



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

**Исследование развития неустойчивости
Рихтмайера – Мешкова
на контактных границах разноплотных газовых сред
с одномодовыми начальными возмущениями**

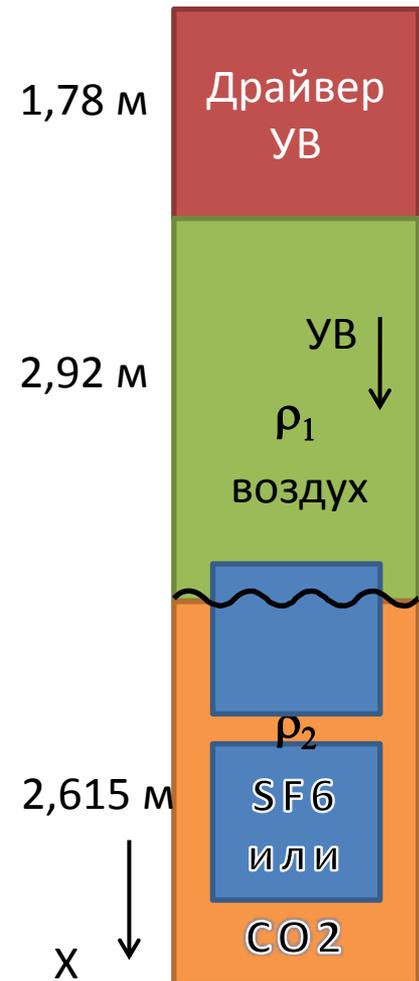
А.А. Тяктев, А.В. Павленко, Н.Б. Аникин, Ю.А. Пискунов, И.Л. Бугаенко
РФЯЦ-ВНИИТФ

**«XIV ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ» 18–22 марта 2019г.
г. Снежинск**

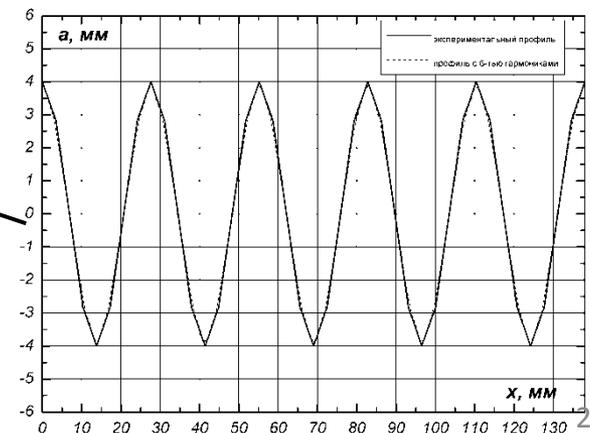
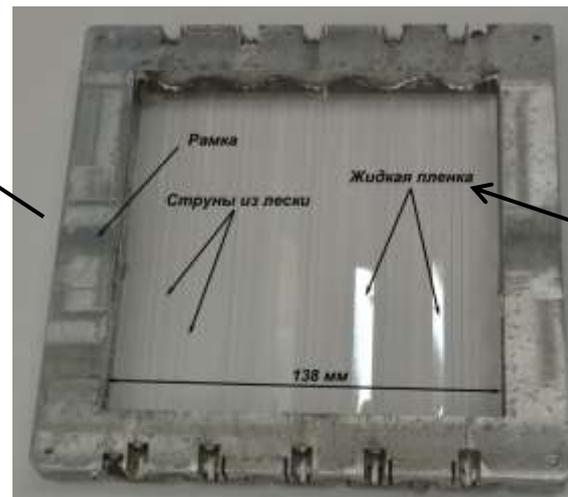
2D возмущения

Ударная труба
(0,138×0,138×7,315 м)

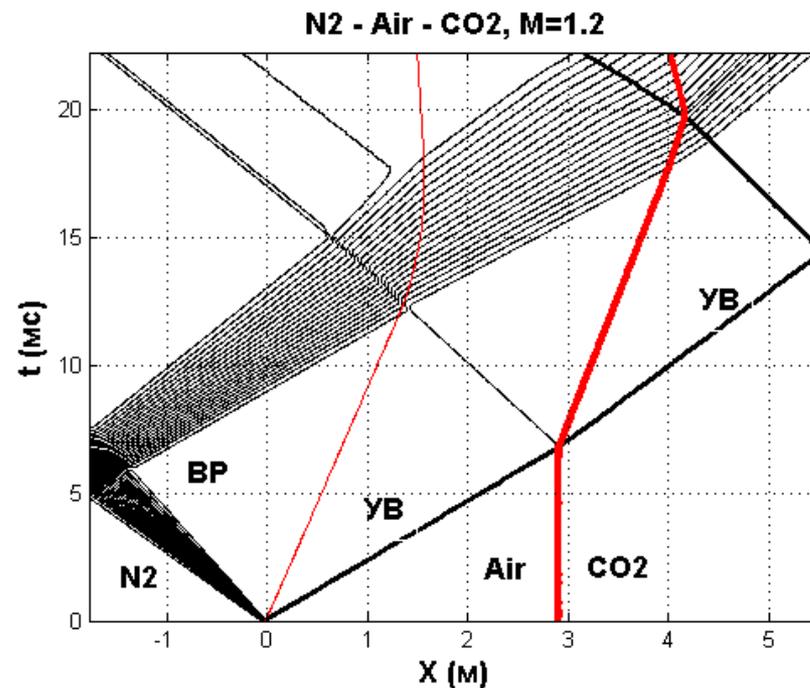
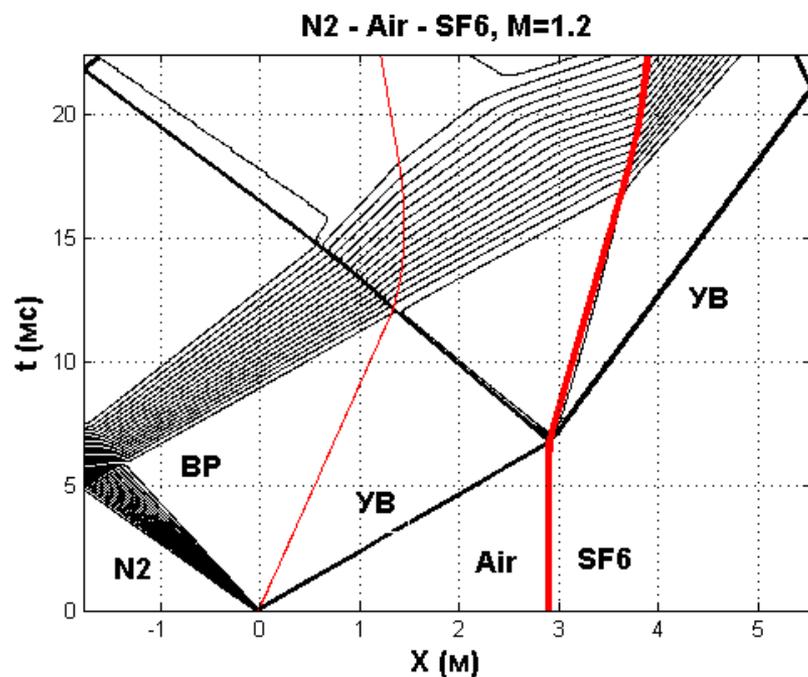
Исследуемые газы	Лёгкий (воздух), тяжелый (SF_6 , CO_2)
Число Маха	1,2 (УВ из легкого в тяжелый)
Число Атвуда	0.7 и 0.2
Начальные возмущения	2D, $a=4\text{мм}$, $\lambda=28\text{мм}$, $a/\lambda = 0.14$
Методы измерения	Шлирен-визуализация, давление



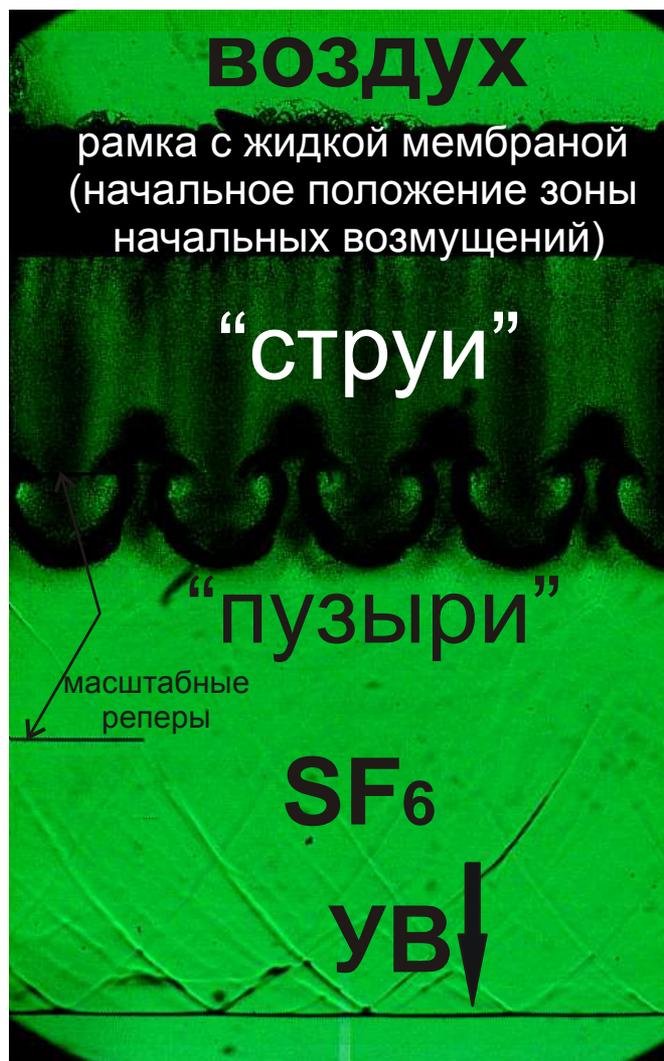
Начальные возмущения



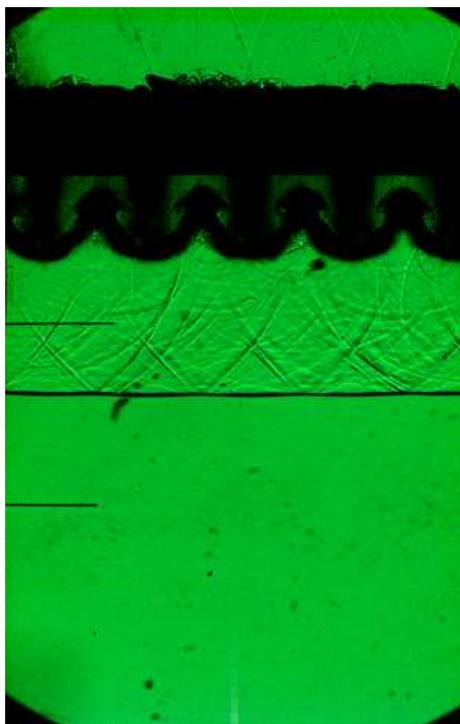
Газодинамическое течение



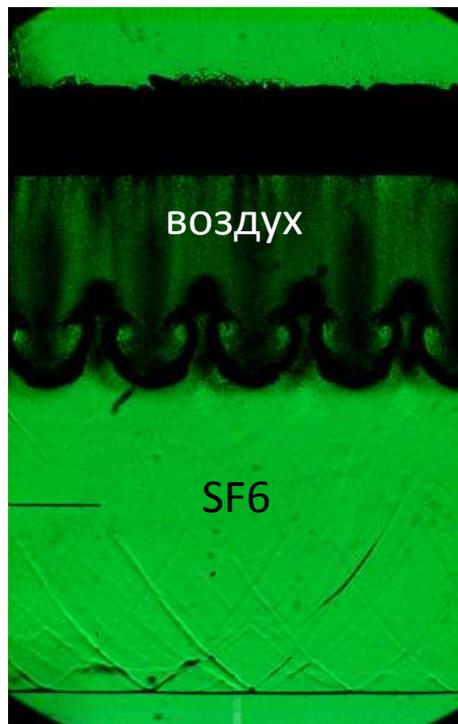
Результаты экспериментов (2D возмущения)



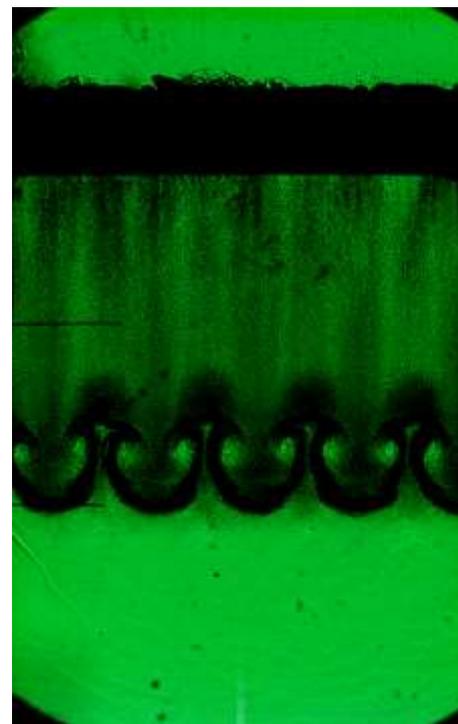
Результаты экспериментов (2D возмущения)



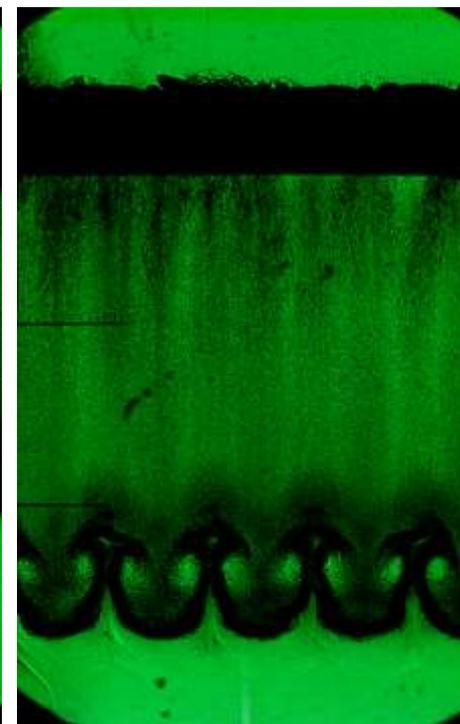
$t = 0.42 \text{ мс}$



$t = 0.88 \text{ мс}$



$t = 1.35 \text{ мс}$



$t = 1.81 \text{ мс}$

Результаты экспериментов (2D возмущения)

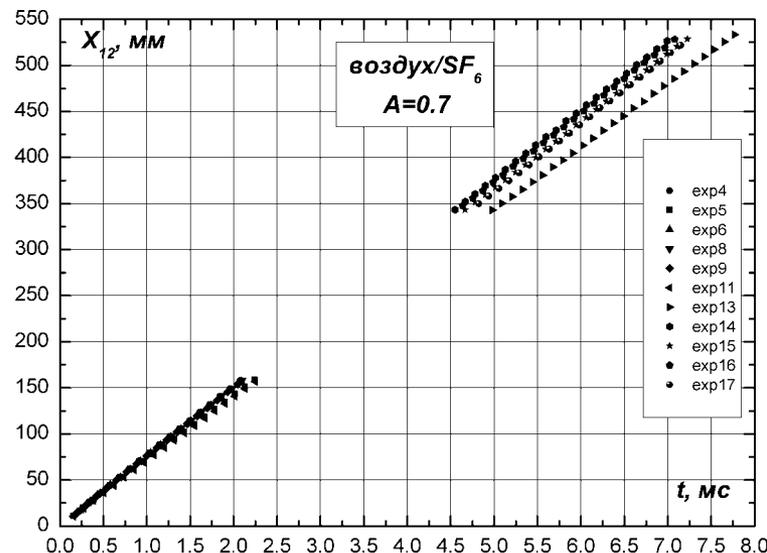
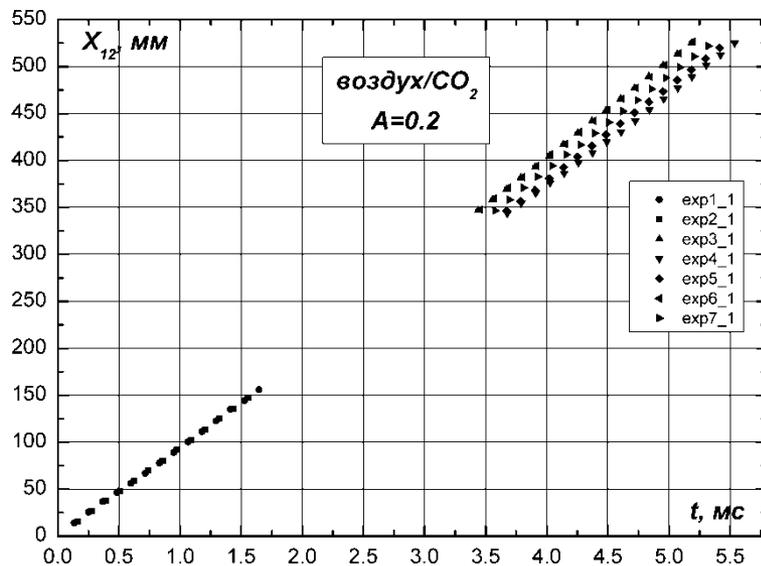


По изображениям определялась скорость D_2 УВ в тяжелом газе, время начала взаимодействия УВ с возмущениями границы раздела газов - t_{sw} . По соотношению:

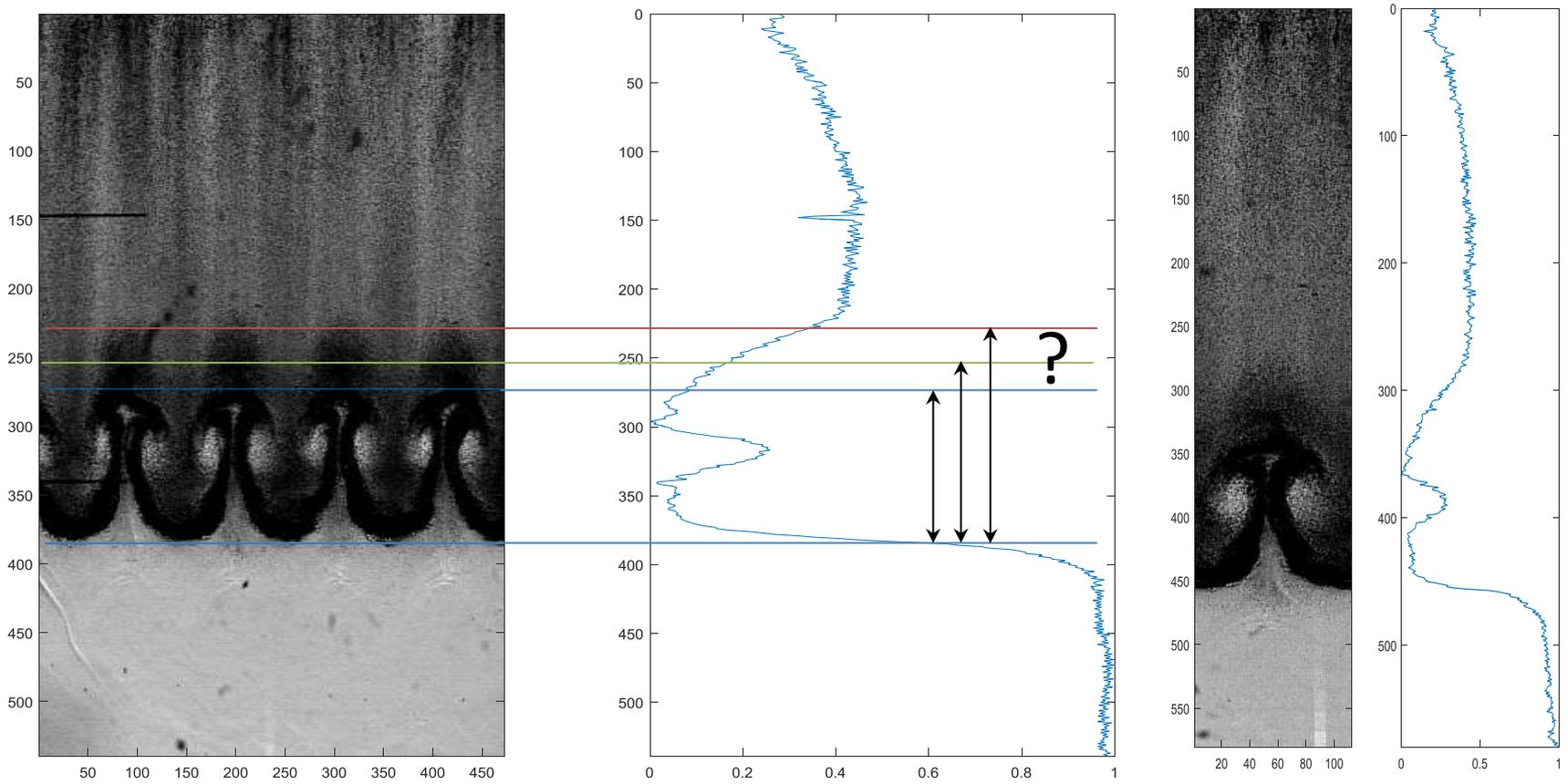
$u_2 = \frac{2}{\gamma_2 + 1} \left(M_2 - \frac{1}{M_2} \right) c_2$ вычислялась скорость течения за фронтом УВ (γ_2 - показатель адиабаты тяжелого газа, c_2 - скорость звука в тяжелом газе, $M_2 = D_2/c_2$ - число Маха ударной волны).

Скорость УВ D_1 в легком газе (воздухе) определялась по осциллограммам, полученным с датчиков давления, расположенных в легком газе.

Для каждого эксперимента с газовыми системами с $A=0.2$ и $A=0.7$ определены временные зависимости траектории фронта проникновения легкого вещества в тяжелое $X_{12}(t)$.



Результаты экспериментов (2D возмущения)



1. Начальное развитие возмущений до момента t^* :

$$h = h_0 + 2\alpha A \Delta V t, (h \sim t)$$

где $h = h^b$ или h^s и $\alpha = \alpha^b$ или α^s ; $h_0 = h_0^b$ или h_0^s – начальная ширина ($t = 0$),
 t – время после УВ

$$2. h = h^*(1 + \frac{\dot{h}^*}{\theta h^*} (t - t^*))^\theta, (h \sim t^\theta)$$

где $h^* = h_0 + 2\alpha A \Delta V t^*$, $\dot{h}^* = 2\alpha A \Delta V$, и $\theta (= \theta^b$ или $\theta^s)$ безразмерный параметр,
 $t^* = \frac{h_0^{b+s}}{\Delta V} \beta$, где β – безразмерная "константа"

Для моделирования экспериментов необходимо 2 типа входных параметров:

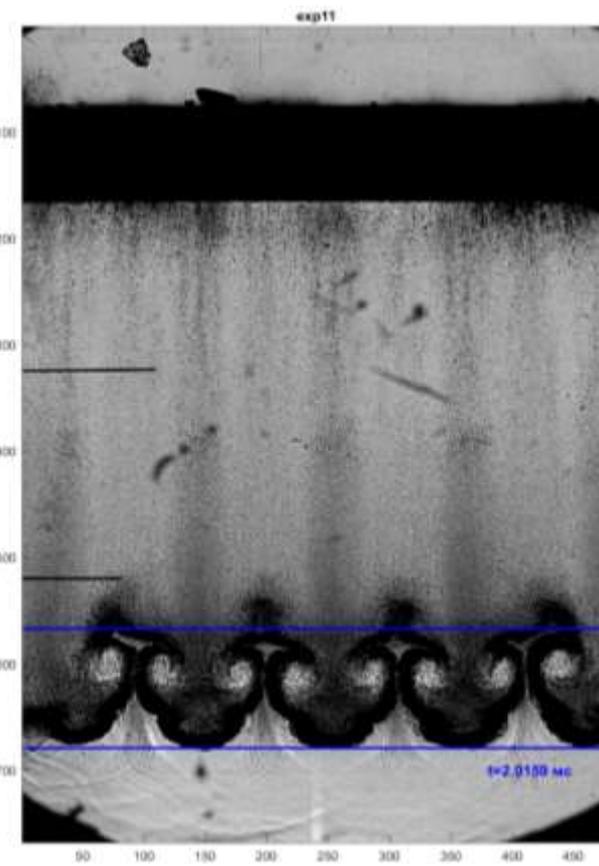
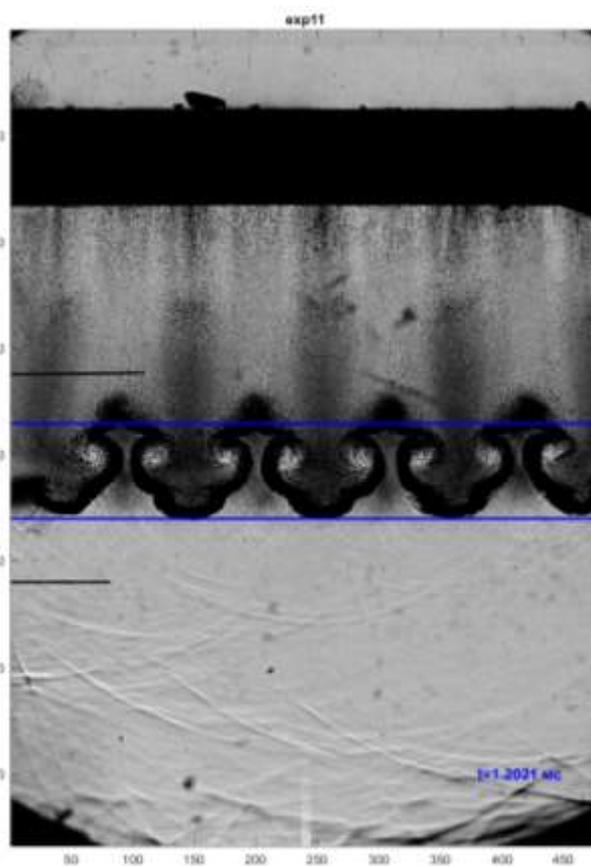
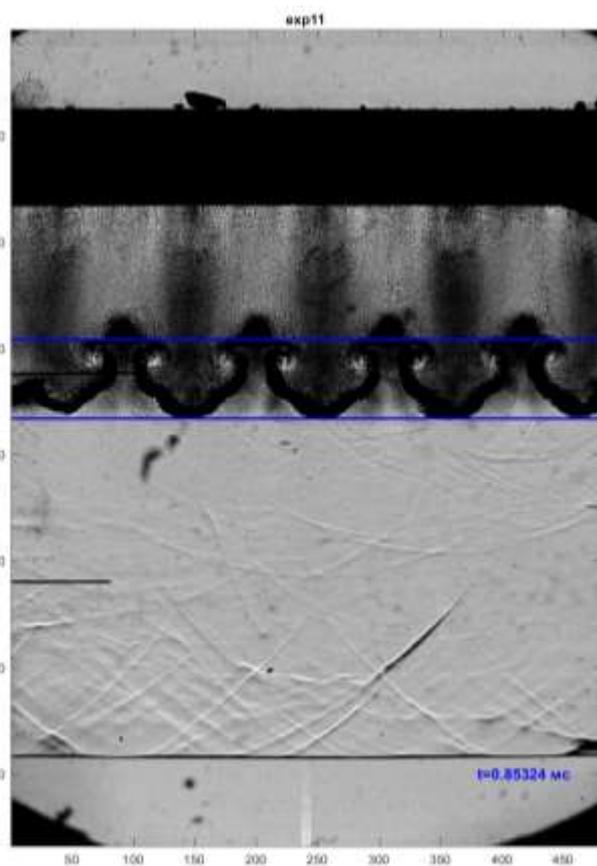
1. Динамические параметры (определяемые в эксперименте ($A, W_i, \Delta V_{shock}$));
2. Безразмерные параметры ($\alpha^b, \alpha^s, \theta^b, \theta^s$ и β)

A	W_i	ΔV_{shock}		
0.7	417 м/с	74 м/с		
α^b	α^s	θ^b	θ^s	β
0.06	0.1	0.25	0.36	6

Для A=0.7

Результаты экспериментов (сравнение с моделью) «ранние» времена (2D возмущения)

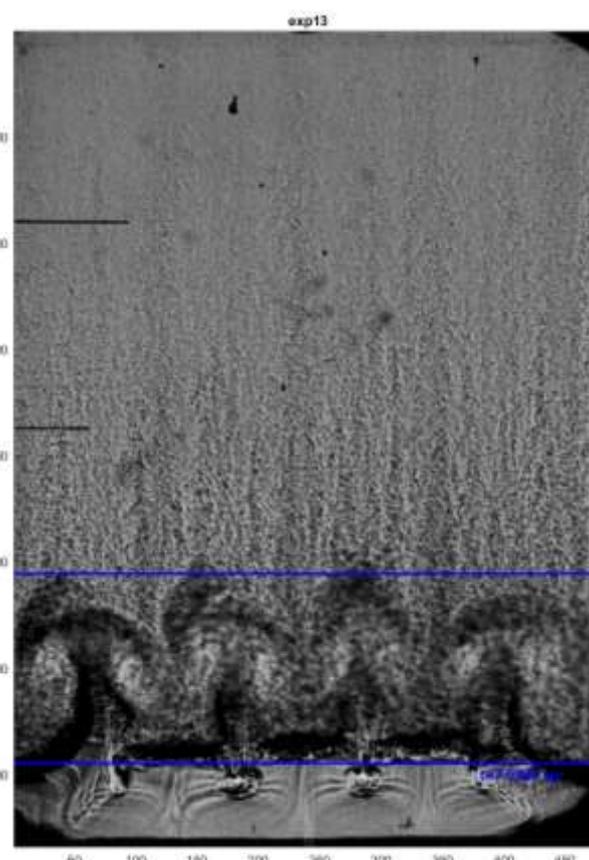
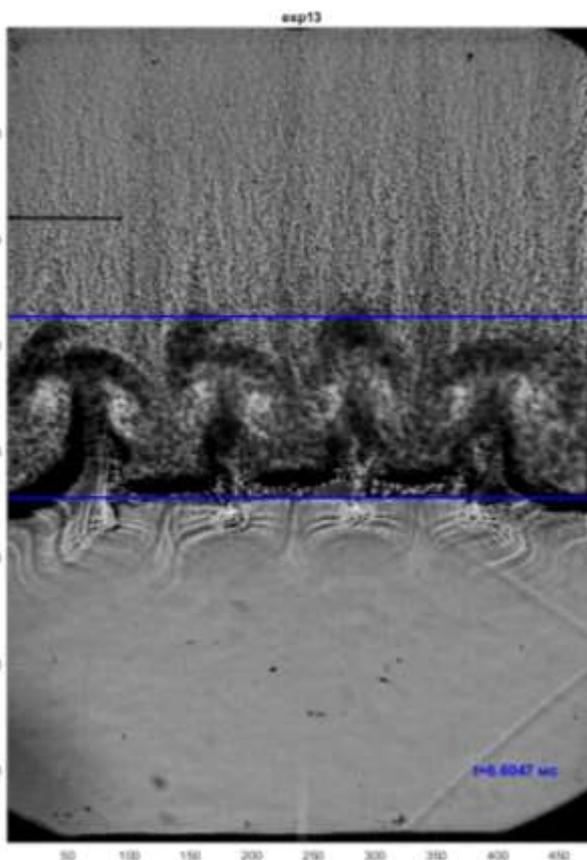
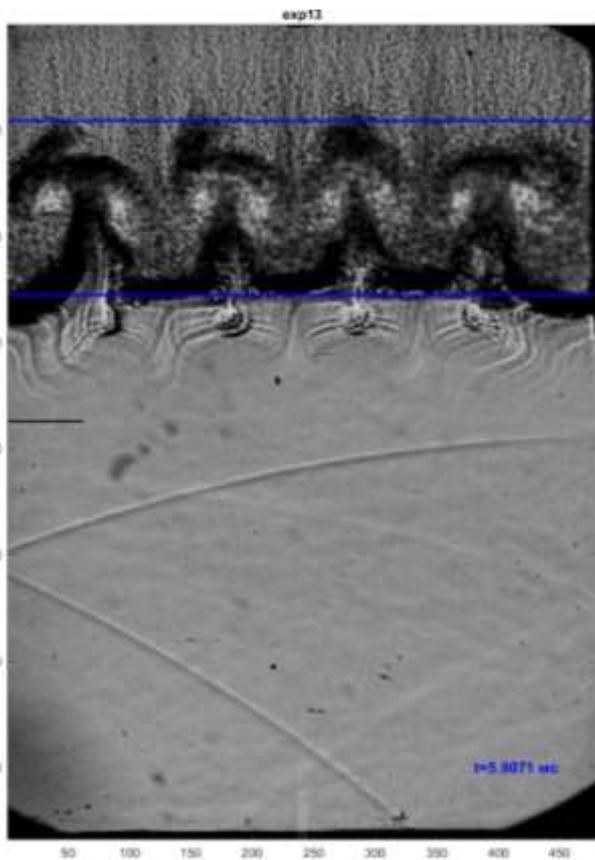
$A=0.7$



Результаты экспериментов (сравнение с моделью) «поздние» времена (2D возмущения)

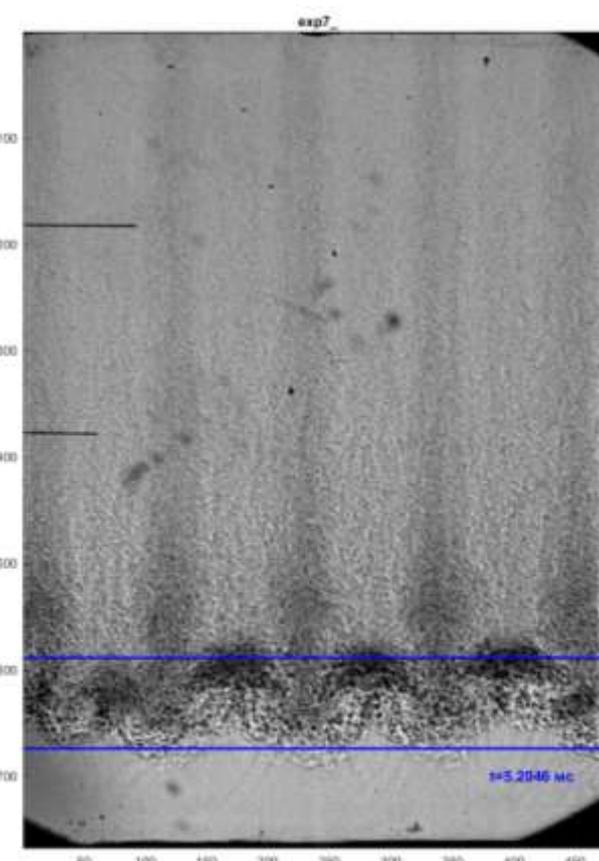
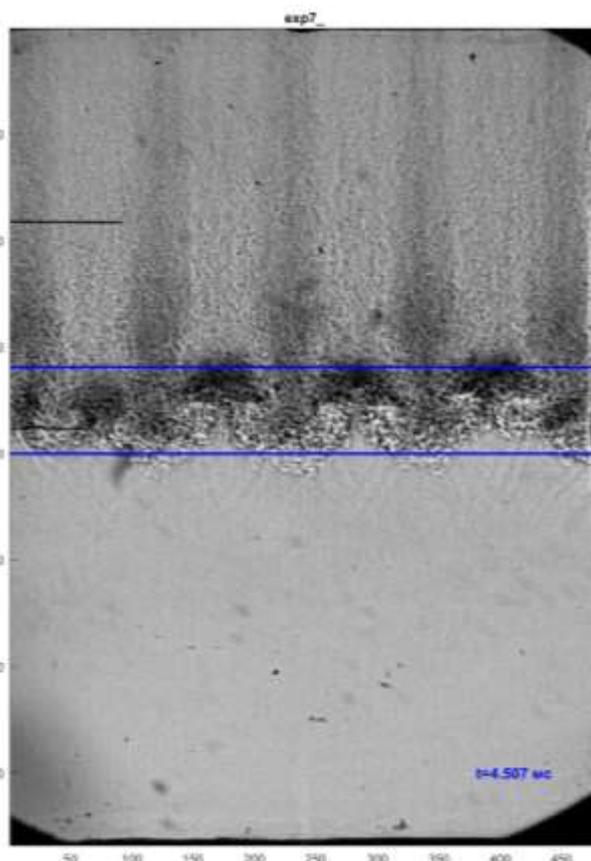
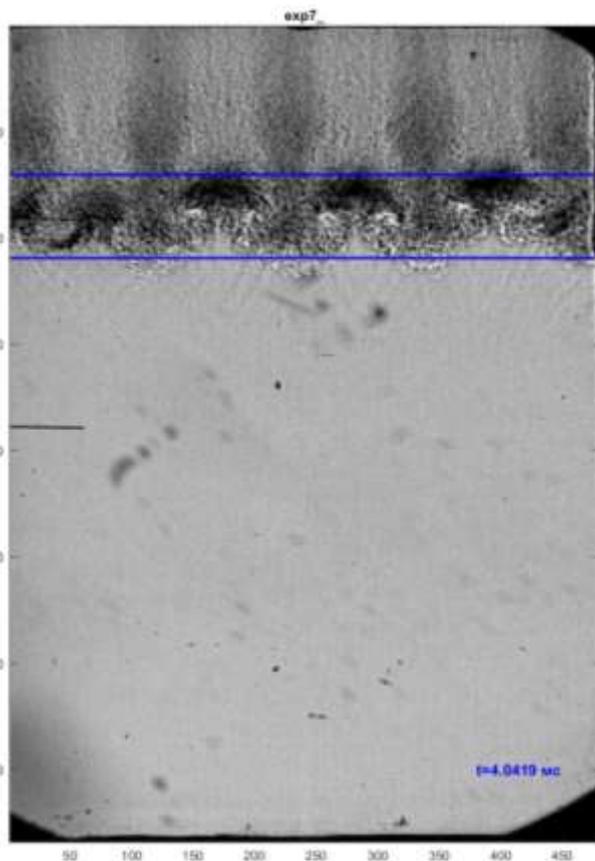


$A=0.7$



Результаты экспериментов (сравнение с моделью)
«поздние» времена (2D возмущения)

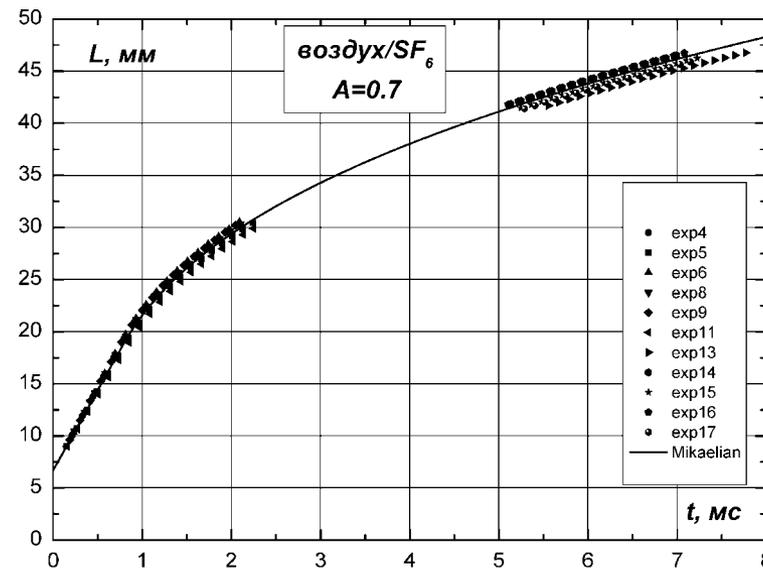
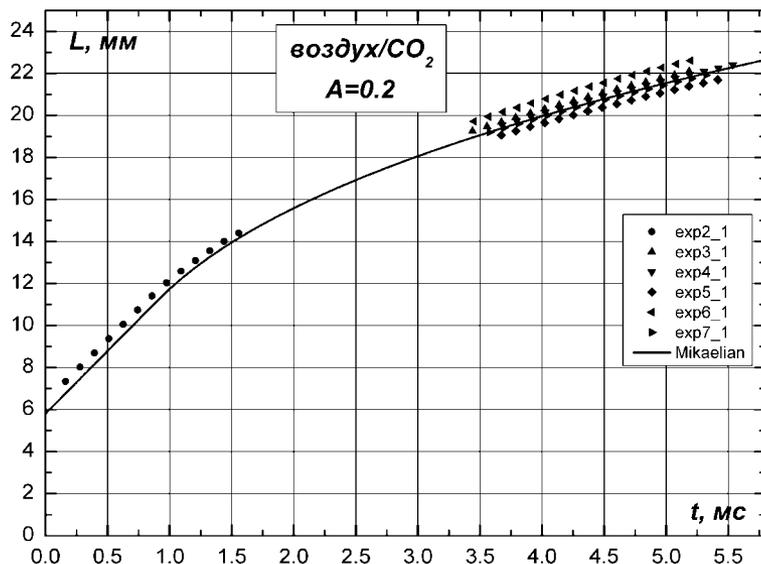
$A=0.2$



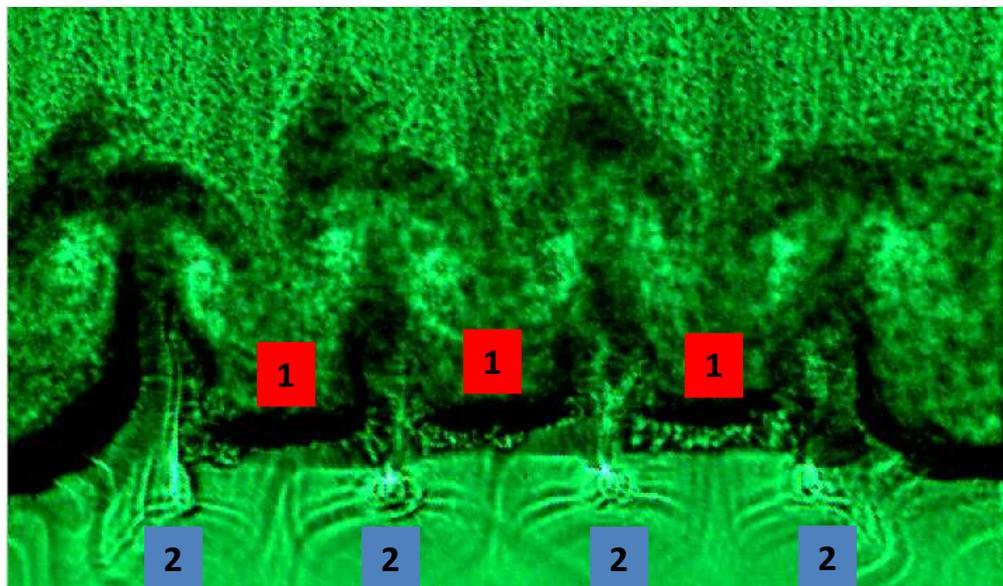
Результаты экспериментов (2D возмущения)



α^b	α^s	θ^b	θ^s	β
0.06	0.1	0.25	0.36	6

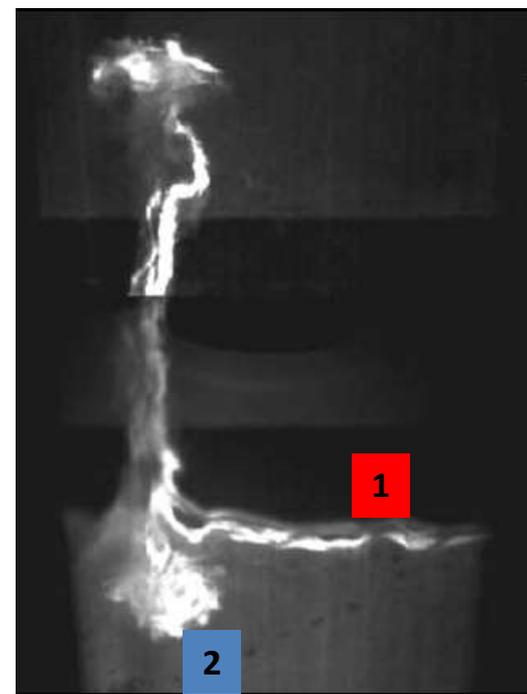


Air/SF6, $M=1.2$



1. Сплющивание «пузыря»
2. Турбулентная «струя» внизу основной

He/SF6, $M=1.95$



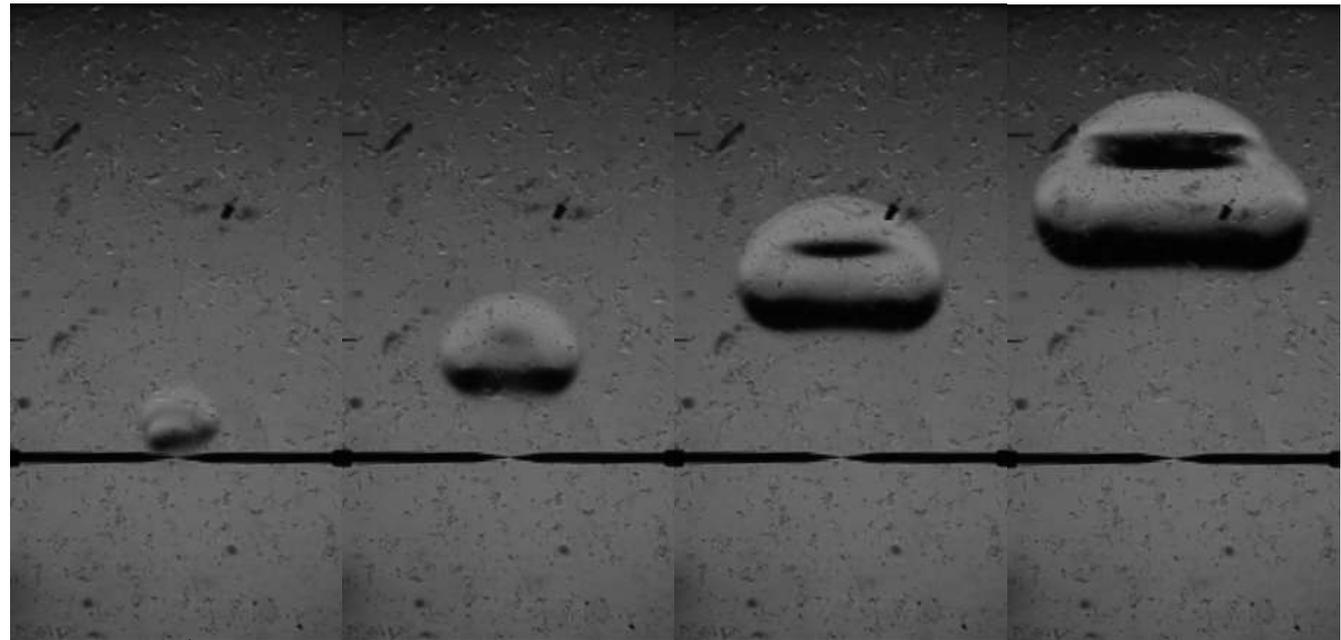
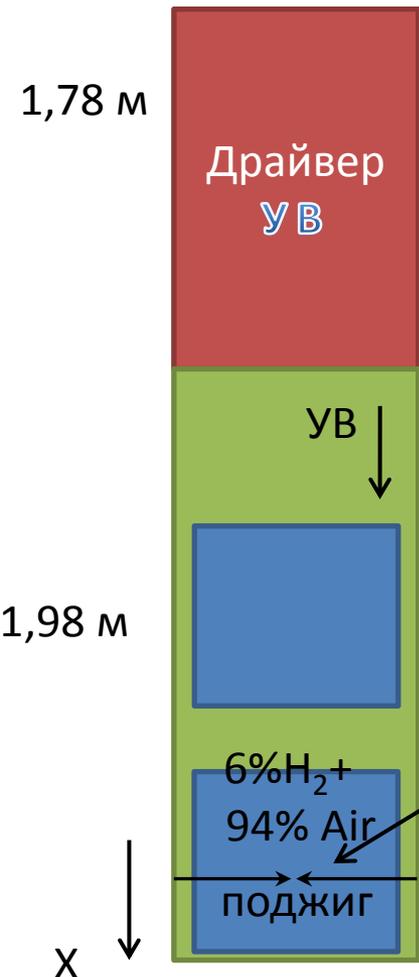
«Experimental validation of a Richtmyer–Meshkov scaling law» B. Motl, J. Oakley, D. Ranjan, C. Weber, M. Anderson, and R. Bonazza
PHYSICS OF FLUIDS 21, 126102 2009

- Экспериментально исследовалось развитие неустойчивости Рихтмайера – Мешкова на контактных границах разноплотных газовых сред с одномодовыми 2D начальными возмущениями;
- $A = 0.2$ и 0.7 ; $M_{yB} = 1.2$; $a/\lambda = 0.14$
- Развитие одномодовых 2D возмущений сравнивались с моделью;
- Анализ экспериментальных изображений наводит на близость эксперимента и модели;
- Особенности развития 2D возмущений согласуются с полученными в работах University of Wisconsin-Madison и LANL

3D возмущение

Ударная труба
(0,138×0,138×3,76 м)

Начальные возмущения



а) – на время 87.5 мс б) – на время 175 мс в) – на время 262 мс г) – на время 350 мс

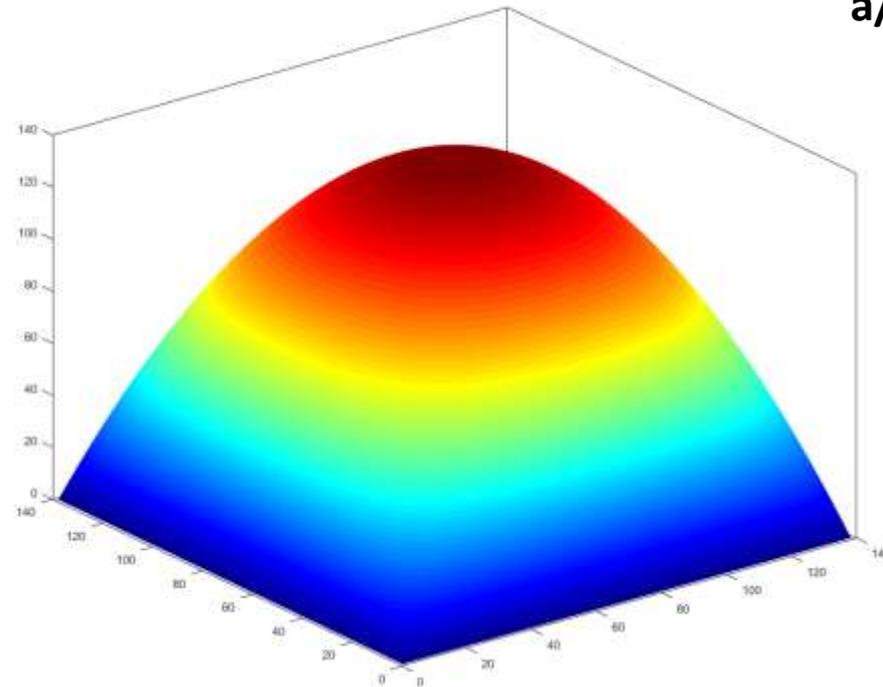
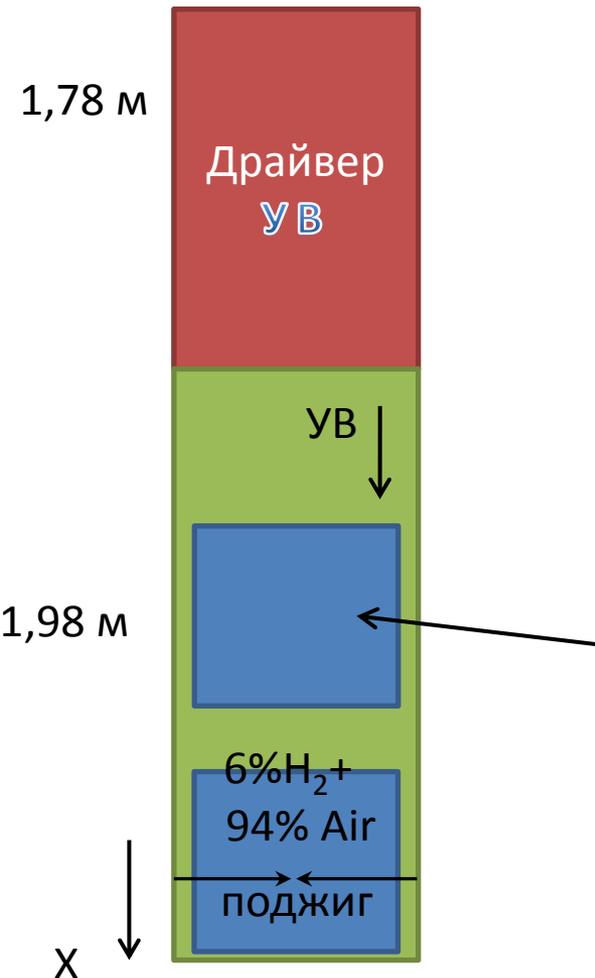
6 % водорода H_2 в воздухе. Распространение пламени в канале ударной трубы непосредственно после инициирования горения

3D возмущение

Ударная труба
(0,138×0,138×3,76 м)

Начальные возмущения

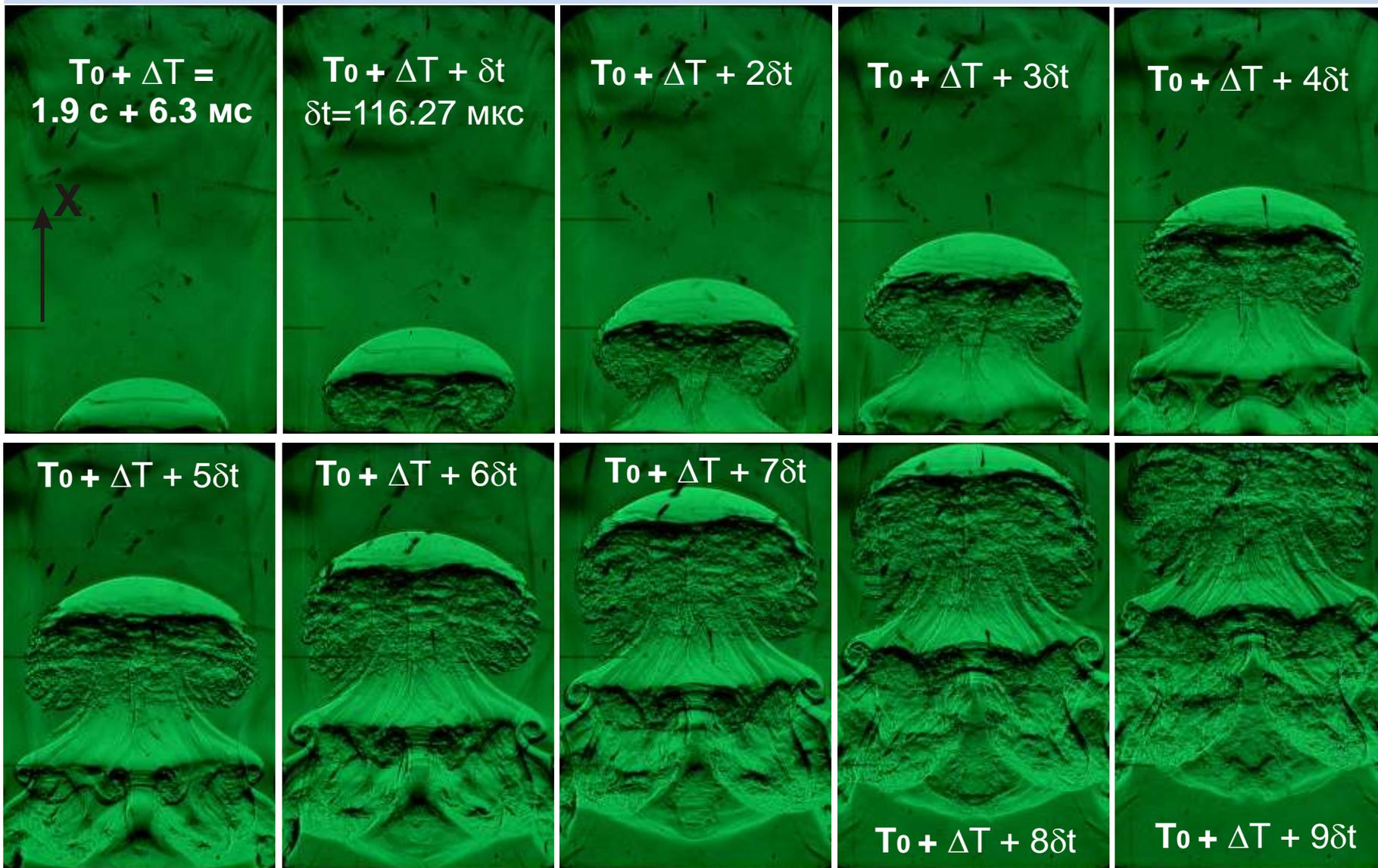
$a/\lambda \sim 1$



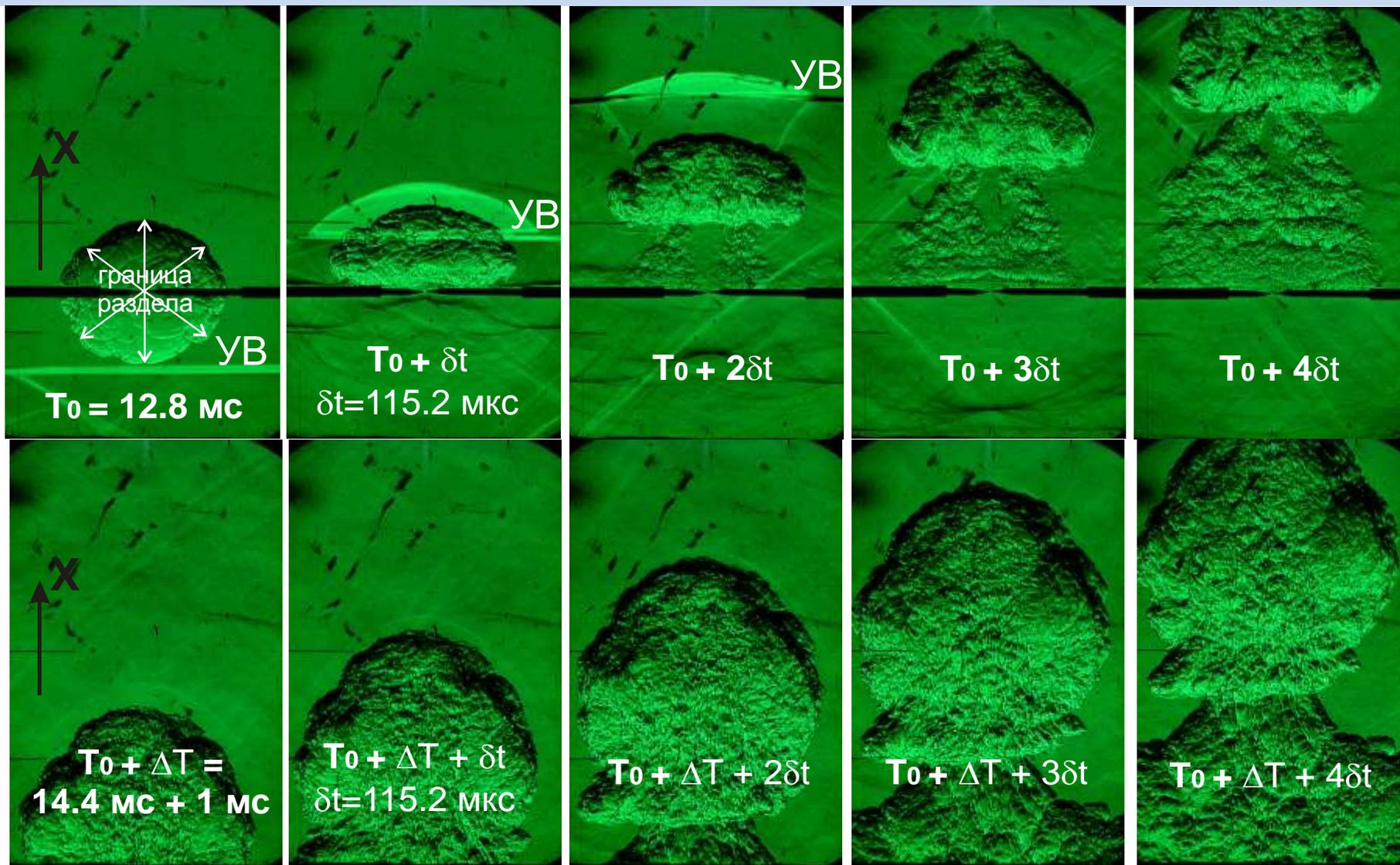
6 % водорода H₂ в воздухе.

Распространение пламени в канале ударной трубы

Результаты экспериментов (3D возмущение 6% H_2 +94% Air)

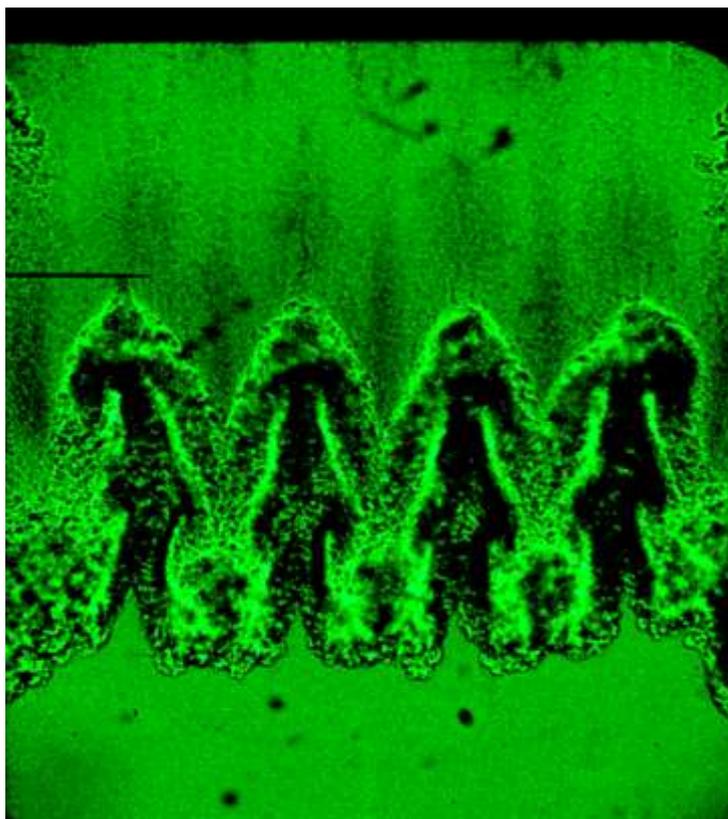


Результаты экспериментов (3D возмущение 16% H_2 + 84% Air)

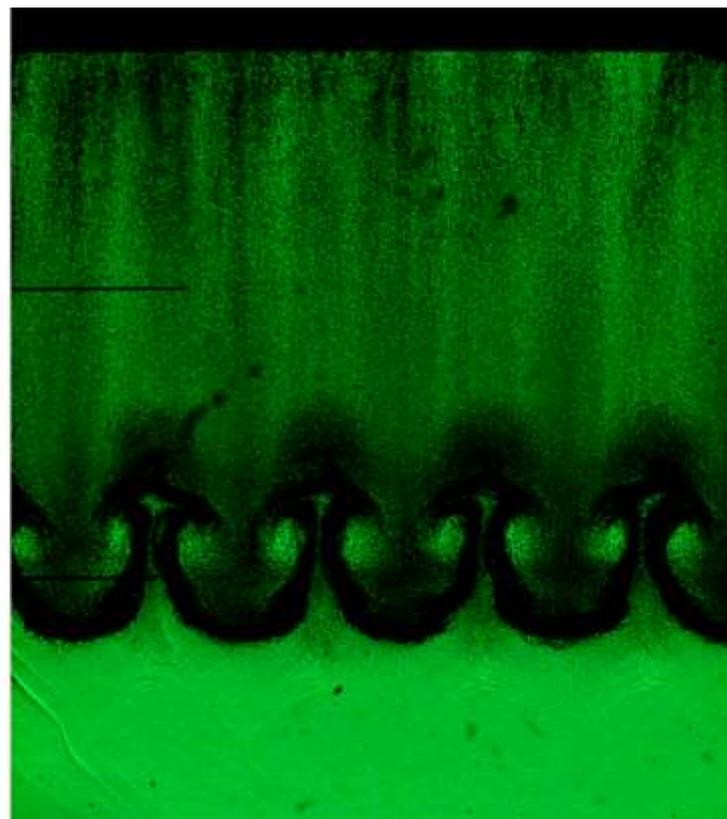


- В экспериментах с 6 % водорода в воздухе, со временем, фронт пламени движущийся со скоростью ~ 0.5 м/с, образовывал гладкую, тонкую полусферу. Скорость движения фронта пламени существенно меньше скорости развития неустойчивости РМ на контактной границе. При использовании 16 %-ой водородо-воздушной смеси, формировался очаг пламени по форме близкой к сферической, увеличивающийся со скоростью ~ 6 м/с
- По оценкам, ширина пламени, которое образует границу раздела разноплотных газов, составляет $\sim 0.1 - 0.8$ мм. Такое значение является рекордно низким в экспериментах на ударных трубах по изучению гидродинамических неустойчивостей РТ и РМ и турбулентного перемешивания сжимаемых газовых сред, как в России, так и за рубежом, при использовании «без мембранной» технологии создания границы раздела.
- После взаимодействия УВ с границей раздела разноплотных газовых сред наблюдалась «инверсия» начального возмущения. Дальнейшее развитие 3D возмущения в экспериментах с использованием 6 %-ой водородо-воздушной смеси определяется в основном действием неустойчивости РМ и практически не зависит от горения водорода, поскольку скорость течения за фронтом ударной волны на пару порядков больше скорости горения. Изменение формы начального возмущения в экспериментах с 16 %-ой водородо-воздушной смесью происходит как за счет действия неустойчивости РМ, так и, отчасти, за счет химической реакции горения, поскольку в этом случае отличие скорости течения за фронтом ударной волны не столь сильно (примерно на порядок величины) превышает скорость горения.

Неустойчивость
Рэля - Тэйлора



Неустойчивость
Рихтмайера - Мешкова



Спасибо за внимание!