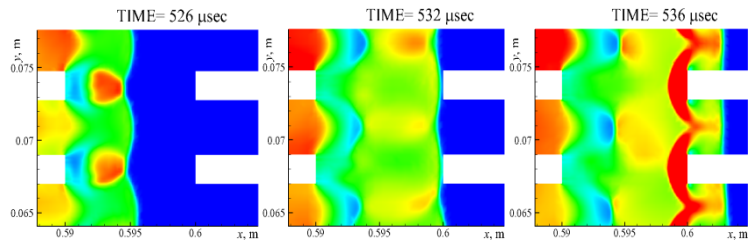
Сравнение скоростей распространения ДВ

$l_2, \text{ мм}$	$l_3, \text{ мм}$	ν	n	$D_{CJ}^f, \text{ м/с}$	$\Delta D_{CJ}^f, \text{ м/с}$
20	20	0,17	25	1491	446
10	10	0,17	50	782	1155
5	5	0,17	100	828	1109



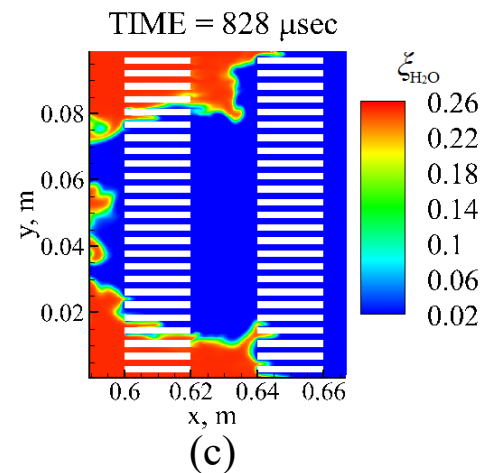
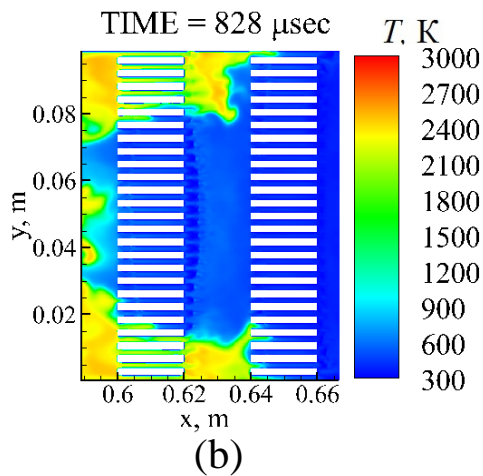
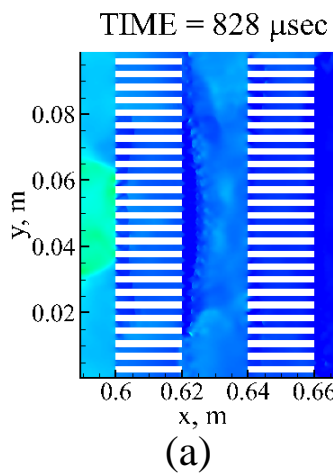
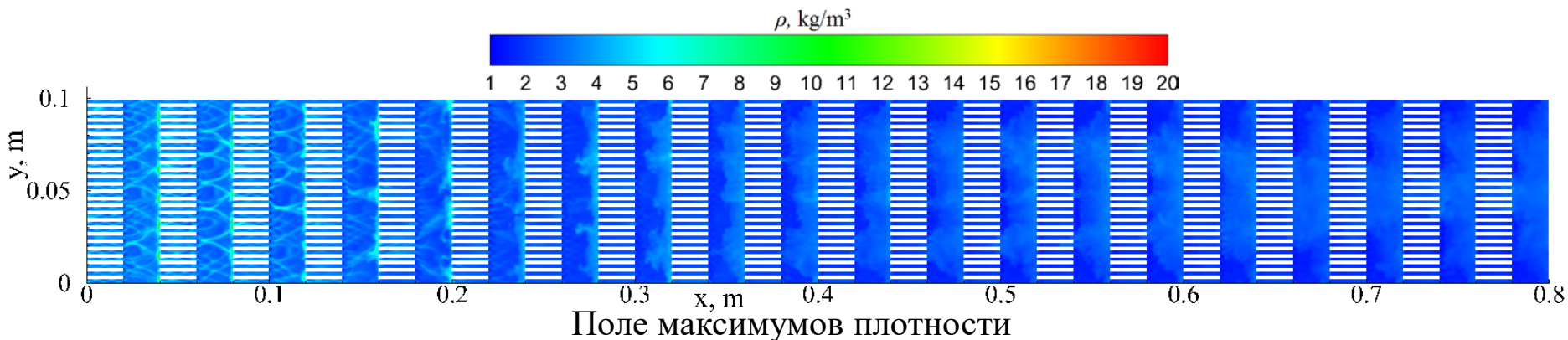
Траектории фронта лидирующей волны и фронта горения

Картины взаимодействия УВ с пластинами:



Конечноразмерные пластины при $l_1 = 0,15\lambda$

$$l_2 = l_3 = 20\text{мм}$$

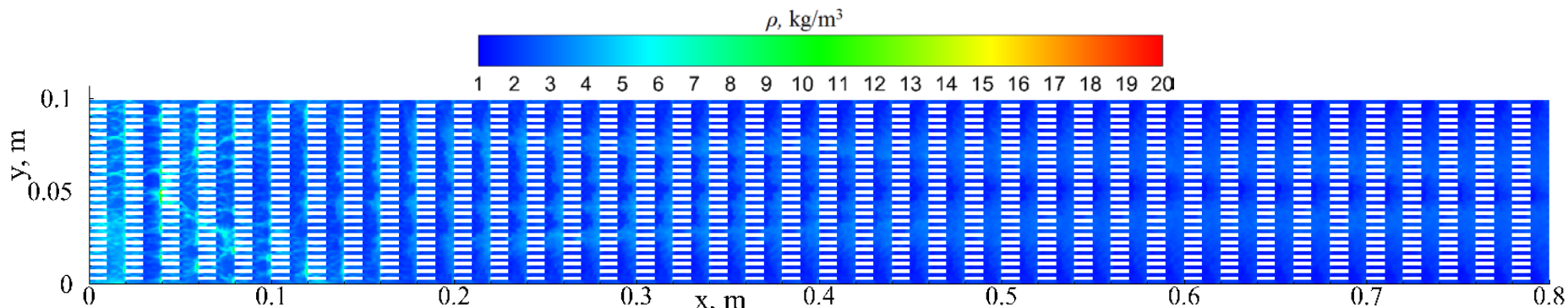


Результаты расчета. (a)- поле статического давления; (b) - поле статической температуры; (c) – поле массовой концентрации H_2O .

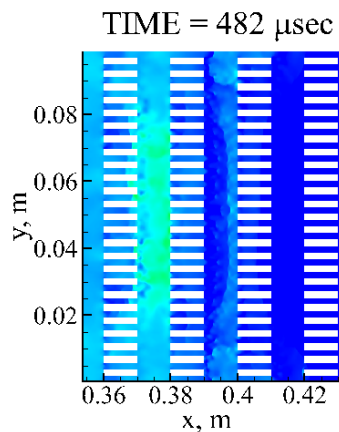
Уменьшение ширины зазора между пластин до $l_1 = 0,15\lambda$ приводит к срыву детонации.

Конечноразмерные пластины при $l_1 = 0,15\lambda$

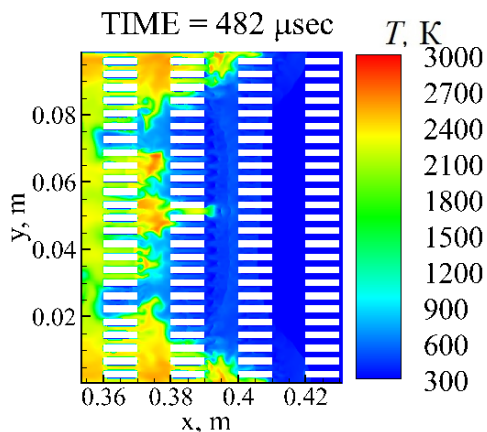
$$l_2 = l_3 = 10\text{мм}$$



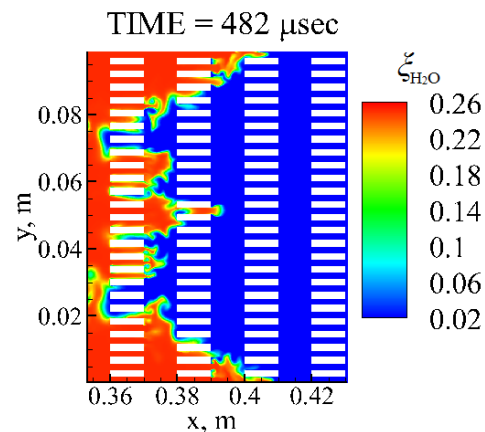
Поле максимумов плотности



(a)



(b)



(c)

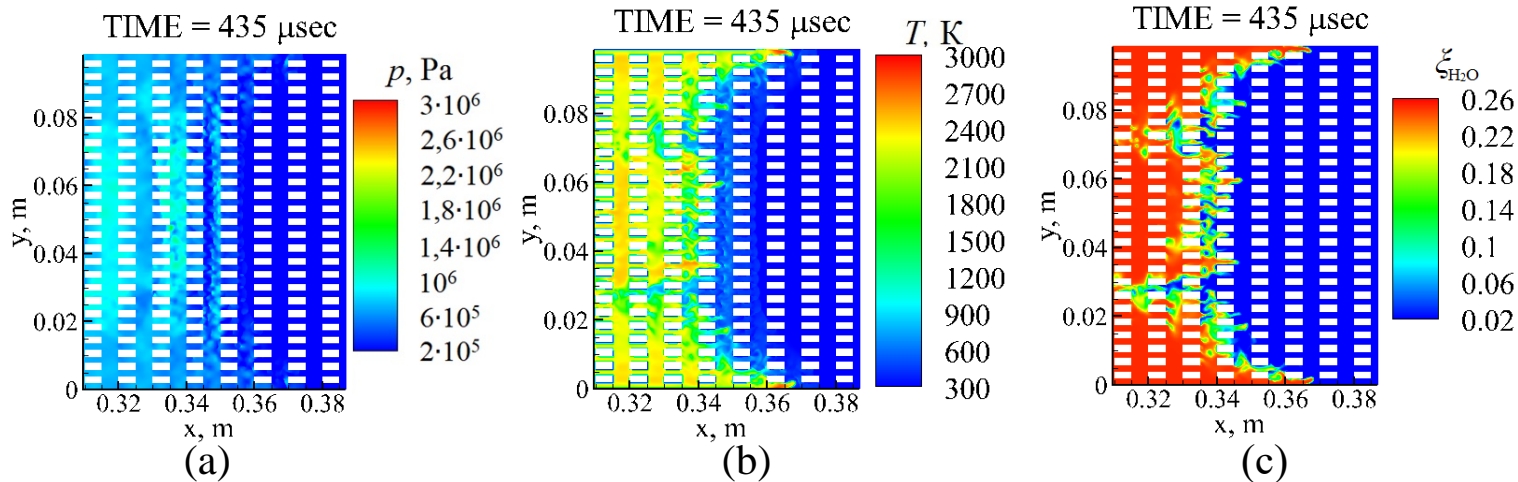
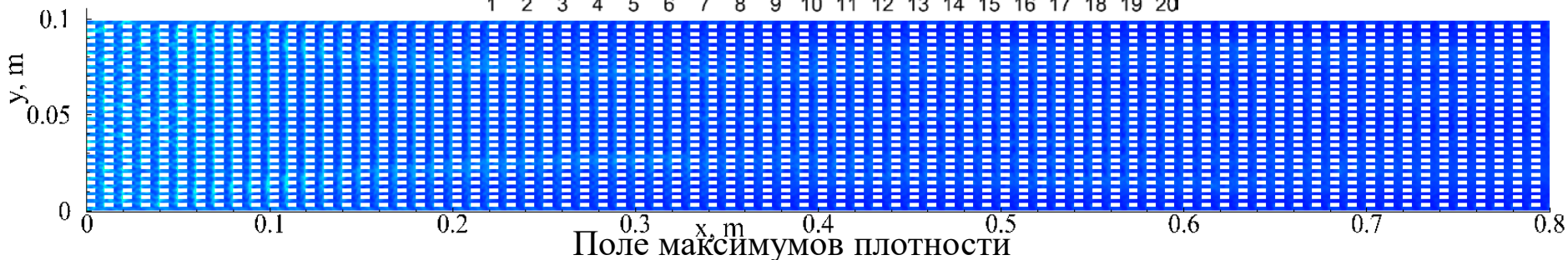
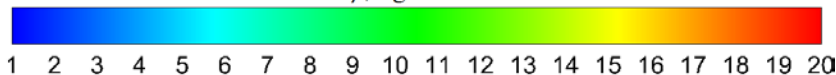
Результаты расчета. (a)- поле статического давления; (b) - поле статической температуры; (c) – поле массовой концентрации H_2O .

Уменьшение длины пластин и расстояния между ними приводит к более раннему срыву детонации.

Конечноразмерные пластины при $l_1 = 0,15\lambda$

$$l_2 = l_3 = 5\text{мм}$$

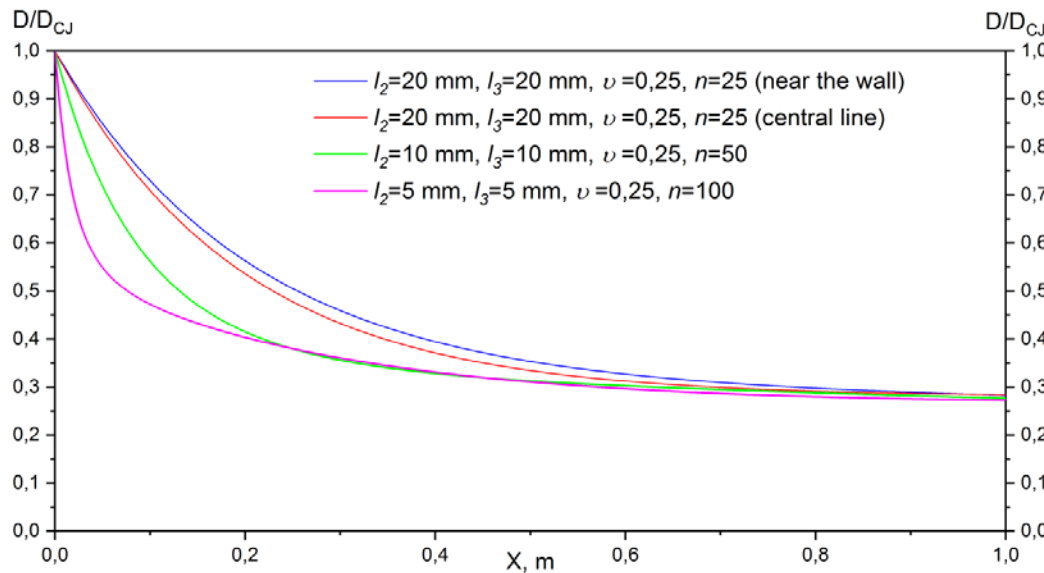
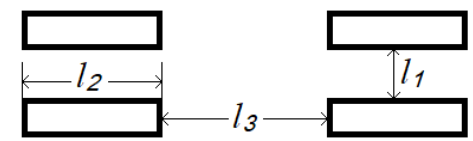
$\rho, \text{kg/m}^3$



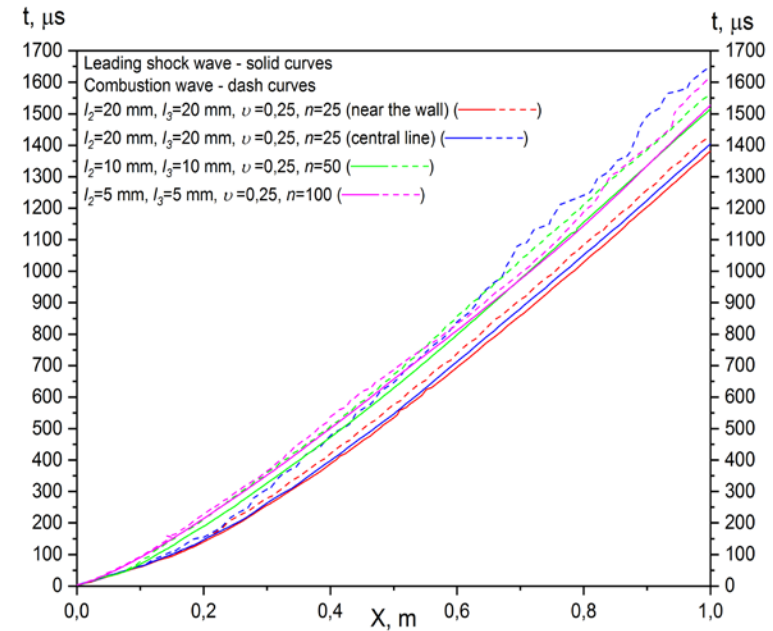
Результаты расчета. (a)- поле статического давления; (b) - поле статической температуры; (c) – поле массовой концентрации H_2O .

Уменьшение длины пластин и расстояния между ними до 5 мм приводит к более раннему срыву детонации.

Сравнение скоростей распространения ДВ для конечноразмерных пластин при $l_1=0,15\lambda$



Сравнение скоростей распространения ДВ

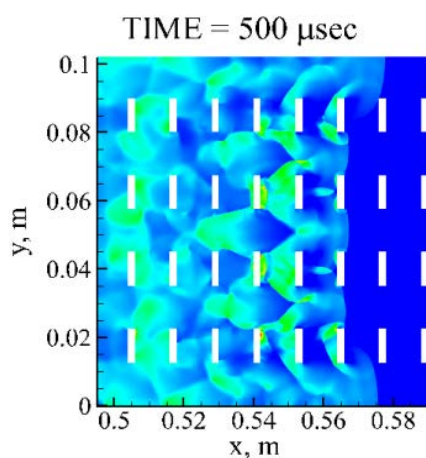
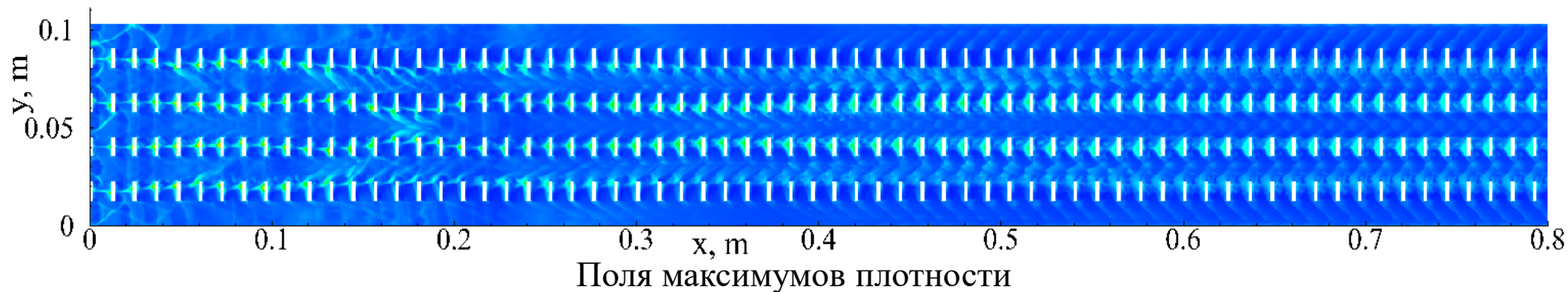
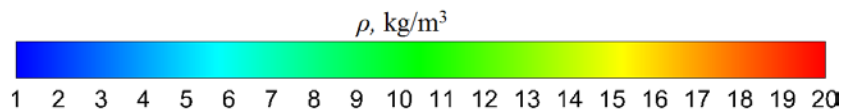


Траектории фронта лидирующей волны и фронта горения

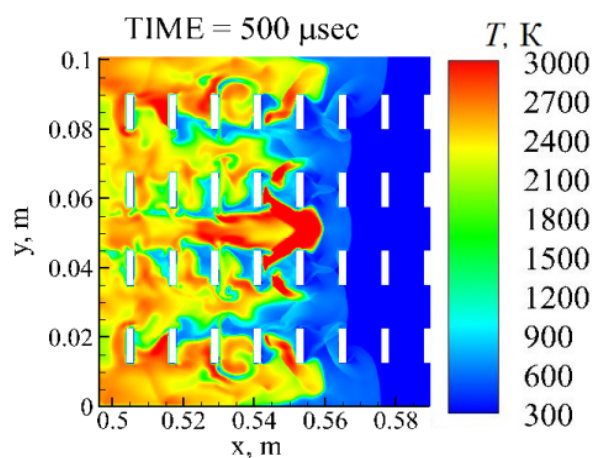
l_2 , мм	l_3 , мм	ν	n	D_{CJ}^f , м/с	ΔD_{CJ}^f , м/с
20	20	0,25	25	548	1389
10	10	0,25	50	536	1401
5	5	0,25	100	527	1410

Увеличение удельного объема, занимаемого пластинами, и их количества в одном ряду с уменьшением зазора между пластинами до $0,15\lambda$ приводит практически одинаковым скоростям распространения лидирующей ударной волны.

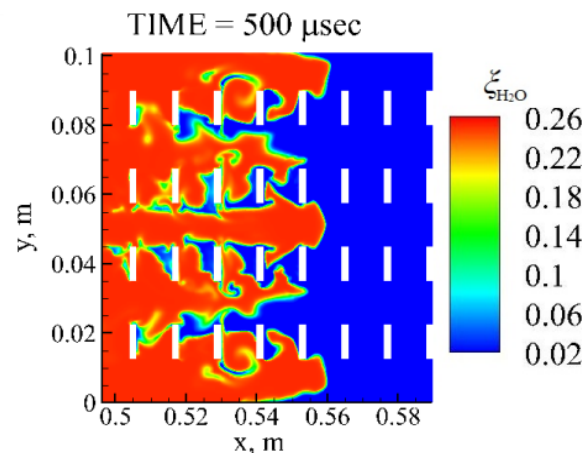
Вертикальные пластины при $l_1 = \lambda$, $l_2 = l_3 = 10$ мм



(a)



(b)

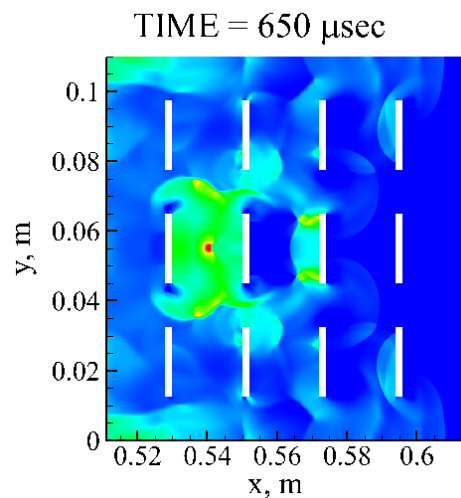
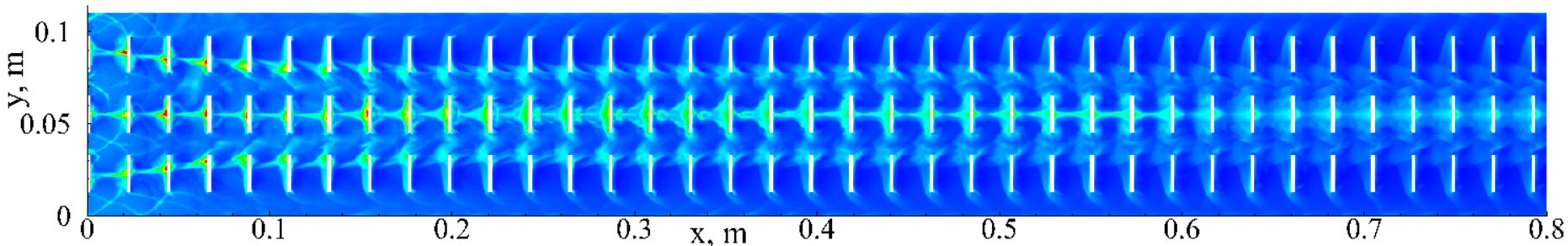
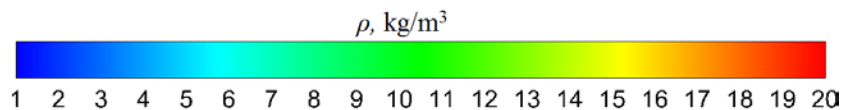


(c)

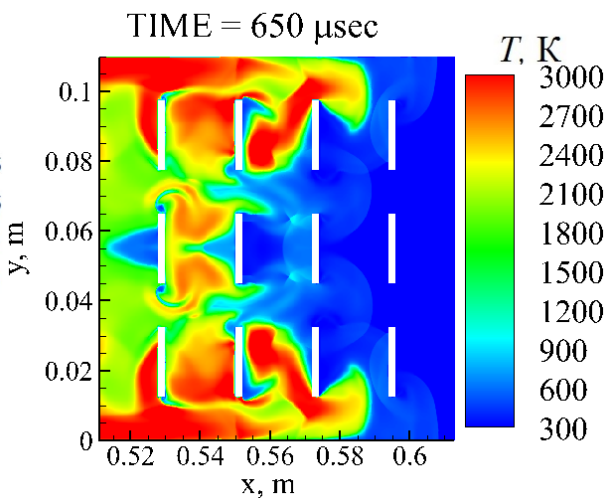
Результаты расчета. (a)- поле статического давления; (b) - поле статической температуры; (c) – поле массовой концентрации H_2O .

Изменение ориентации пластин приводит к более существенному ослаблению детонационной волны.

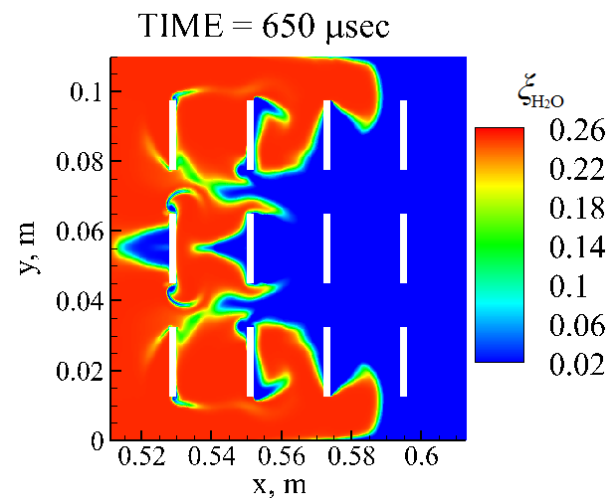
Вертикальные пластины при $l_1 = \lambda$, $l_2 = l_3 = 20$ мм



(a)



(b)

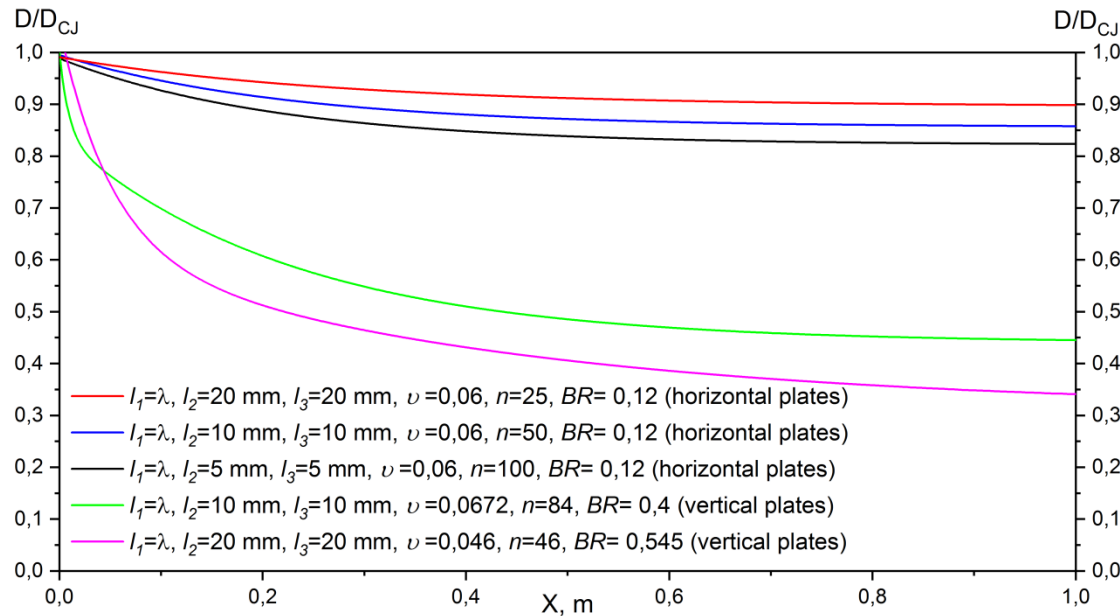
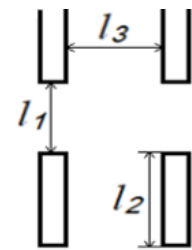


(c)

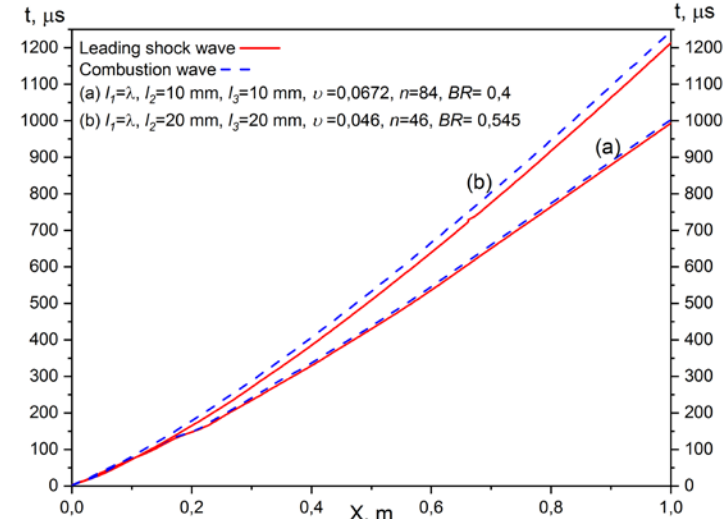
Результаты расчета. (a)- поле статического давления; (b) - поле статической температуры; (c) – поле массовой концентрации H_2O .

Увеличение длины вертикальных пластин приводит к более существенному ослаблению детонационной волны, несмотря на уменьшение удельного объема пластин и количества их рядов.

Сравнение скоростей распространения ДВ для Вертикальных пластин при $l_1 = \lambda$



Сравнение скоростей распространения ДВ



Траектории фронта лидирующей волны и фронта горения

	$l_2, \text{ мм}$	$l_3, \text{ мм}$	ν	n	BR	$D_{CJ}^f, \text{ м/с}$	$\Delta D_{CJ}^f, \text{ м/с}$
Вертикальные пластины	20	20	0,0502	46	0,545	668	1269
	10	10	0,0672	84	0,4	856	1081
Горизонтальные пластины	20	20	0,06	25	0,12	1740	197
	10	10	0,06	50	0,12	1661	276

Возрастание коэффициента блокировки канала приводит к дефициту скорости, который является более значительным, чем возрастание количества рядов пластин и увеличение их удельного объема.

Выводы

- Оценено влияние геометрических параметров пластин и шага их установки на степень ослабления детонации.
- Определено, что увеличение количества рядов пластин приводит к более сильному ослаблению детонации по сравнению с увеличением их удельного объема.
- Увеличение удельного объема занимаемого пластинам и их количества в одном ряду, в совокупности с уменьшением зазора между пластинами меньше геометрического предела существования детонационной ячейки приводит к более существенному влиянию количества рядов пластин на ослабление детонации.
- Уменьшение зазора между пластинами до $l_1 = 0,15 \lambda$ приводит к срыву детонации.
- Для $l_1 = 0,15 \lambda$ и $l_1 = 0,3 \lambda$ сокращение расстояния между пластинами приводит к реализации различных картин взаимодействий с торцевыми поверхностями пластин, что приводит к одинаковым скоростям распространения лидирующей ударной волны.
- Изменение ориентации пластин приводит к более интенсивному ослаблению детонации в связи с возрастанием коэффициента блокировки канала.
- Возрастание коэффициента блокировки канала приводит влияет на дефицит скорости значительно больше чем возрастание количество рядов пластин и увеличение их удельного объема.



**XVI Международная конференция
"Забабахинские научные чтения"
22-26 мая 2023 г., г. Снежинск**



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Спасибо за внимание