

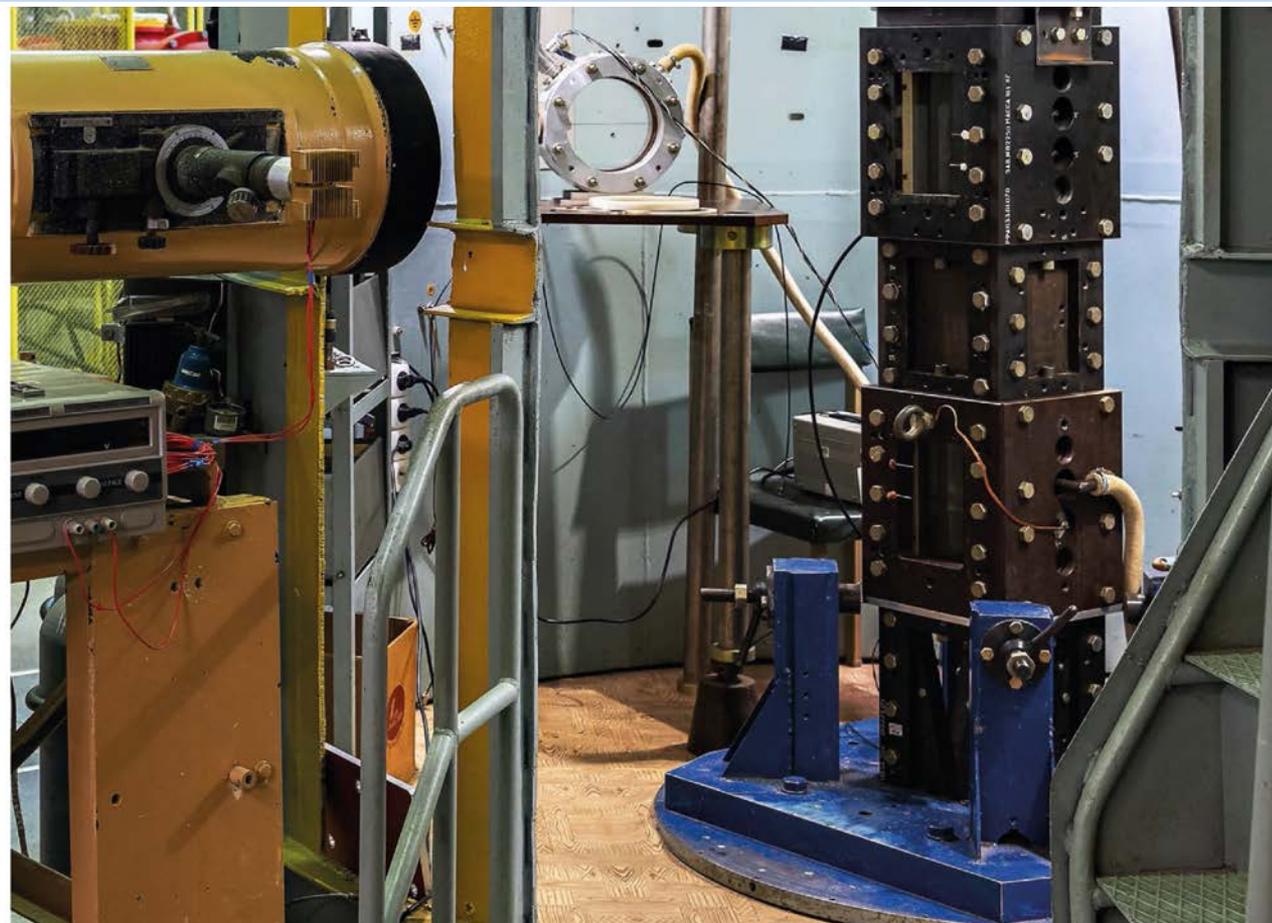
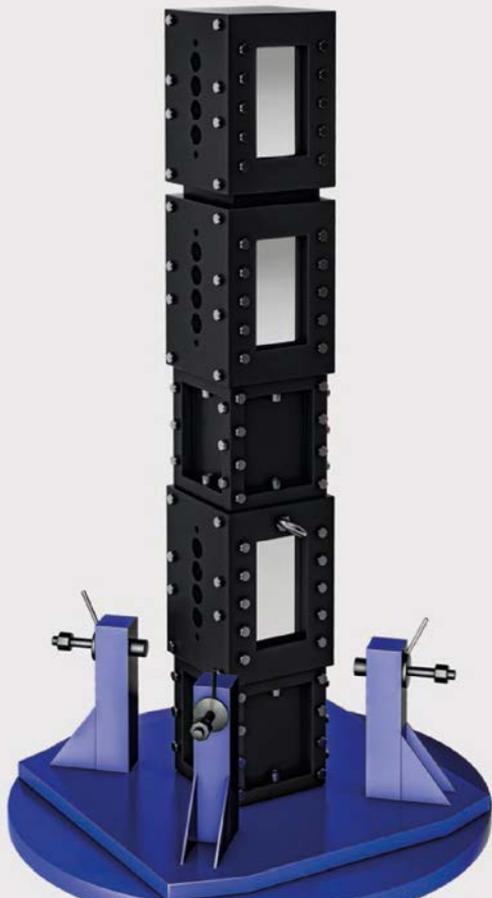
Экспериментальные исследования водородо-воздушных пламен на установках семейства МУТ

Н.Б. Аникин, А.А. Тяктев, Ю.А. Пискунов, И.Л. Бугаенко,
П.В. Промыслов, М.Е. Игнатюк, Е.С. Морозов

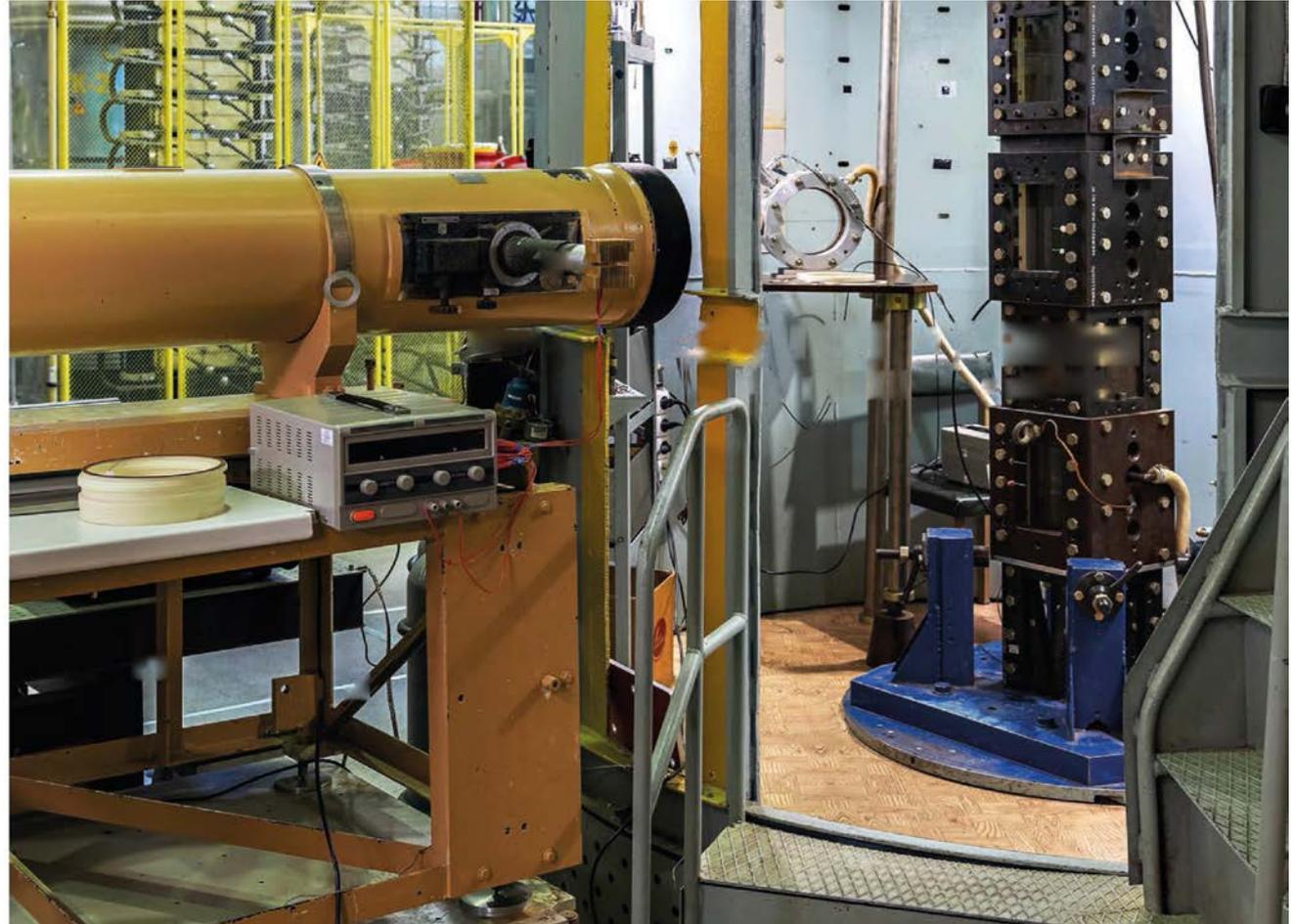
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

Снежинск, 29 мая-2 июня 2023 года

Основной задачей экспериментальных исследований на семействе установок МУТ, в составе МУТ, МУТ-ТК и МУТ-ПК, является получение данных о процессах развития и распространения фронта водородо-воздушного пламени, в том числе и в искусственно создаваемых условиях развития гидродинамических неустойчивостей.

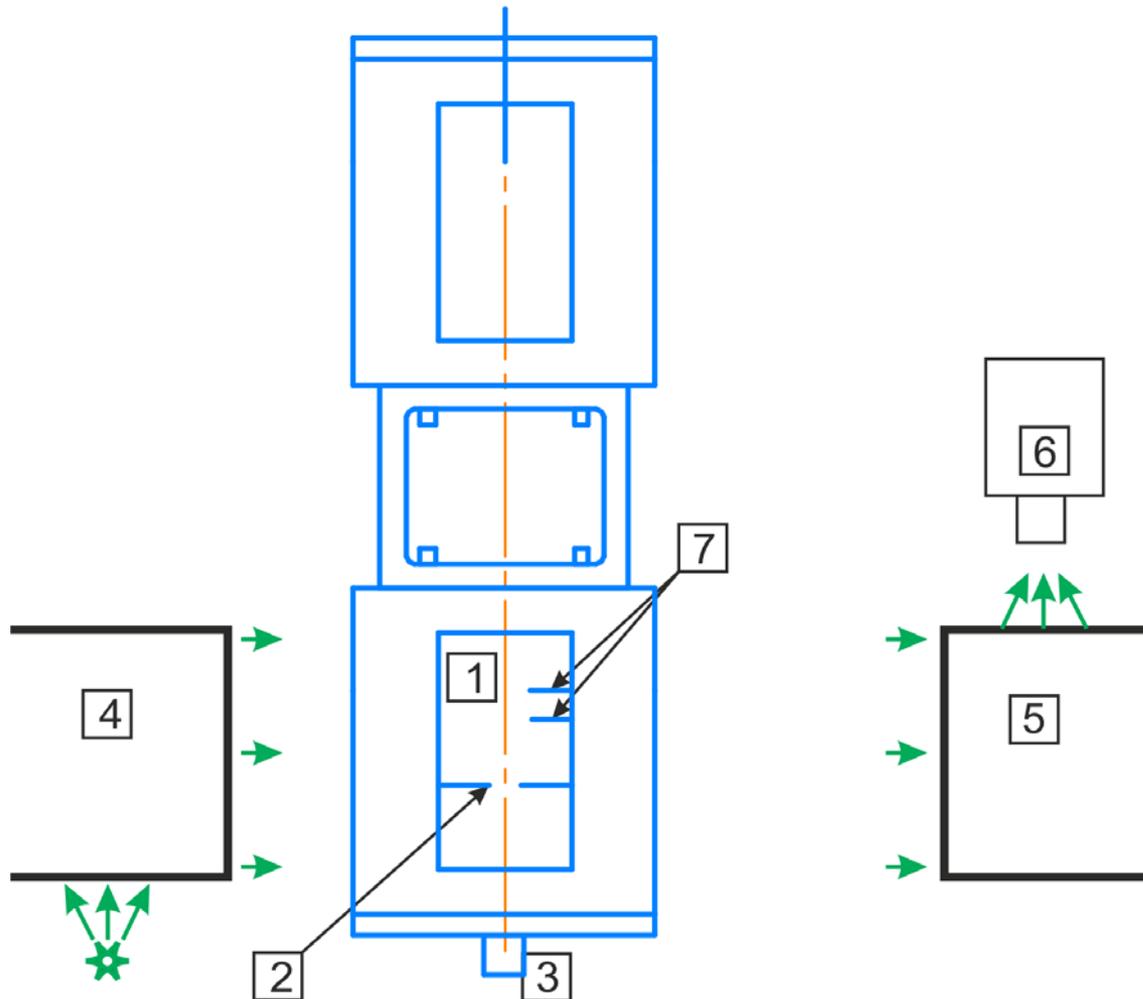


МУТ — это вертикально ориентированная труба квадратного сечения 138 x 138 мм с регулируемой высотой от 0,4 м до 10 м. Труба состоит из отсеков с оптическими окнами для шлирен-визуализации течения (пламени) с помощью теневого прибора ИАБ-451.

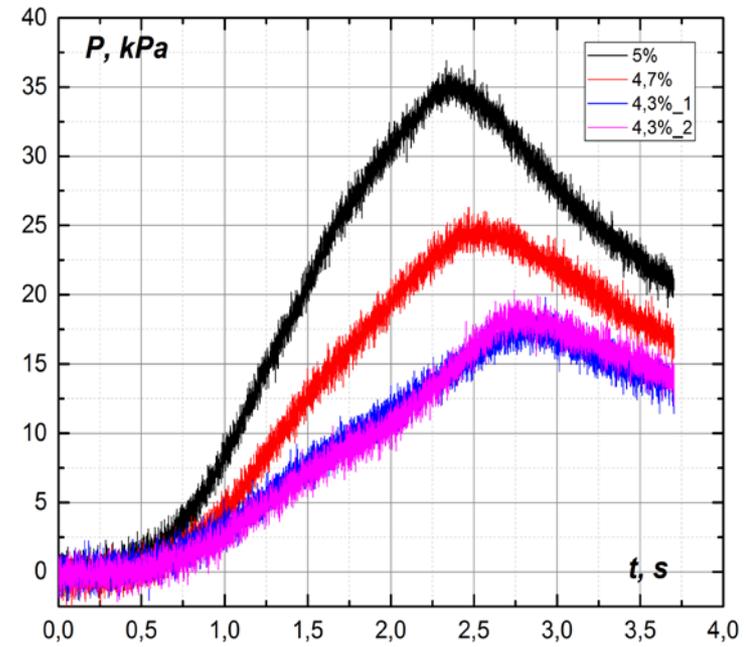


При помощи теневых приборов получают теневые изображения шлирен-методом, который по чувствительности превосходит другие, в том числе интерференционные методы. Шлирен-метод визуализирует градиент плотности в прозрачных средах.

сечение  138



- 1 – измерительная секция
- 2 – искровой промежуток;
- 3 – датчик давления;
- 4 и 5 – осветительная и приемная части теневого прибора ИАБ-451
- 6 – высокоскоростная камера
- 7 – пара реперов



Горение водородо-воздушных смесей на стенде МУТ



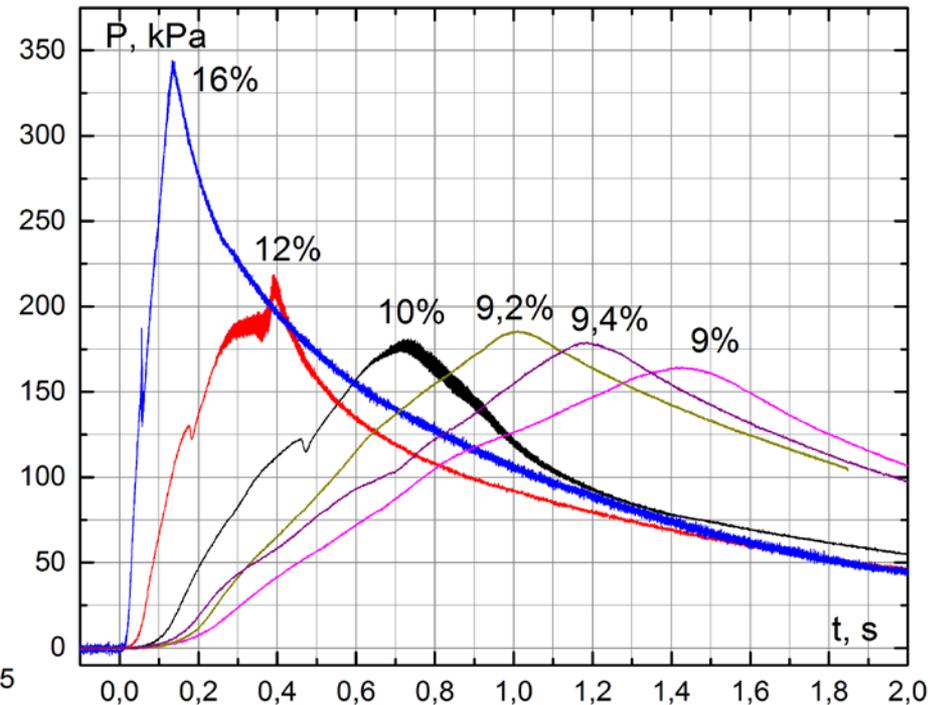
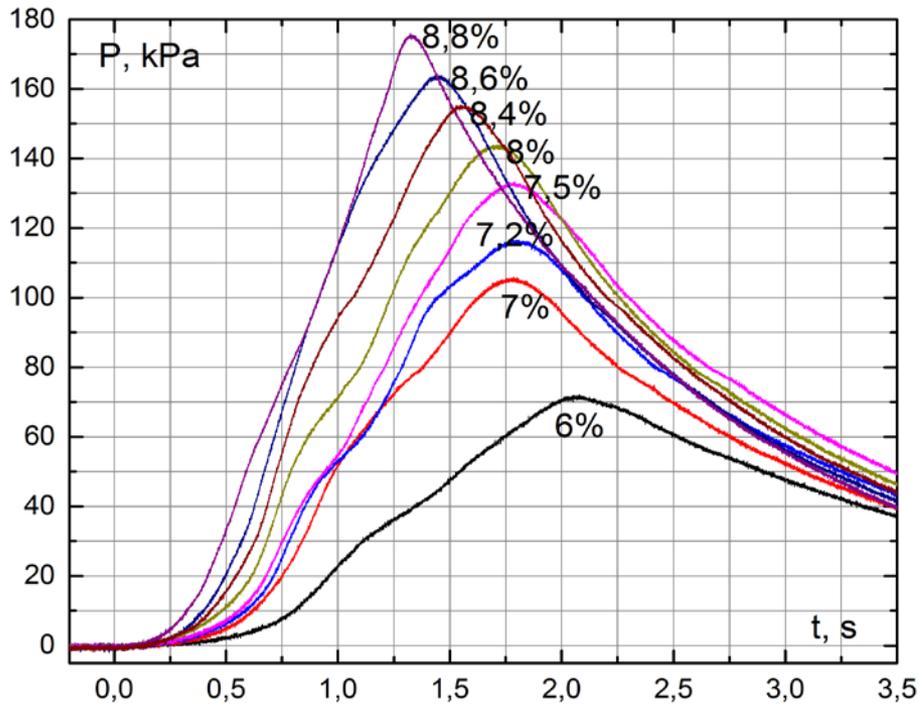
$C_{H_2} = 6 \text{ об.}\%$

$C_{H_2} = 9,4 \text{ об.}\%$

$C_{H_2} = 12 \text{ об.}\%$



Горение водородо-воздушных смесей стенд МУТ, 6-16 об. % H₂ в воздухе



Плавающие шаровые пламёна (6 ÷ 8.8 об. % H₂)

6 об. %

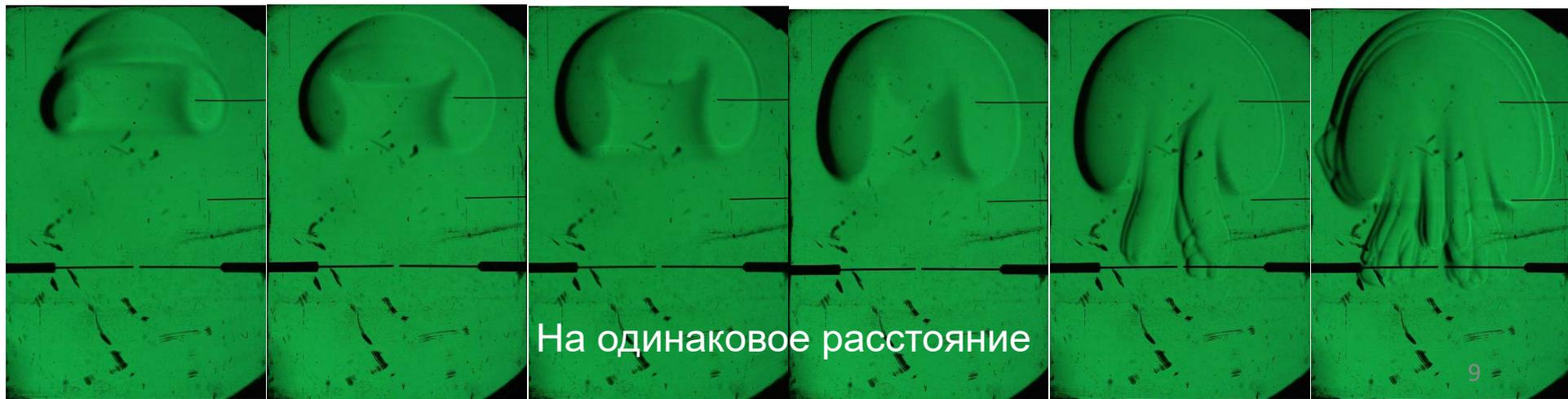
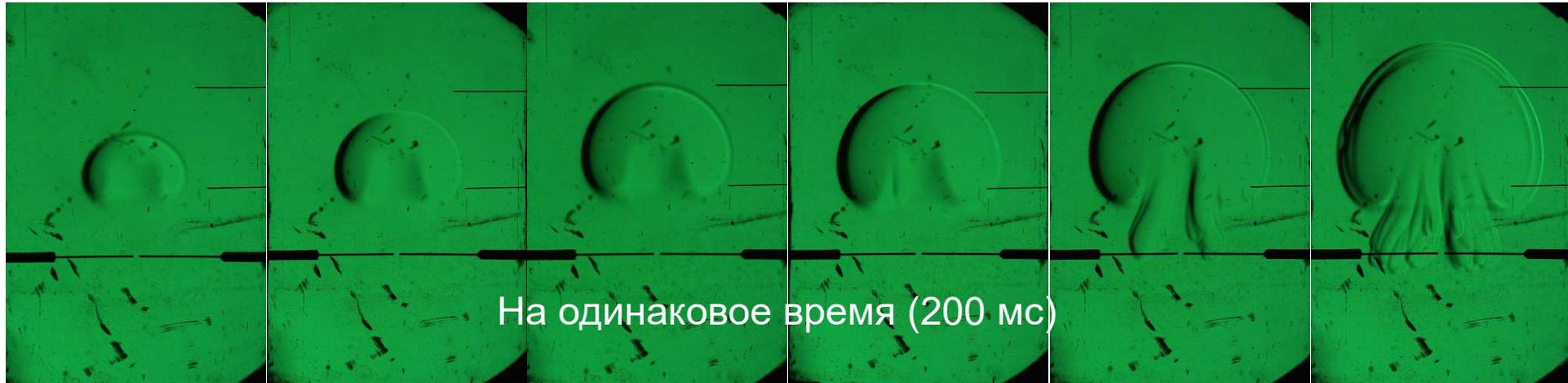
7 об. %

7.5 об. %

8 об. %

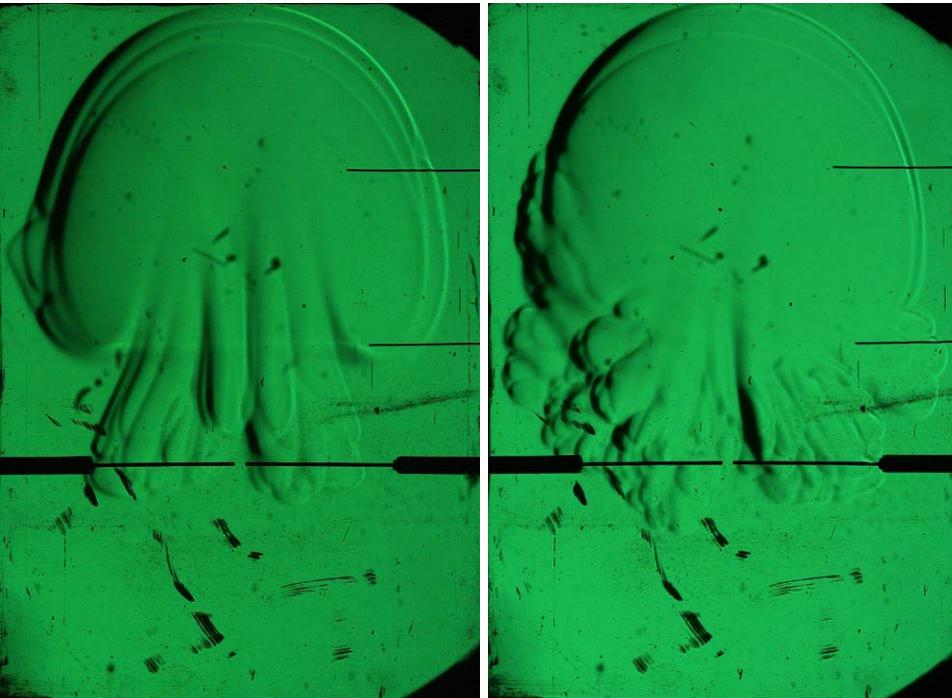
8.6 об. %

8.8 об. %

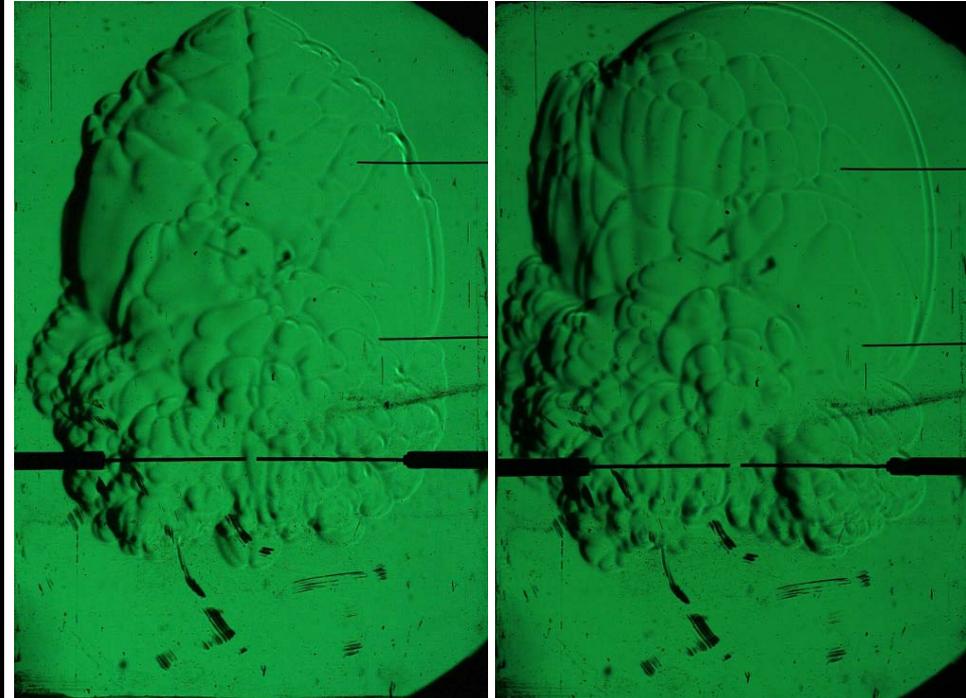


Переход от плавучего пламени к ячеистому ($8,8 \div 9$ об.% H_2)

8,8 об.%

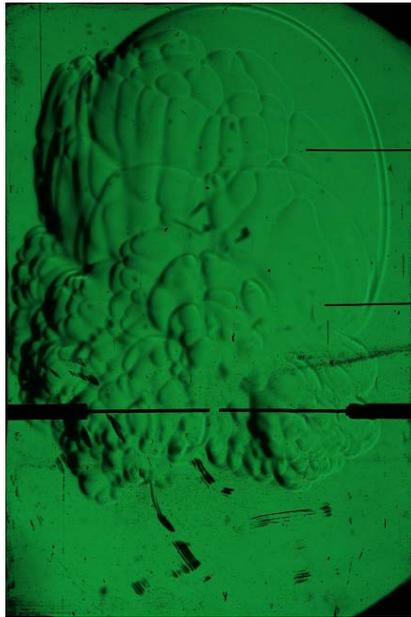


9 об.%

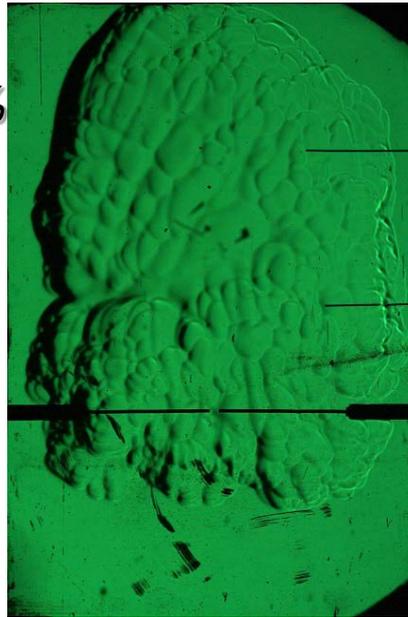


Ячеистые пламёна (9 ÷ 16 об.% H₂)

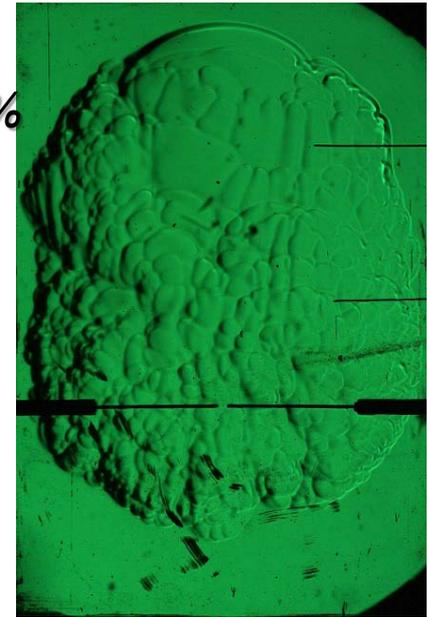
9 об.%



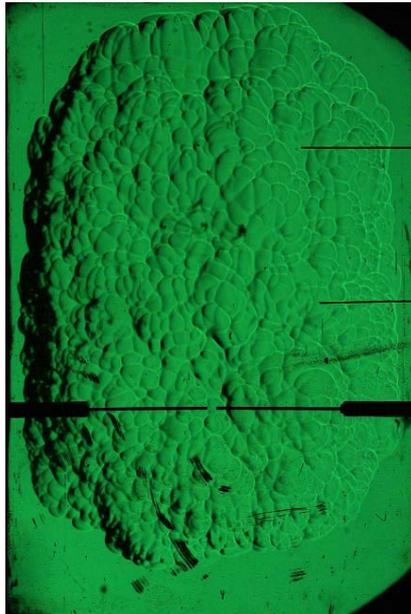
9,2 об.%



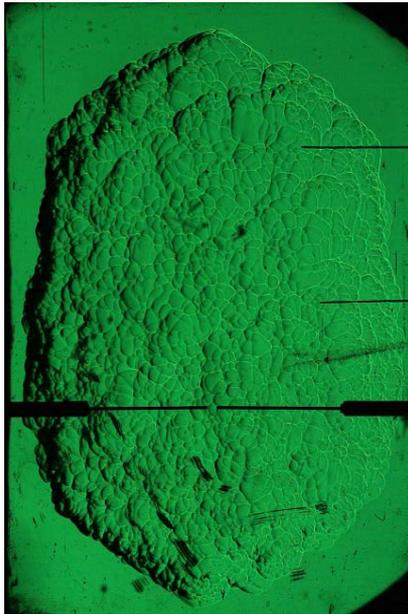
9,4 об.%



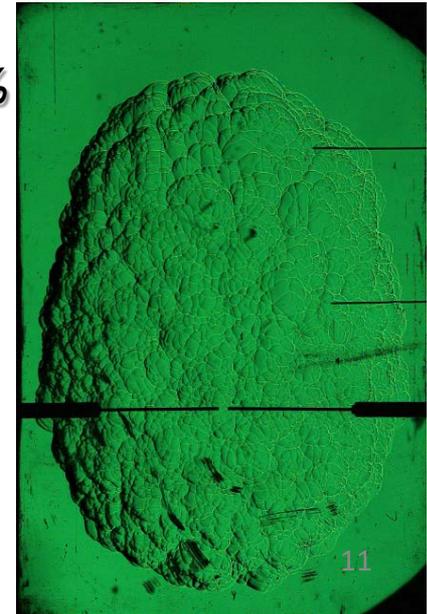
10 об.%



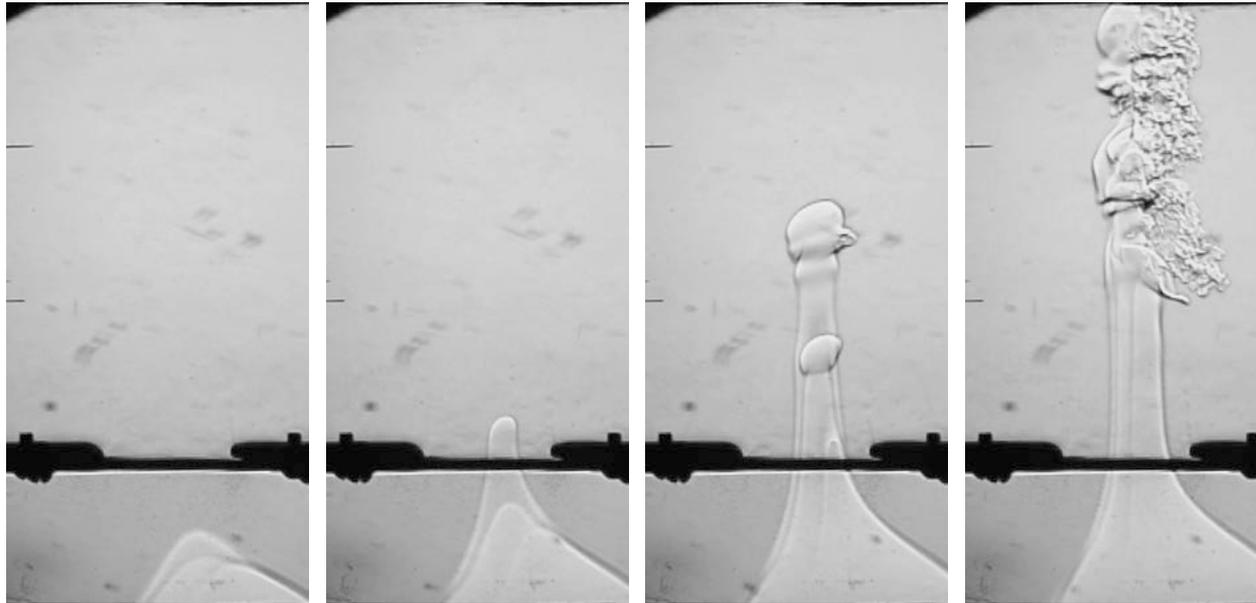
12 об.%



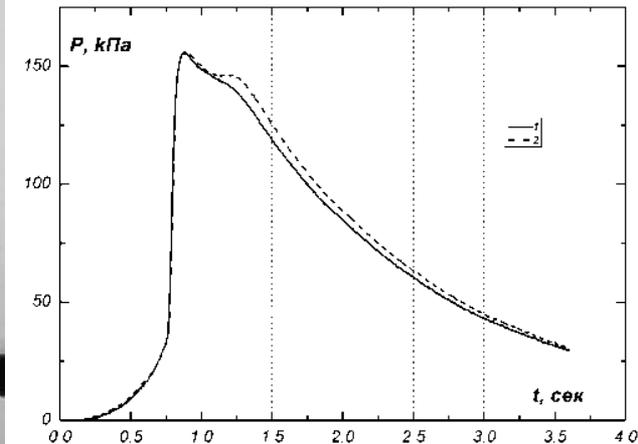
16 об.%



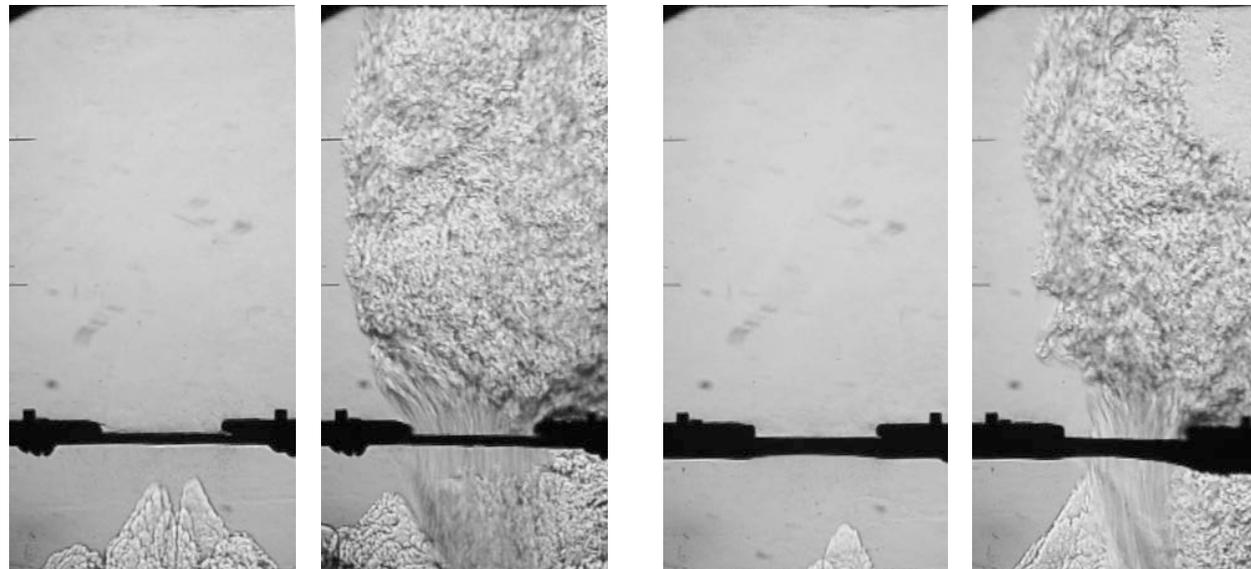
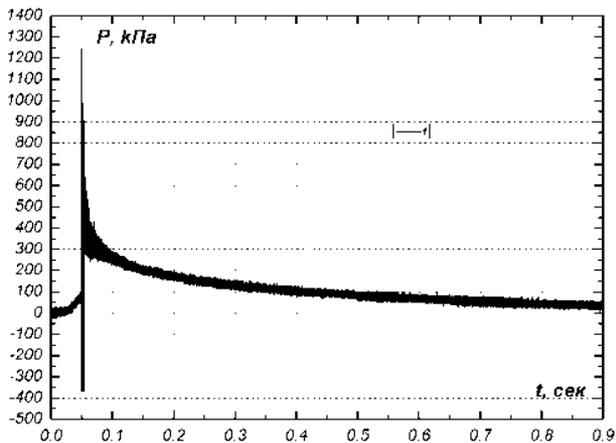
Переход пламени через перегородку с отверстием, H₂+воздух



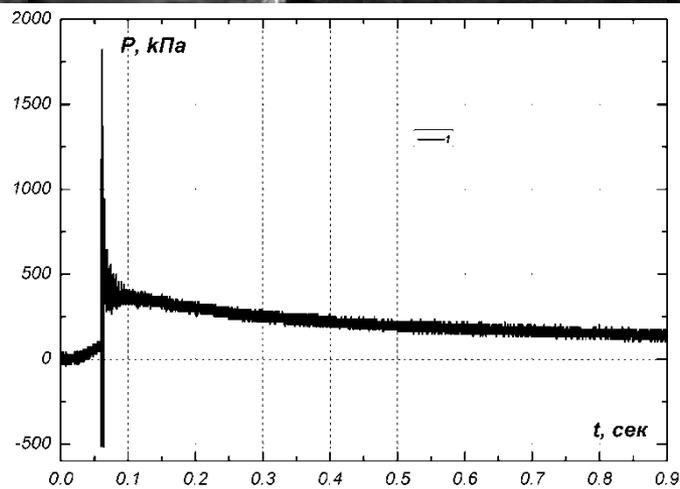
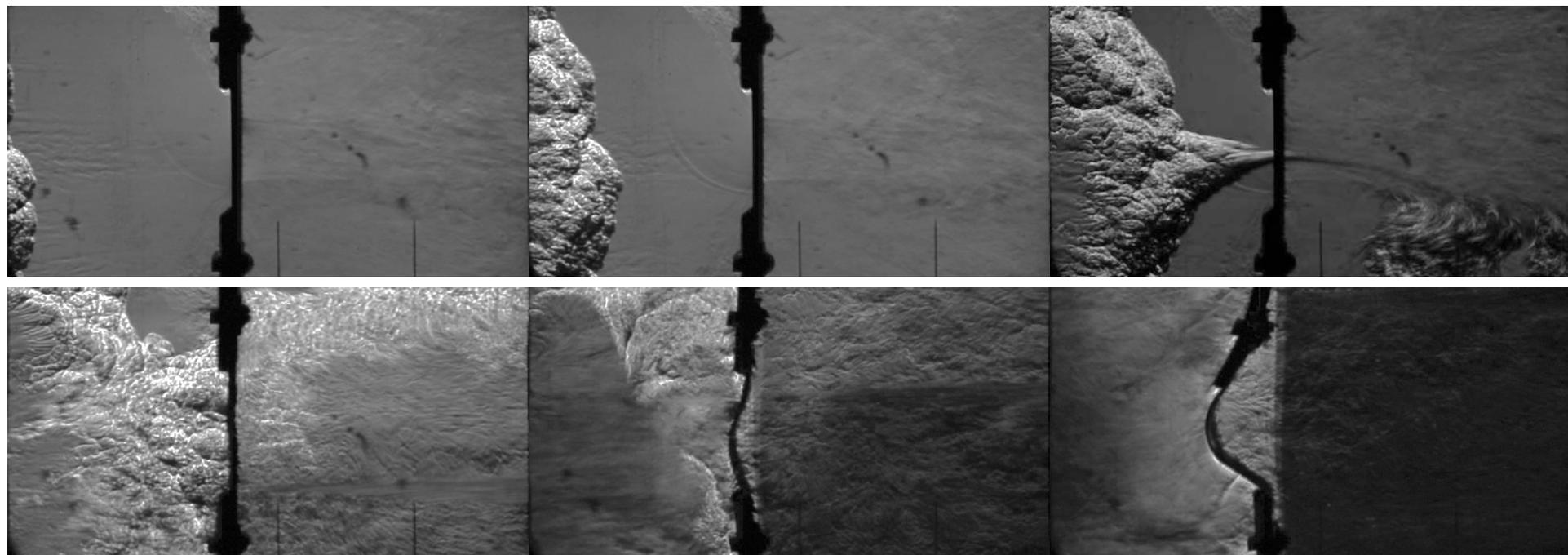
8% H₂, 15 мс



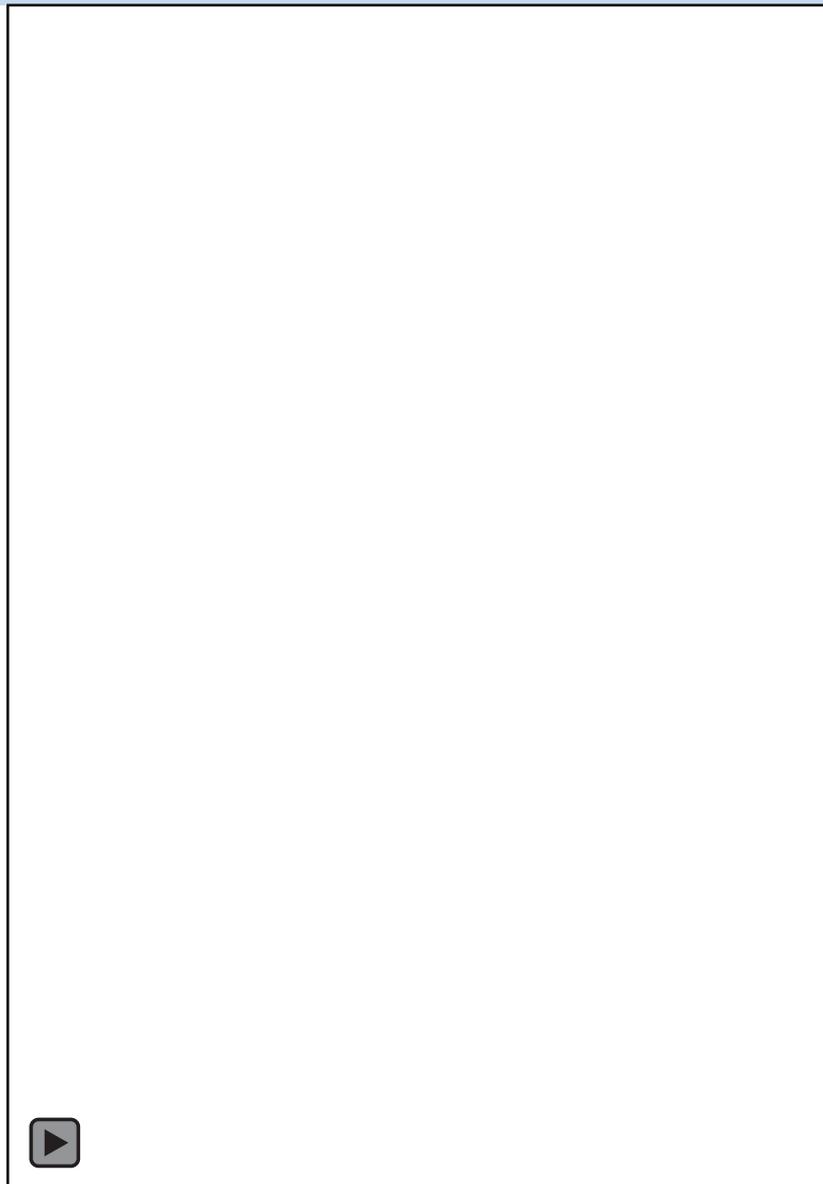
16% H₂, 3 мс



Переход пламени через перегородку с отверстием, 16% об. H₂+воздух

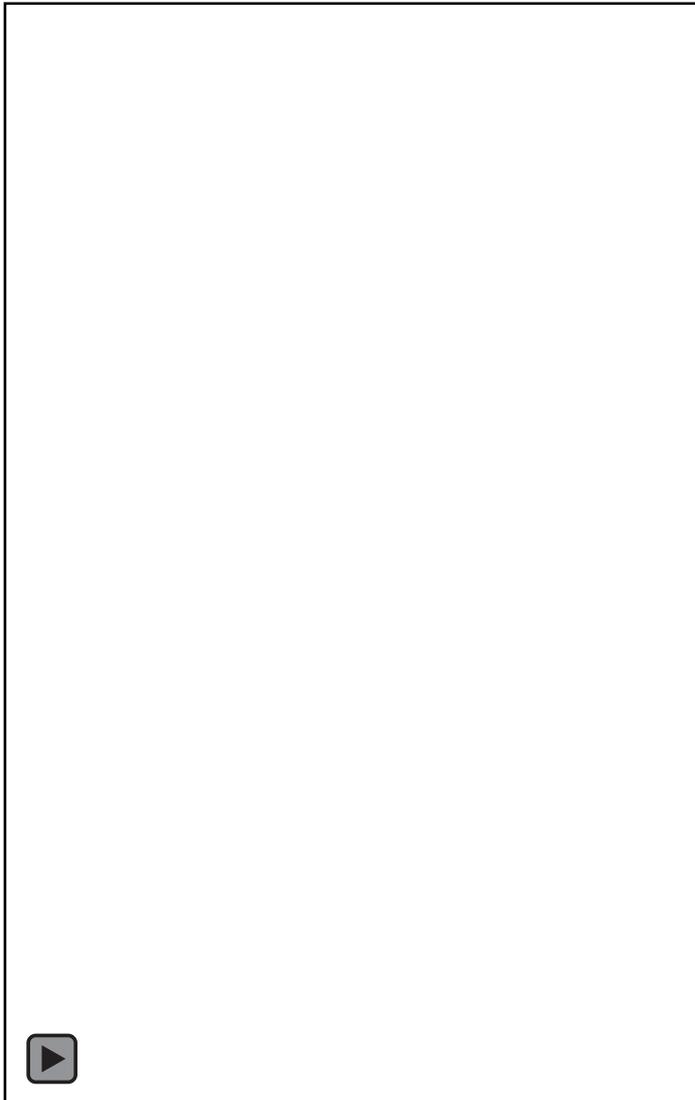


Переход пламени через перегородку с отверстием, 16 об.% Н₂

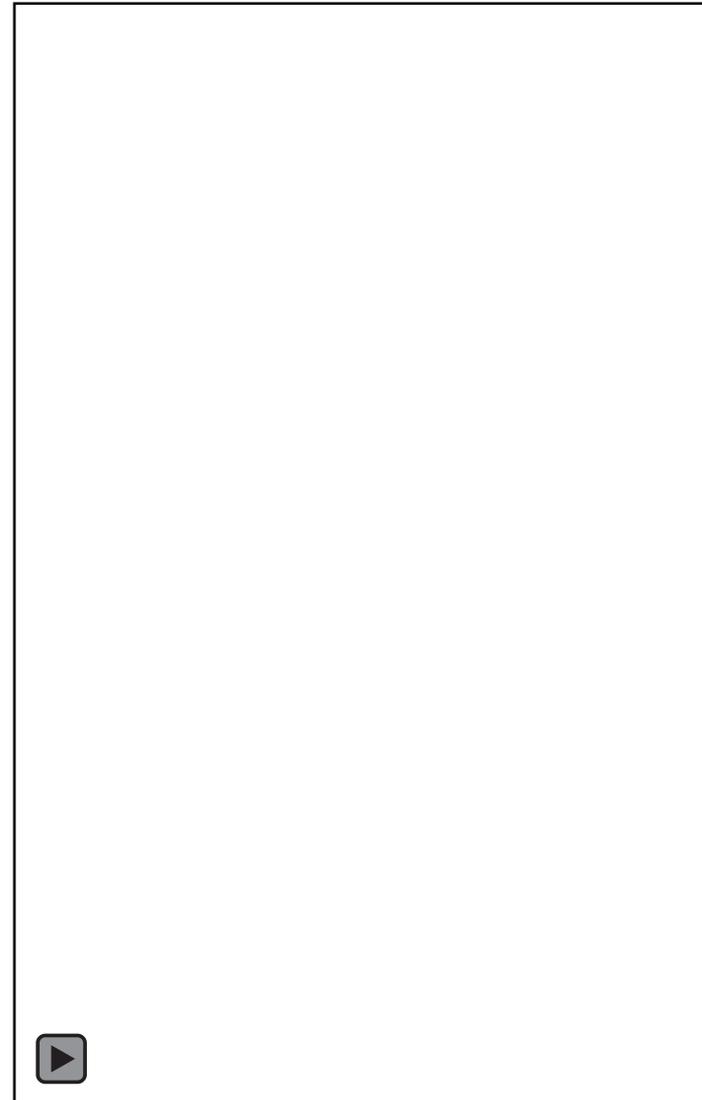


Взаимодействие пламени с решеткой, 8 об. % Н₂

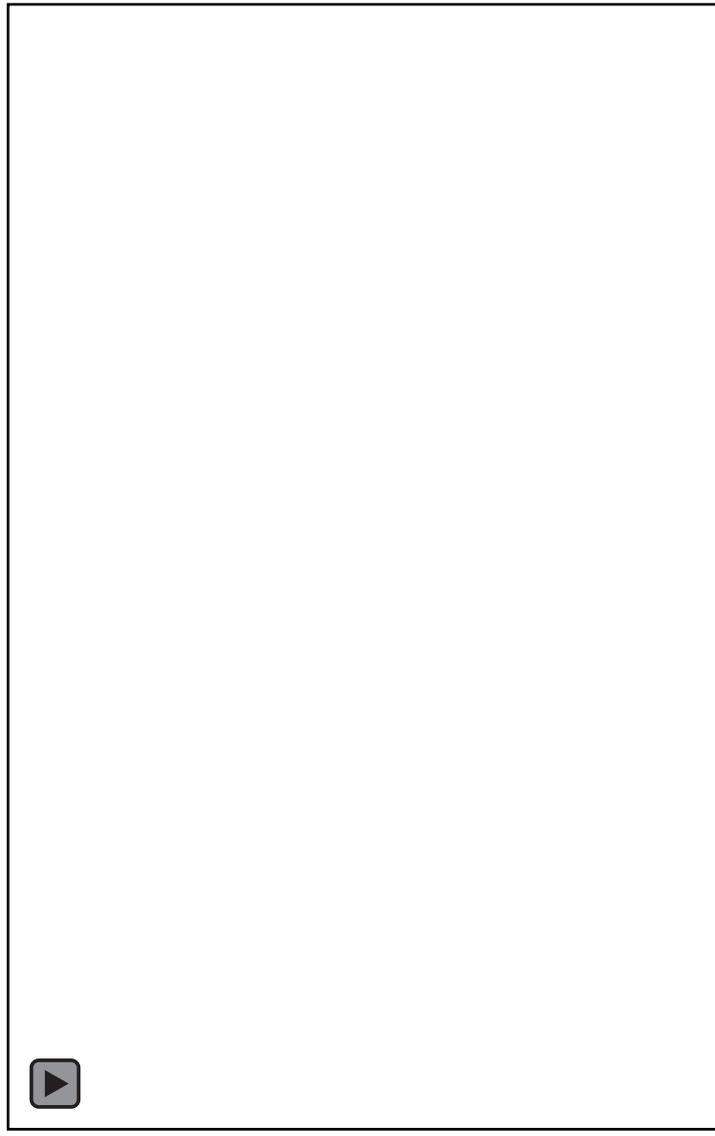
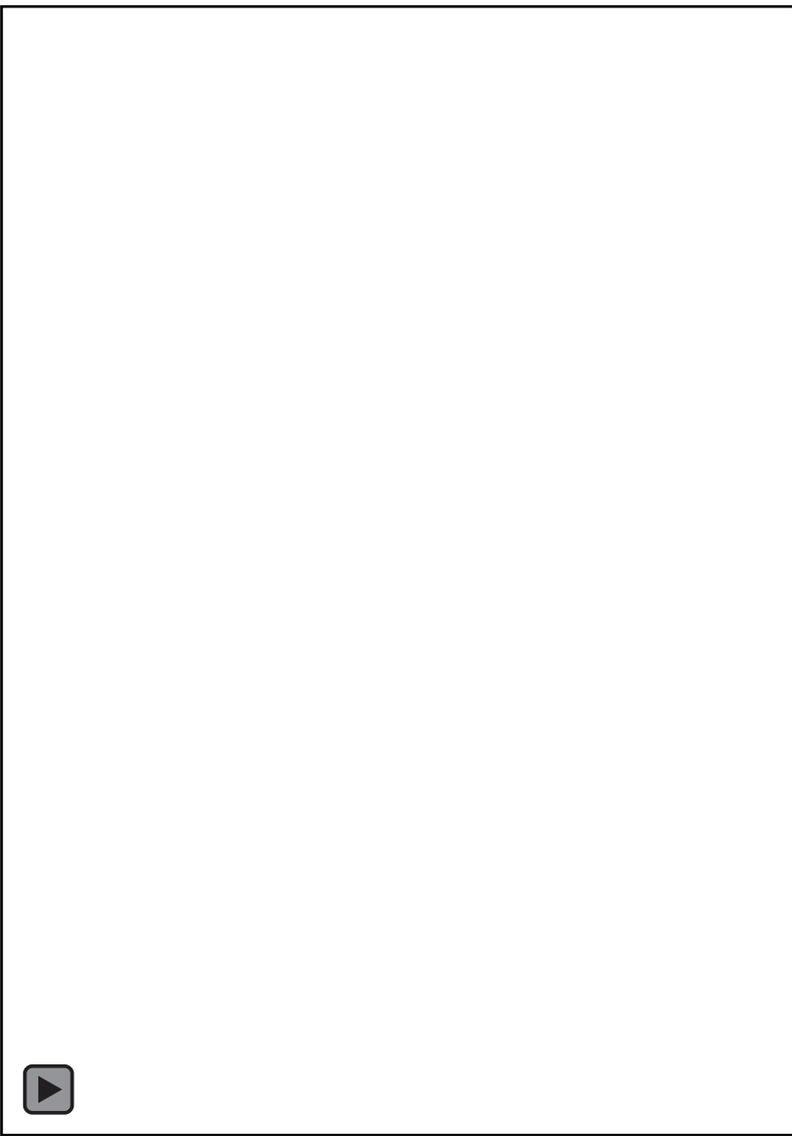
Решетка с отверстиями 1 мм



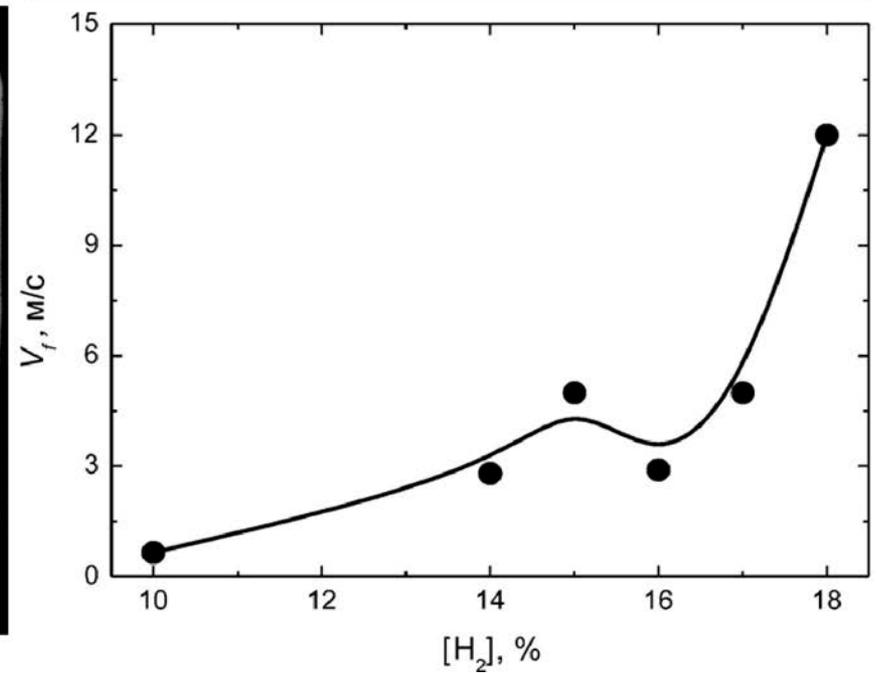
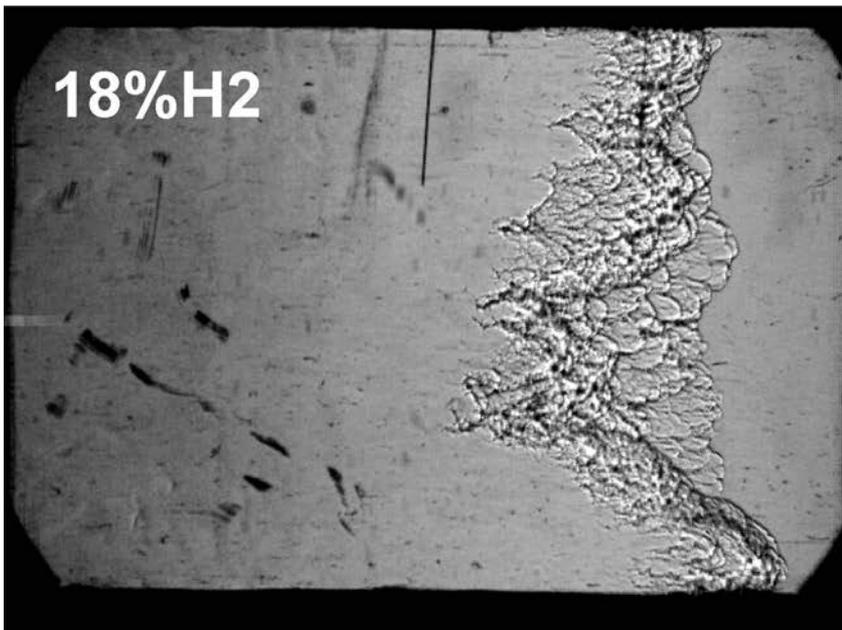
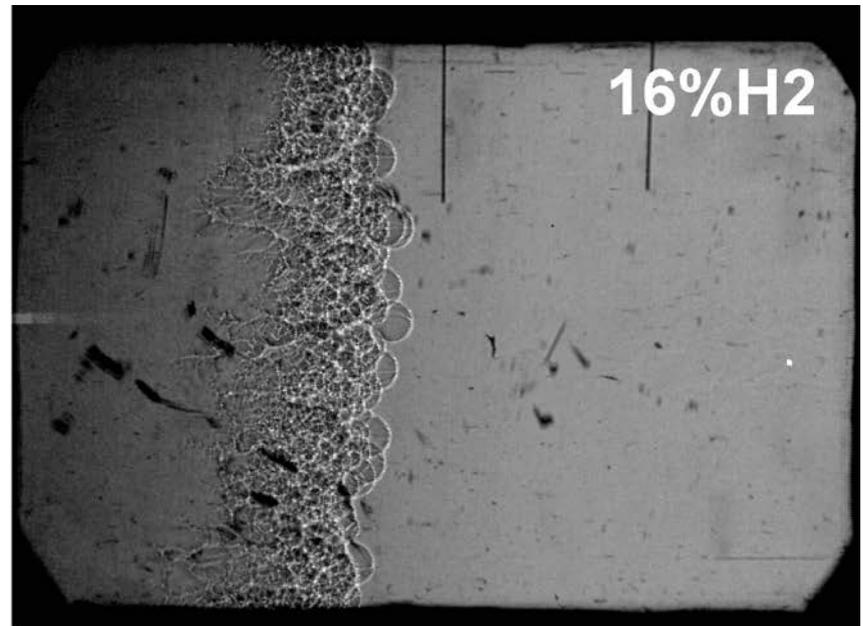
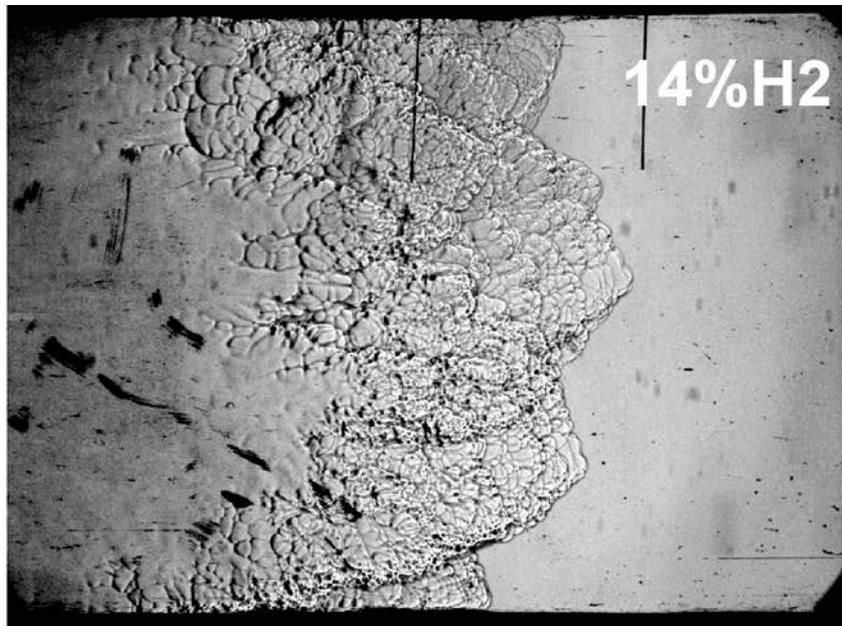
Решетка с отверстиями 2 мм



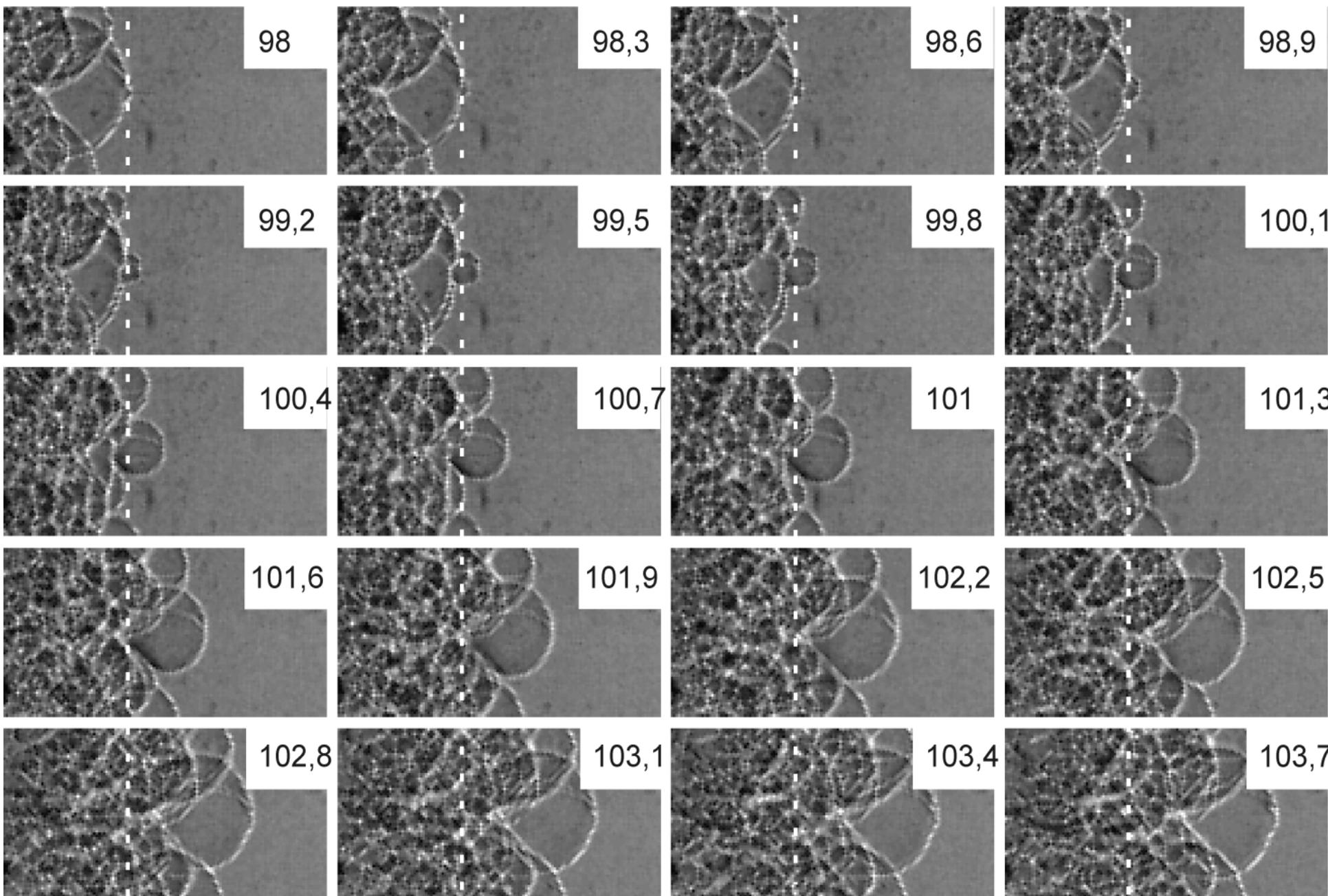
Акустическая неустойчивость пламени в закрытом канале, 16 об. % Н₂



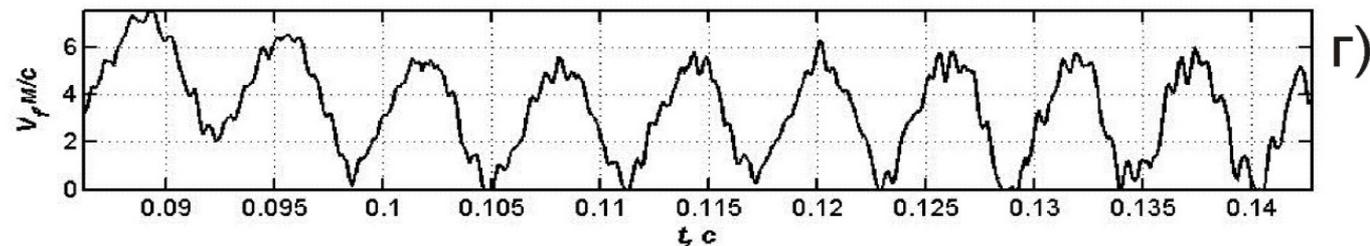
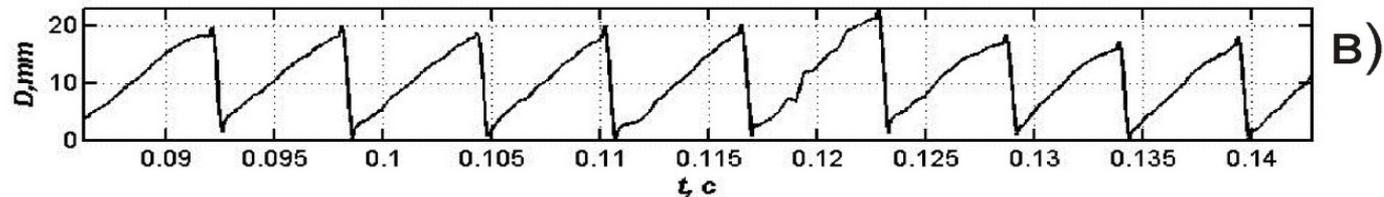
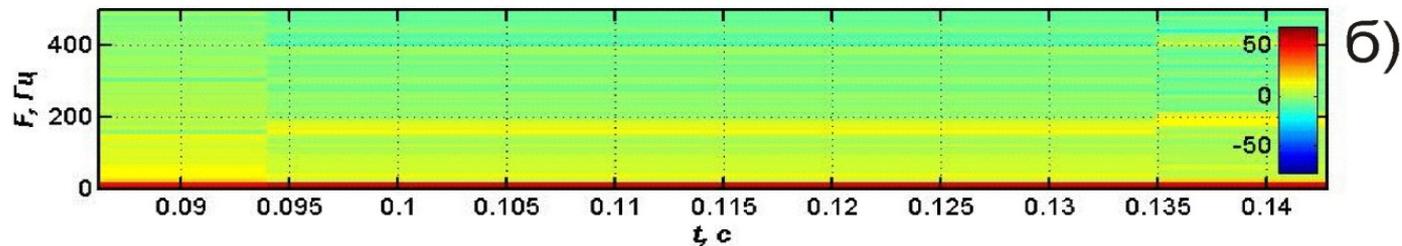
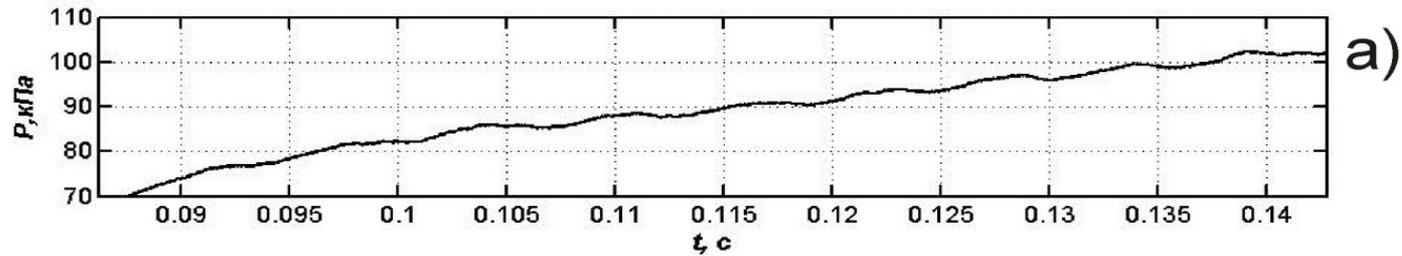
Пламена в смесях водорода с воздухом



Пламя 16% H₂ в воздухе на моменты времени 98-103,7 мс

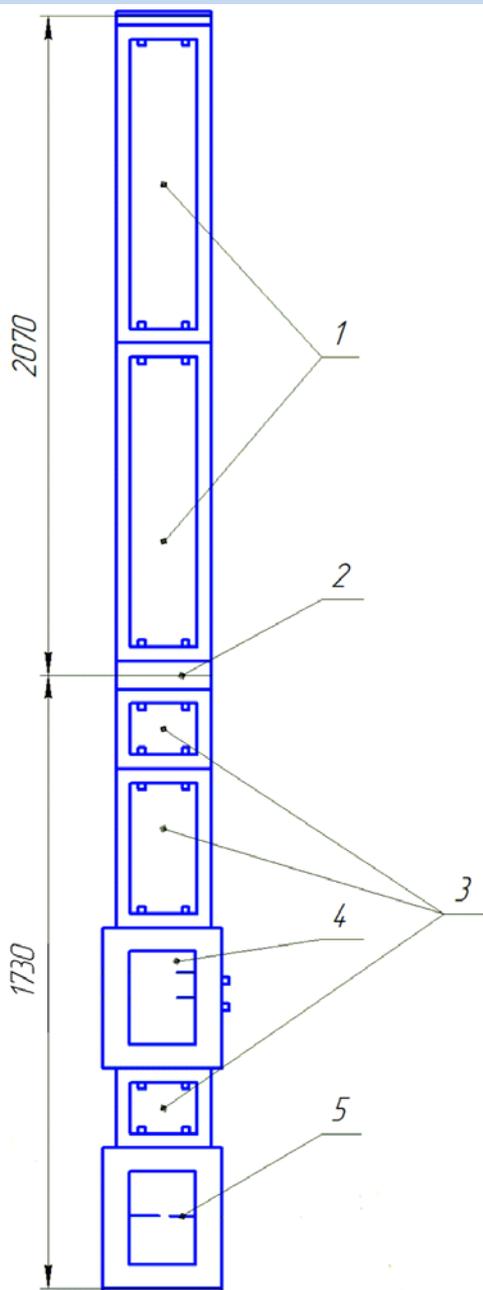


16% водорода в воздухе



- Амплитуда продольного ускорения пламени $\sim 250g$
- Скорость увеличения диаметров очагов пламени $dD/dt \approx 3 \text{ м/с}$

Эксперимент с ударной волной и волной разрежения



1- отсеки драйвера высокого давления/разрежения

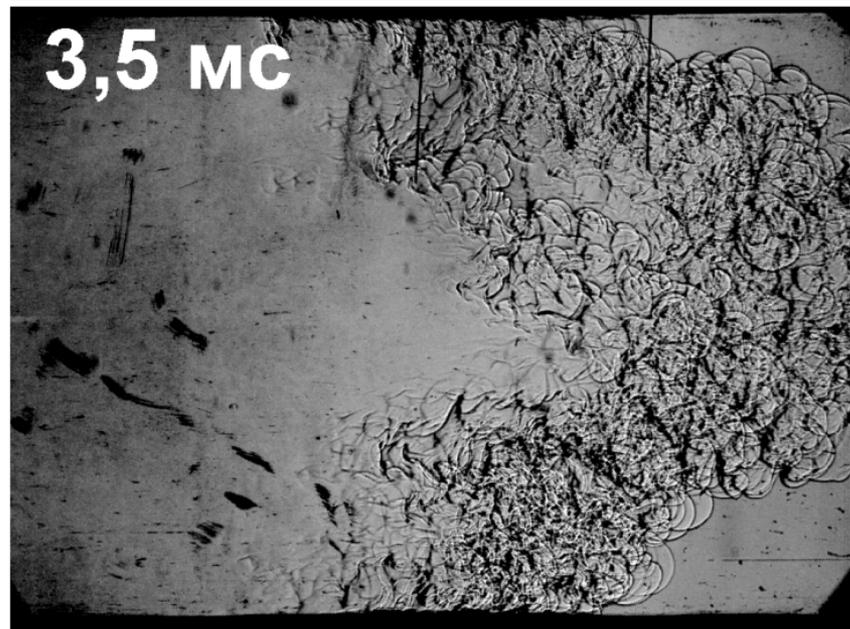
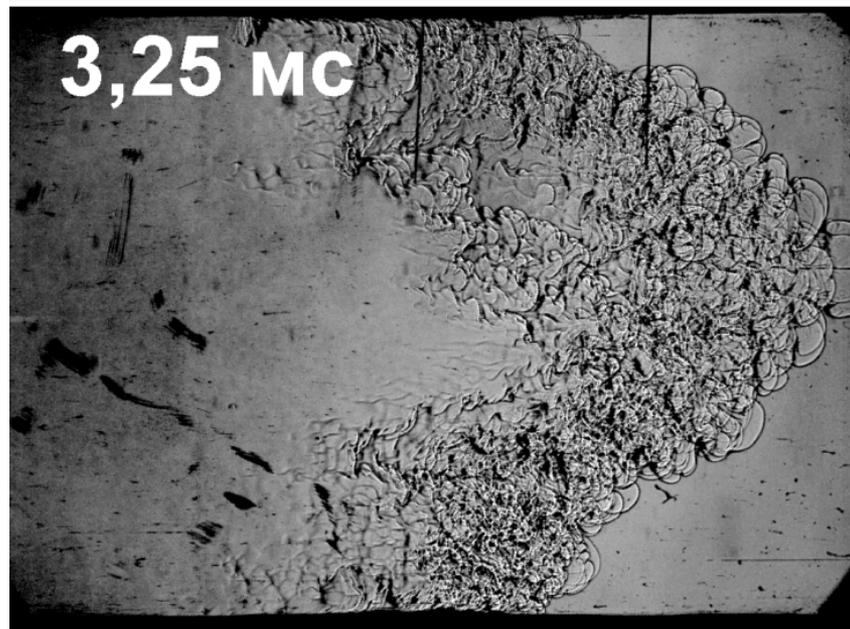
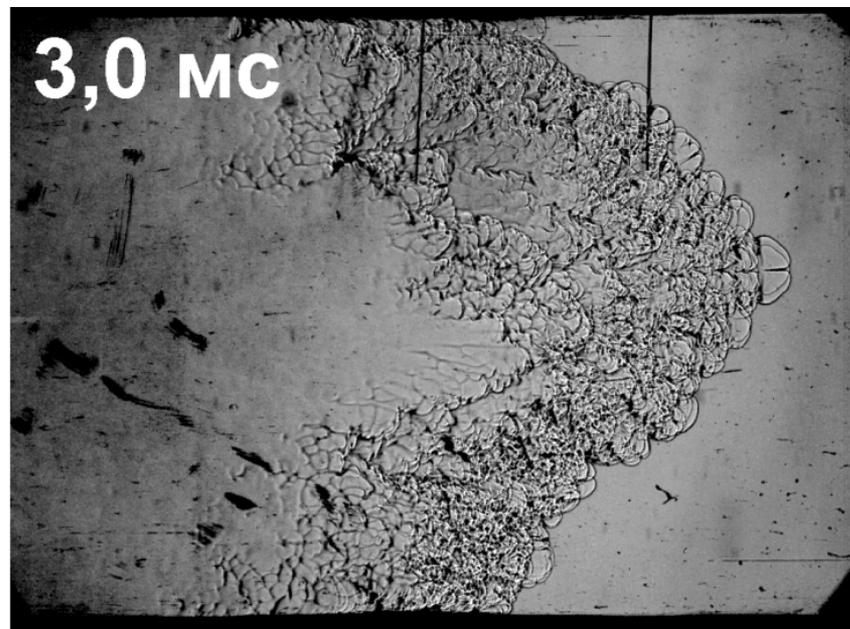
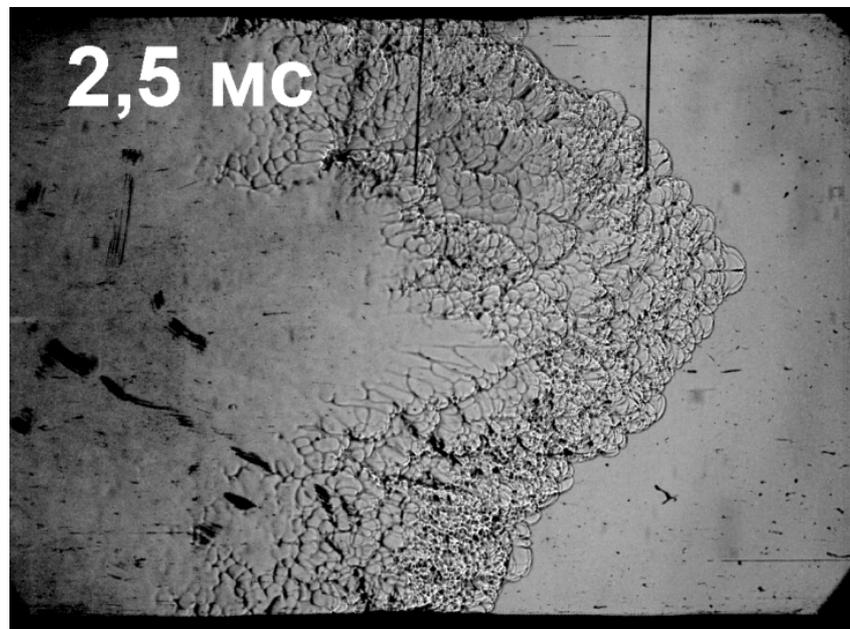
2- вакуумная мембрана

3- отсеки, заполненные смесью водорода с воздухом

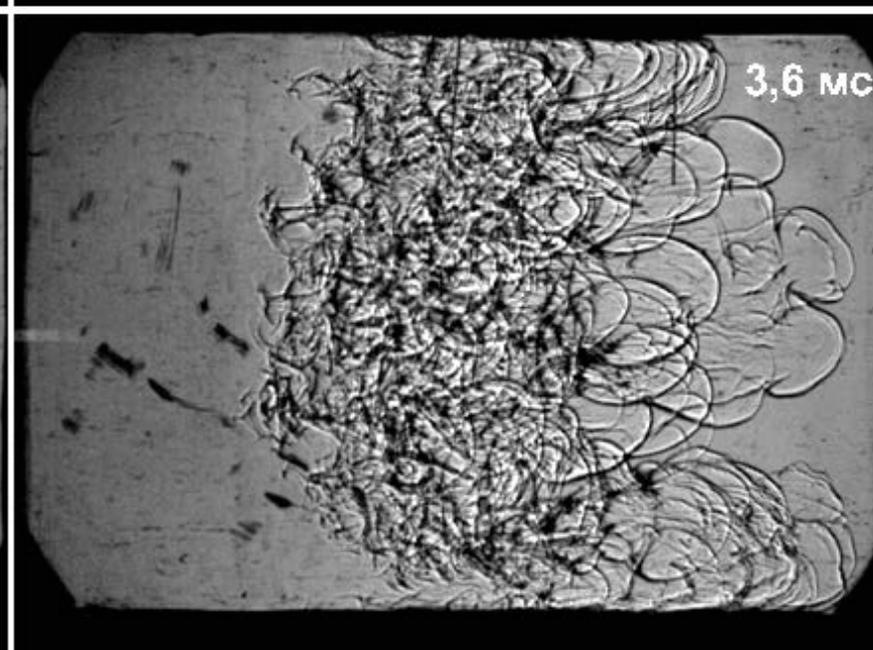
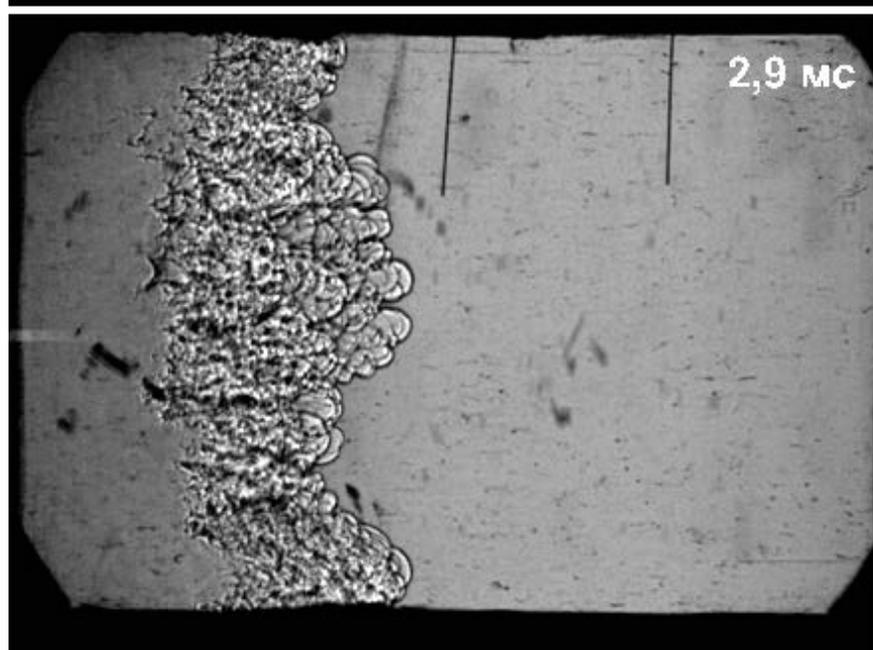
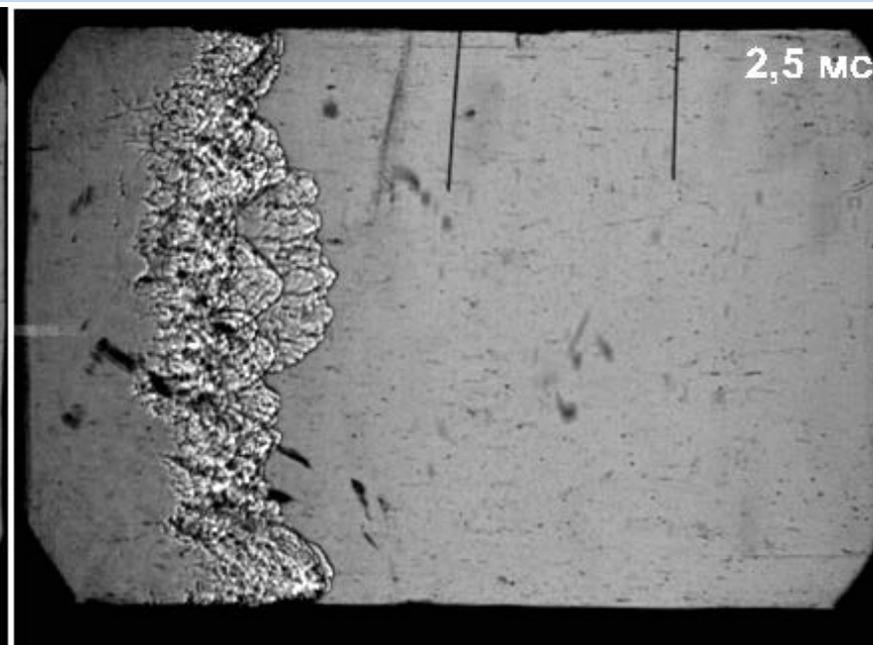
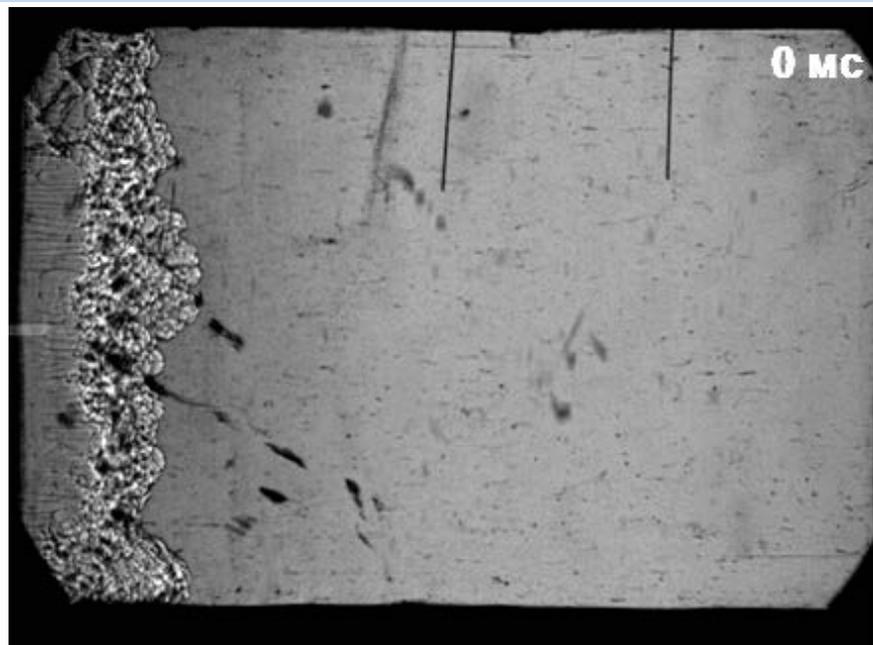
4- измерительный отсек

5- искровой промежуток

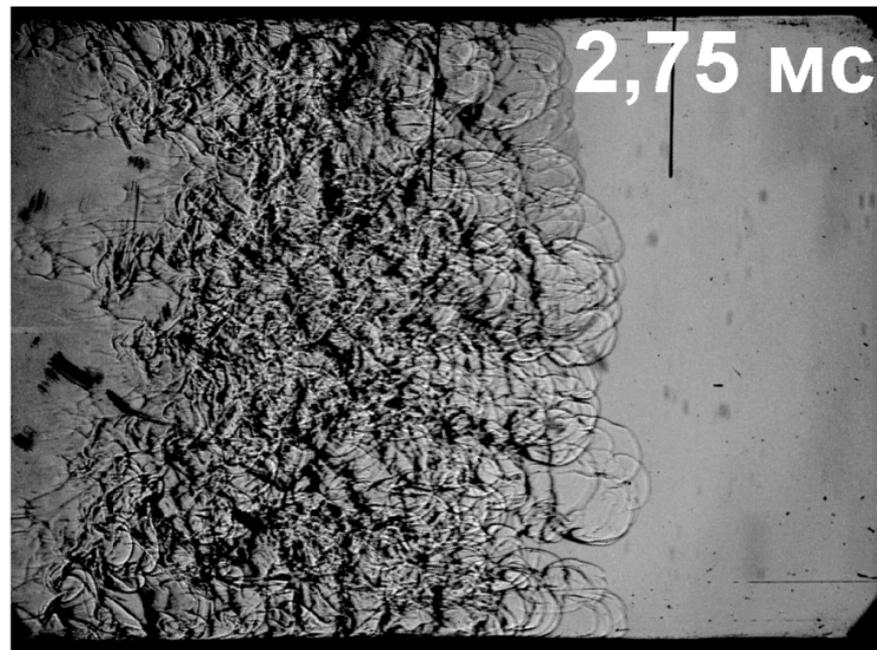
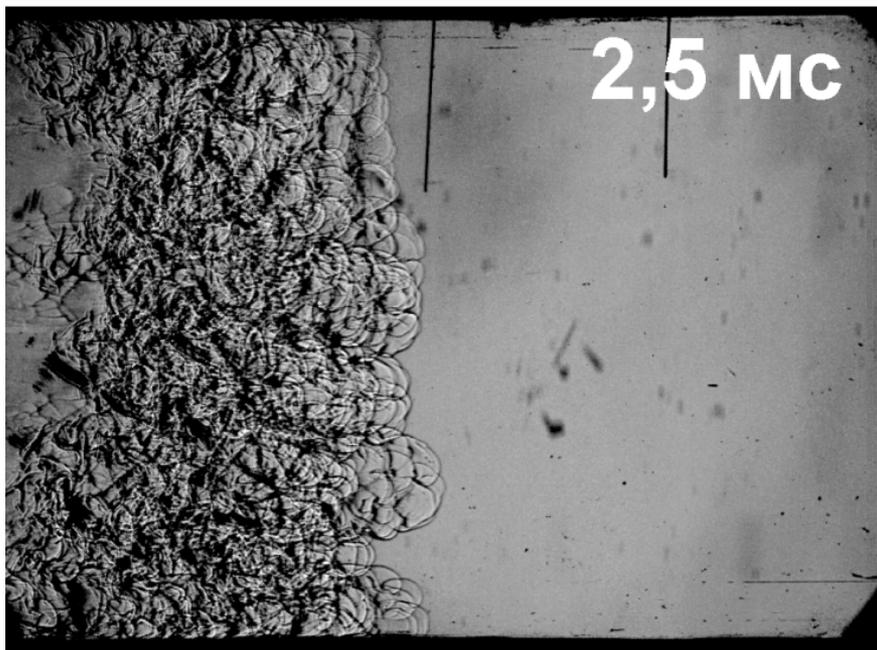
14 % водорода в воздухе, с волной разрежения



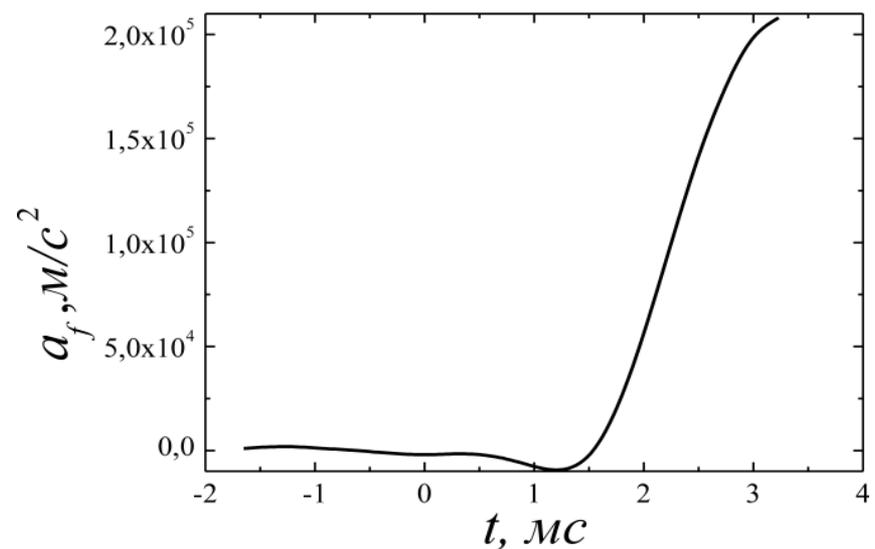
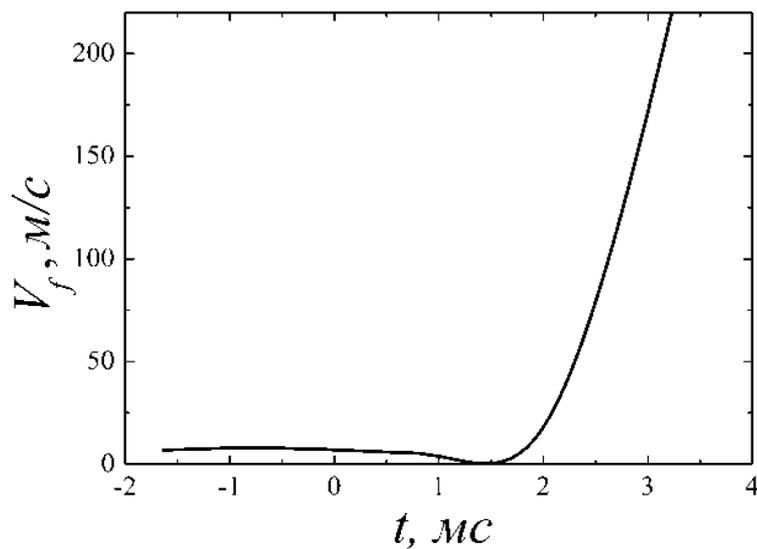
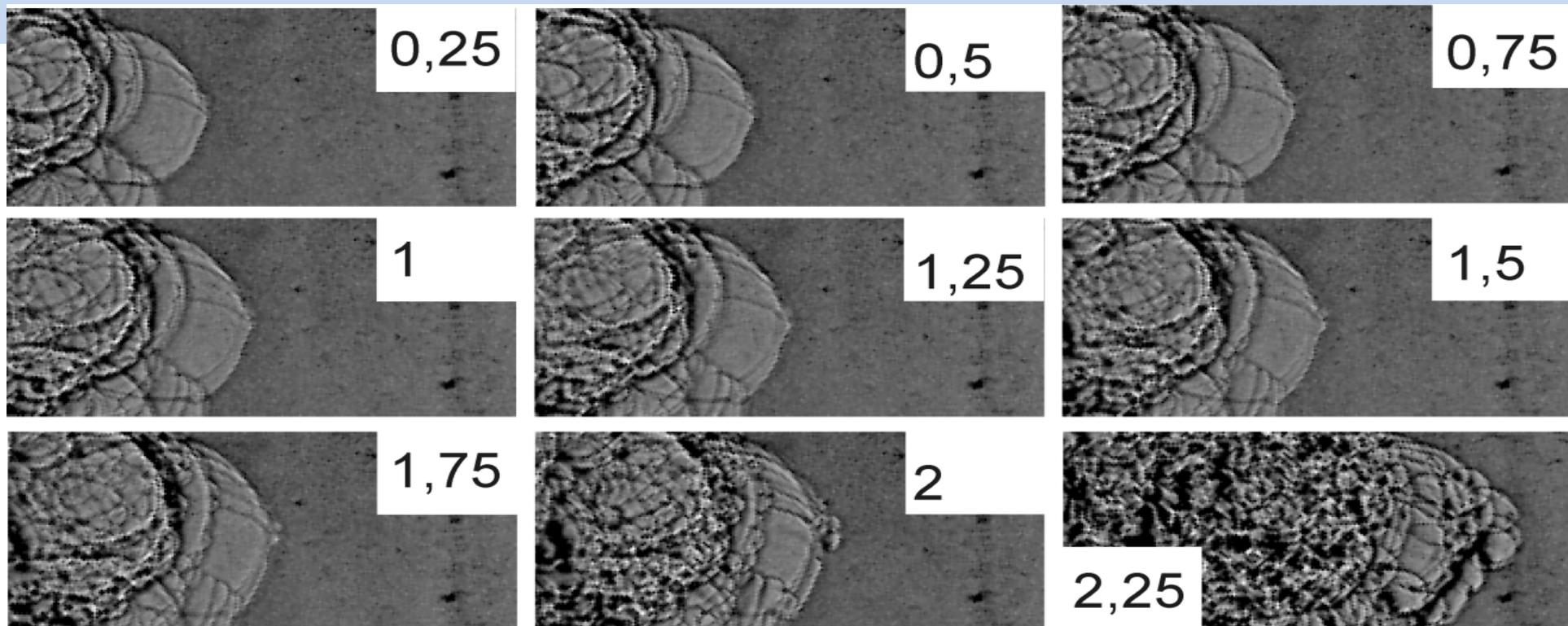
18 % водорода в воздухе, с волной разрежения



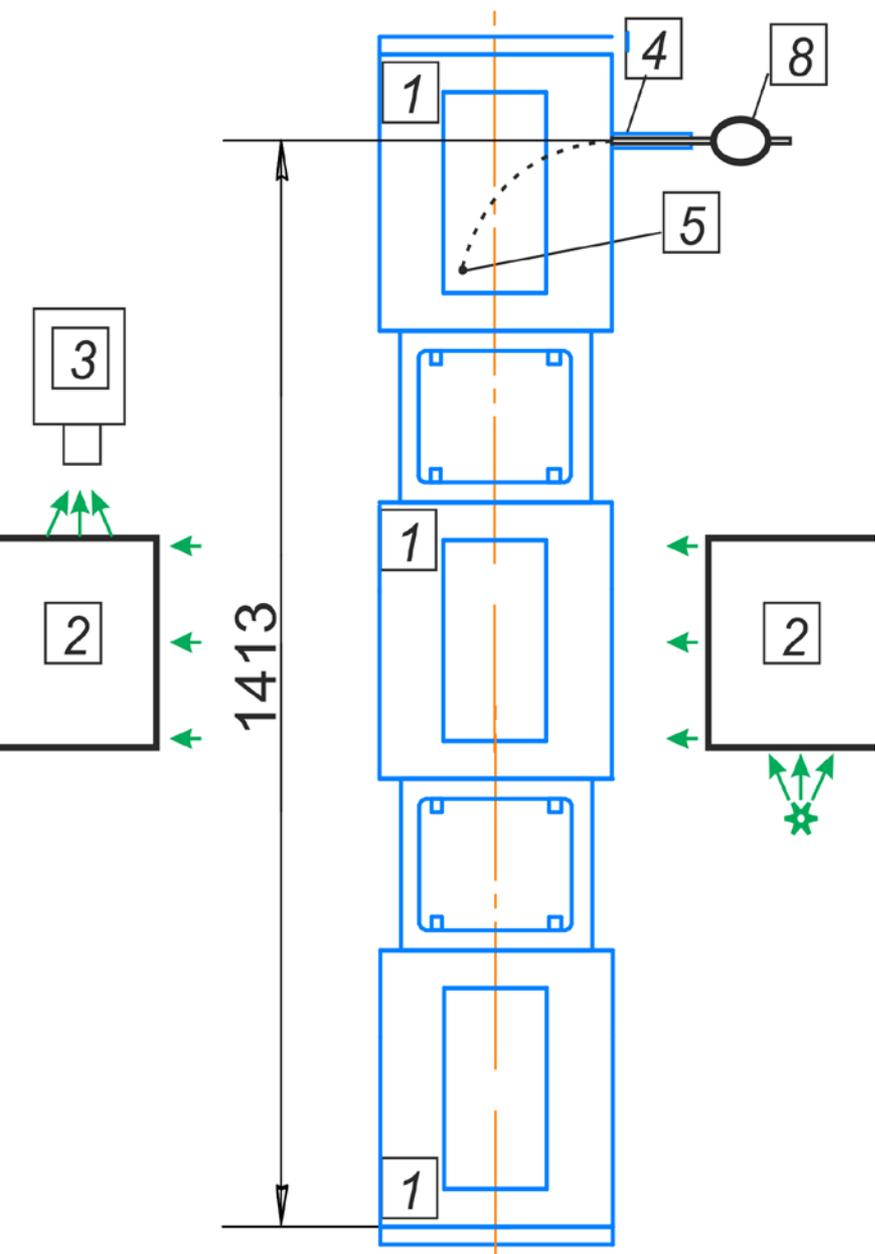
16 % водорода в воздухе, с волной разрежения



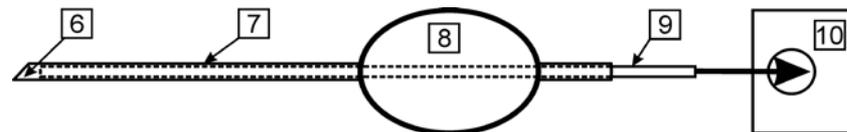
16% водорода в воздухе, с волной разрежения



Воспламенение каталитическими частицами



устройство инжектора

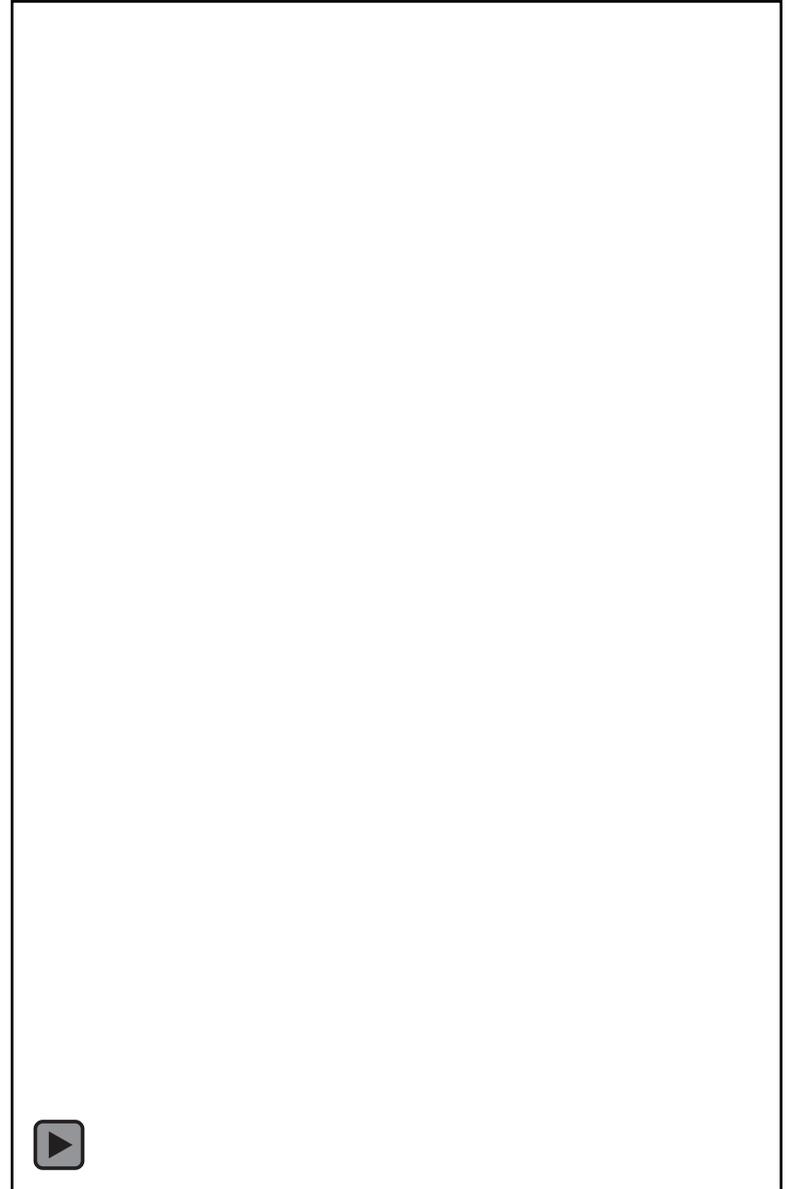
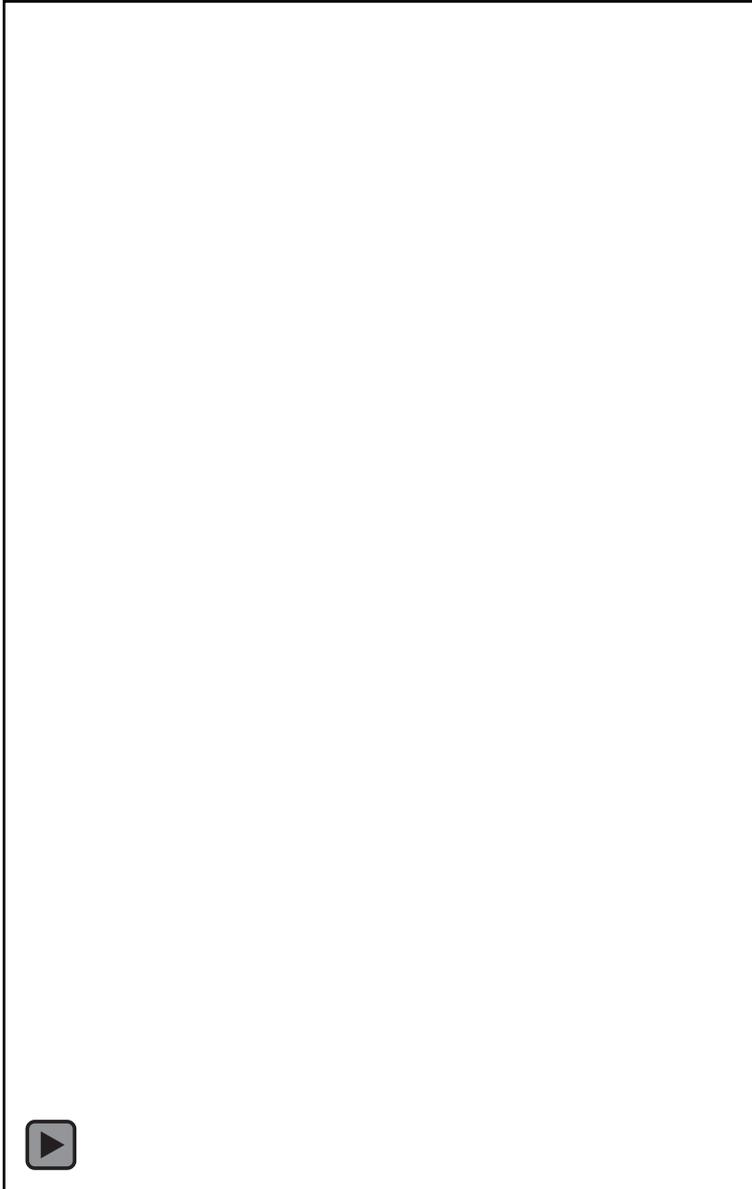


- 1 – секции трубы с оптическими окнами,
- 2 – части теневого прибора ИАБ-451,
- 3 – видеокамера,
- 4 – устройство инъекции частиц,
- 5 – инжектированная частица,
- 6 – местоположение частицы перед опытом,
- 7 – корпус инжектора,
- 8 – резиновая груша,
- 9 – термопара, 10 – измеритель температуры

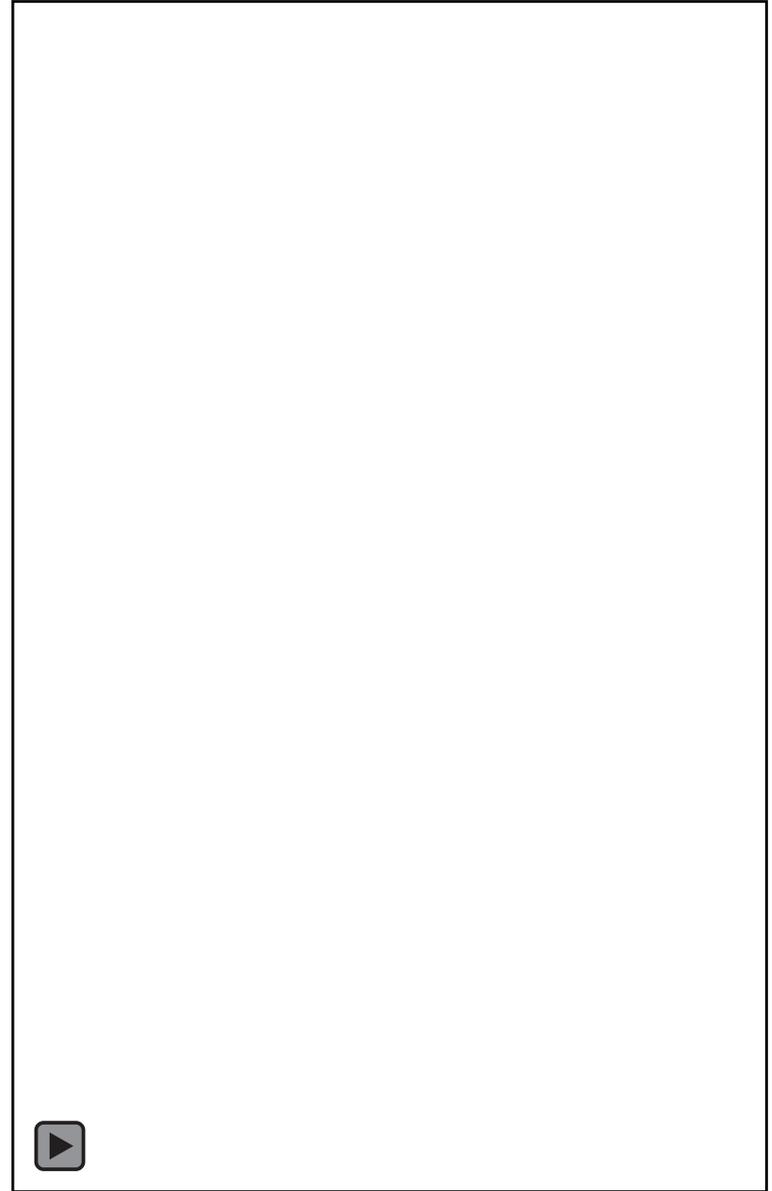
Каталитическая частица ~ 0,5 мм



Воспламенение каталитическими частицами



Воспламенение каталитическими частицами





Стенд МУТ-ТК — камера диаметром, состоящая из двух прозрачных цилиндрических окон из кварцевого стекла с изменяемым зазором, предназначенная для шпирен-визуализации течения (пламени) с помощью теневого прибора ИАБ-451, а также для применения электронно-оптического преобразователя для визуализации фронта пламени в ультрафиолетовом спектре (излучение перехода $OH(A \rightarrow X)$ $\lambda \sim 306-320$ нм).

Горение в щелевом зазоре, 8 об.% Н₂, p_{ini} = 200 кПа

h = 2,6 мм

h = 4,6 мм



Горение в щелевом зазоре, 10 об.% Н₂, $p_{ini} = 100$ кПа



$h = 2,6$ мм

$h = 4,6$ мм



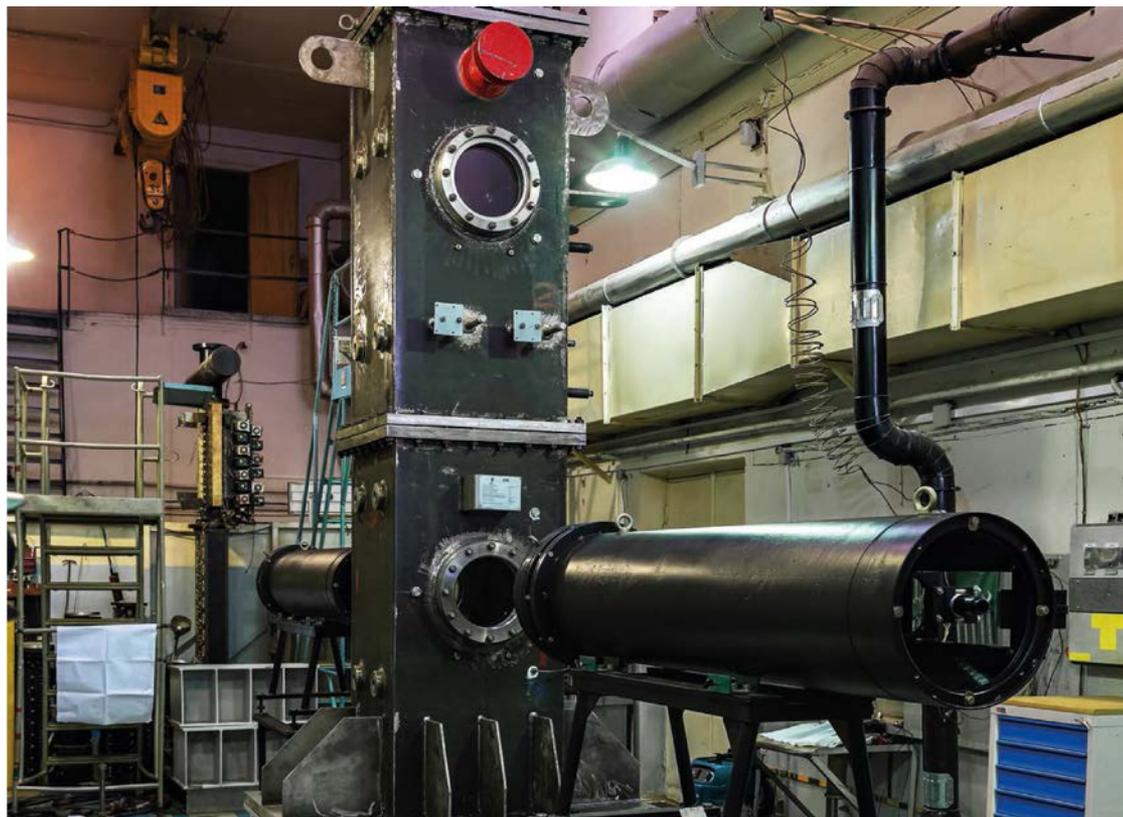
Горение в щелевом зазоре, 16 об.% H₂, $p_{ini} = 100$ кПа, $h = 2,6$ мм



МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УДАРНАЯ ТРУБА ПРОЧНАЯ КАМЕРА



16



В установке МУТ-ПК исследуются процессы горения водородосодержащих смесей с учетом масштабных эффектов с детальной визуализацией фронтов горения. Установка представляет собой трубу квадратного сечения 600 x 600мм длиной 3 м.

Проведены реперные эксперименты по исследованию горения обедненных водородно-воздушных смесей. Отработана система визуализации пламени в ультрафиолетовом спектре с помощью электронно-оптического преобразователя и скоростной видеокамеры.

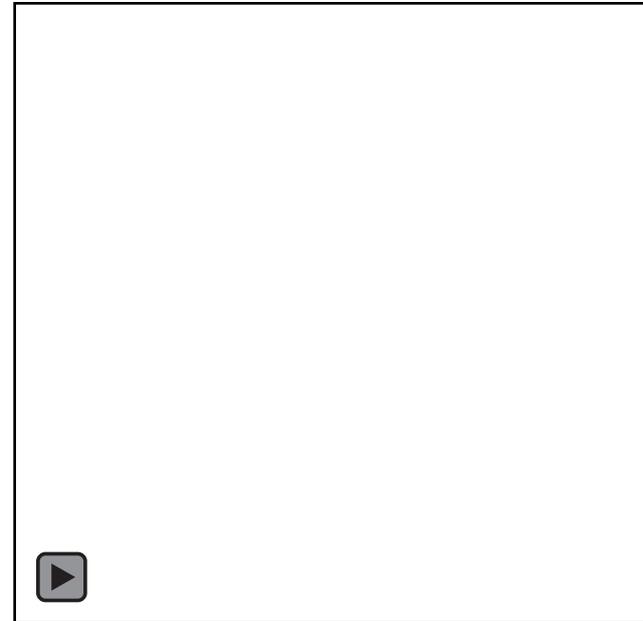
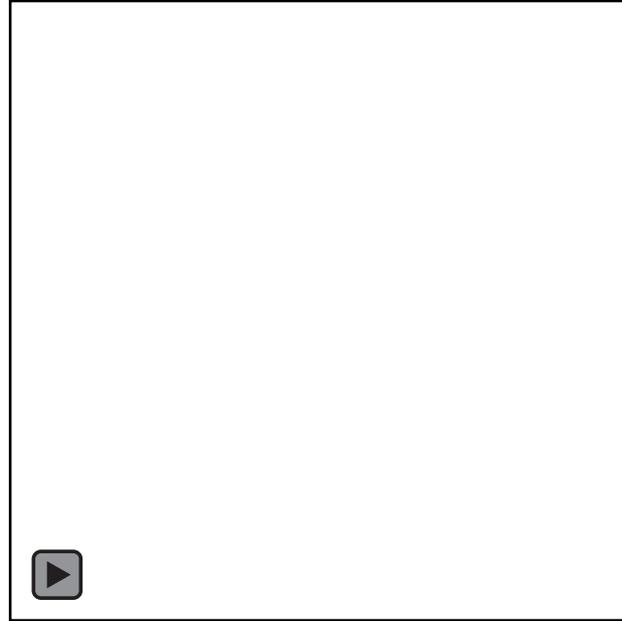
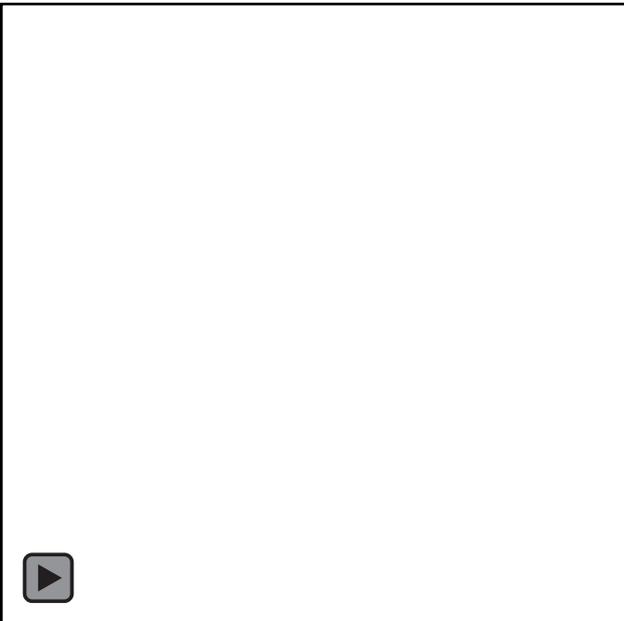
Горение водородо-воздушных смесей в установке МУТ-ПК



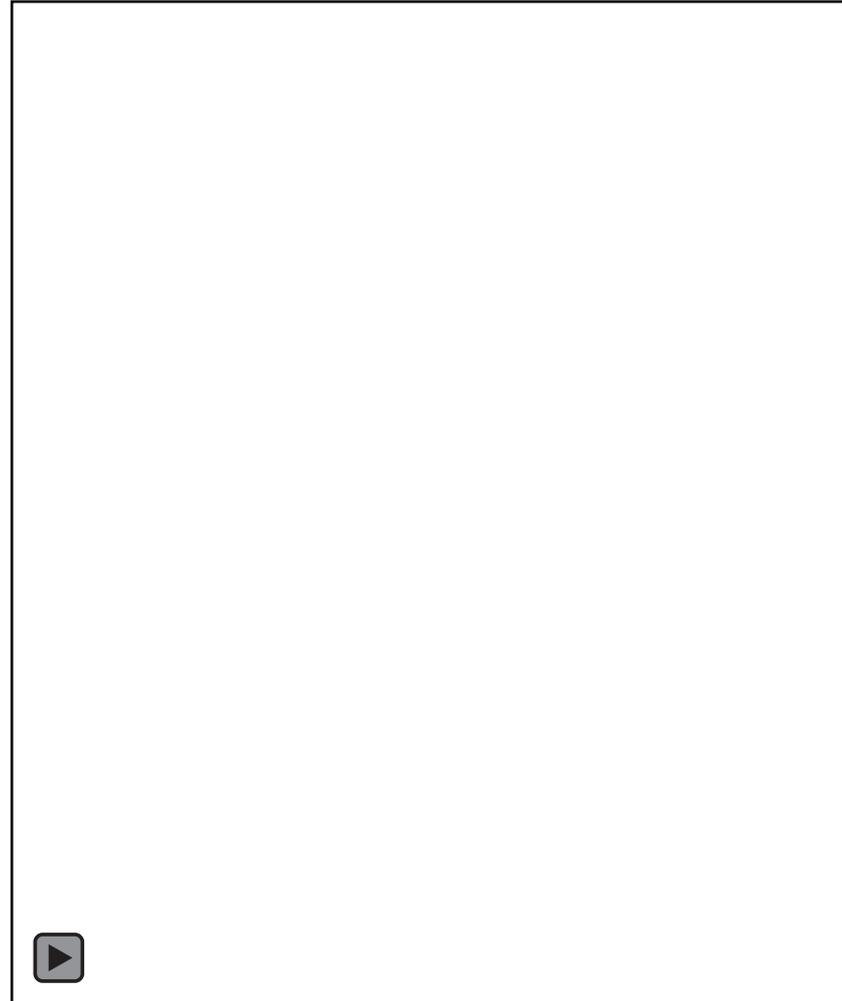
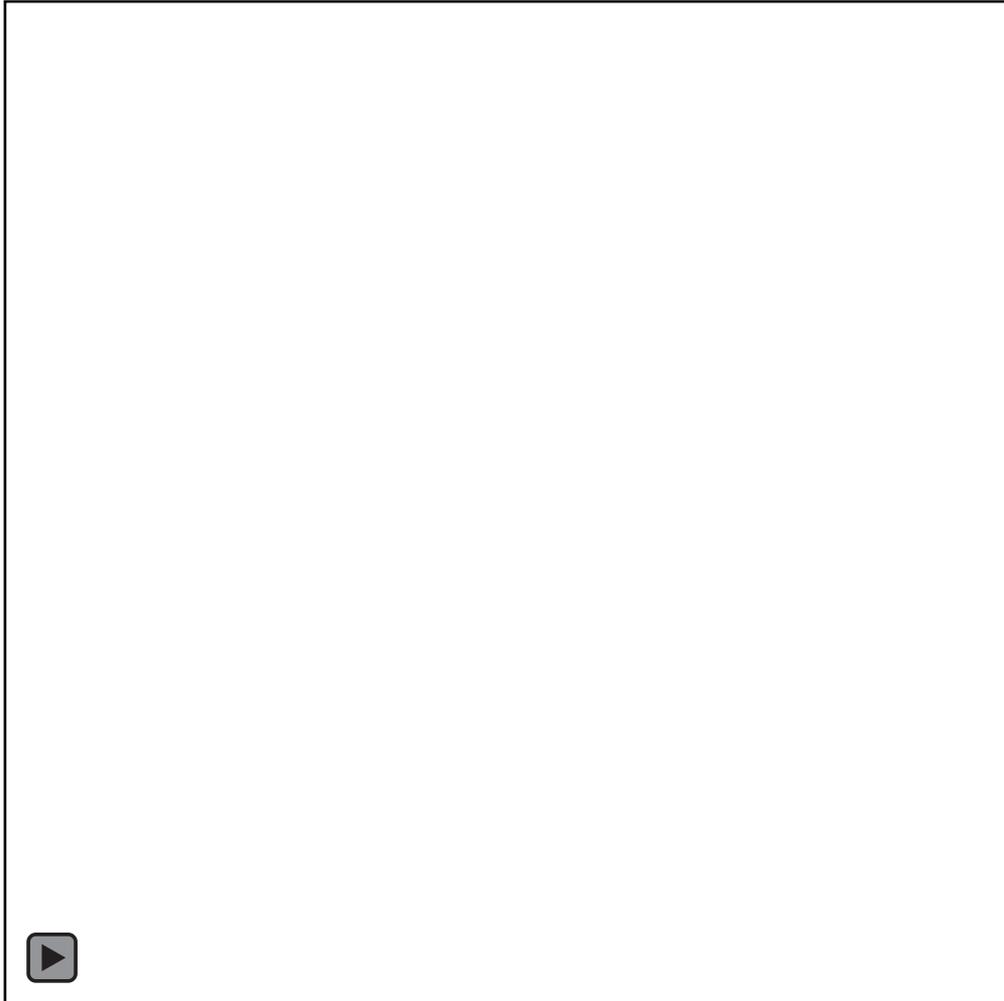
$C_{H_2} = 6 \text{ об.}\%$

$C_{H_2} = 8 \text{ об.}\%$

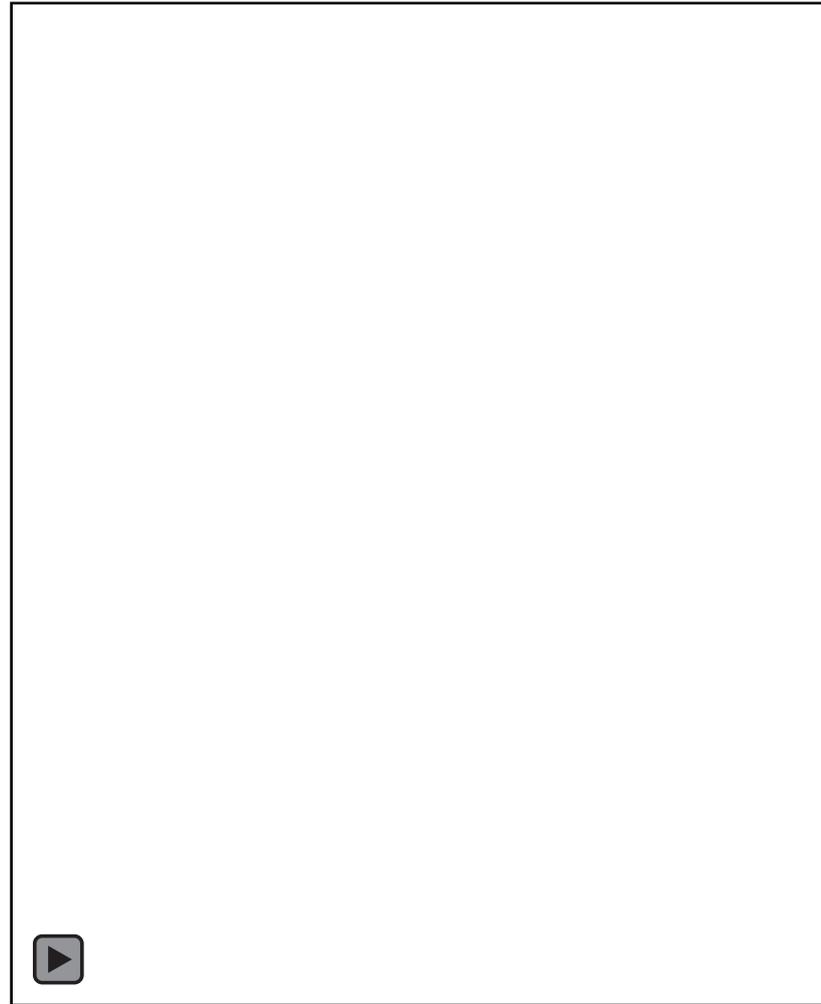
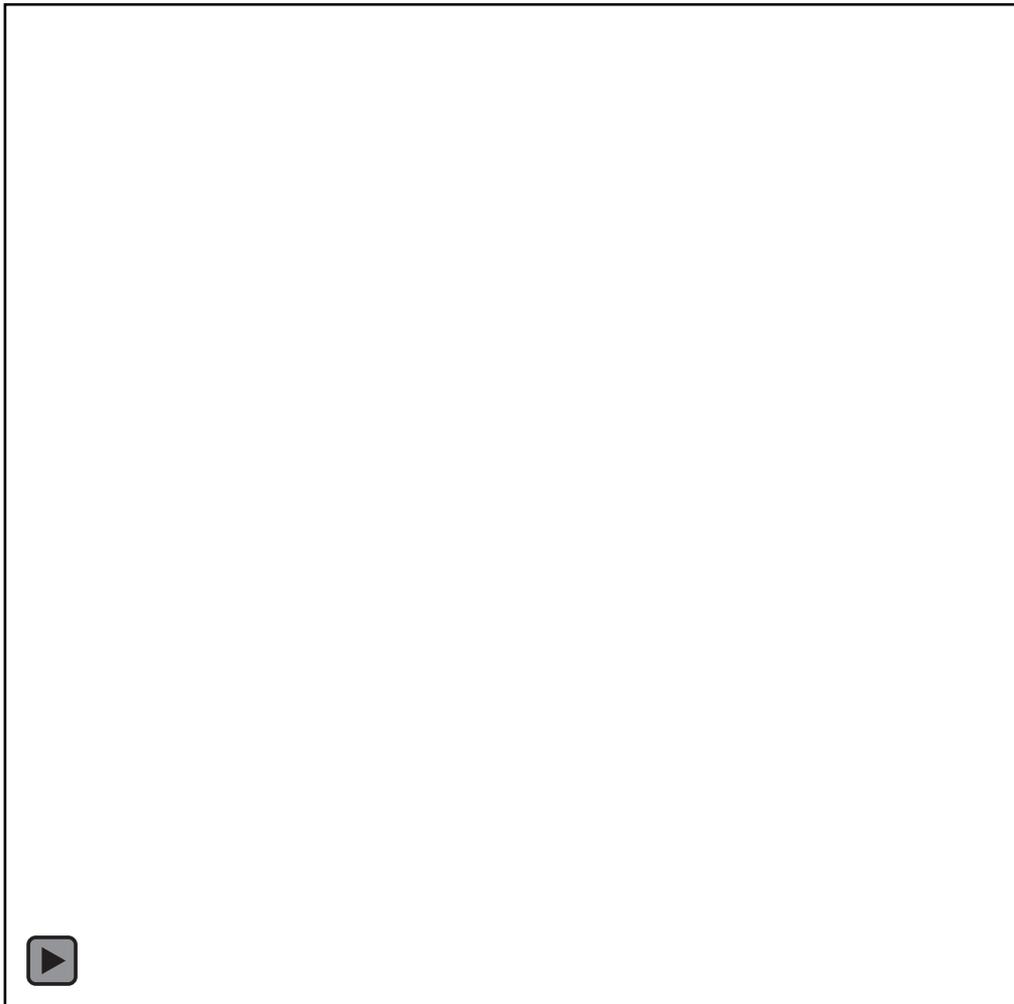
$C_{H_2} = 8 \text{ об.}\%$



Горение водородо-воздушной смеси с 8 об.% H₂ в установке МУТ-ПК



Горение водородо-воздушной смеси с 10 об.% H₂ в установке МУТ-ПК



Горение водородо-воздушной смеси с 12 об.% H₂ в установке МУТ-ПК



Исследование масштабных эффектов эволюции водородо-воздушных пламен в семействе установок МУТ в широком диапазоне концентраций H_2 .

Визуализация в установках МУТ и МУТ-ПК одновременно в разных по высоте окнах позволит исследовать пламена на больших масштабах.

Предполагается вместе с теневой визуализацией визуализировать пламя в УФ-диапазоне.

1. *Effect of Hydrodynamic Instabilities on the Development of Hydrogen-Air Flames*

N.B. Anikin, V. A. Simonenko, A. V. Pavlenko, A. A. Tiaktev, I. L. Bugaenko, and Yu. A. Piskunov,

2019 A. Sasoh et al. (eds.), 31st International Symposium on Shock Waves 1, doi10.1007/978-3-319-91020-8_29

2. *Неустойчивость Рихтмайера – Мешкова ламинарного пламени* *А.А. Тяктев, А.В. Павленко, Н.Б. Аникин, И.Л. Бугаенко, Ю.А. Пискунов*

Прикладная механика и техническая физика, 2020, Т.61, №2

3. *Воспламенение смесей с объёмной долей водорода в воздухе от 4,8 до 12% частицами керамики, покрытыми платиной*

Н.Б. Аникин, М.Е. Игнатюк, Ю.А. Пискунов, А.А. Тяктев

Атомная энергия 2022 Т.133 № 2 С. 112

Спасибо за внимание!