

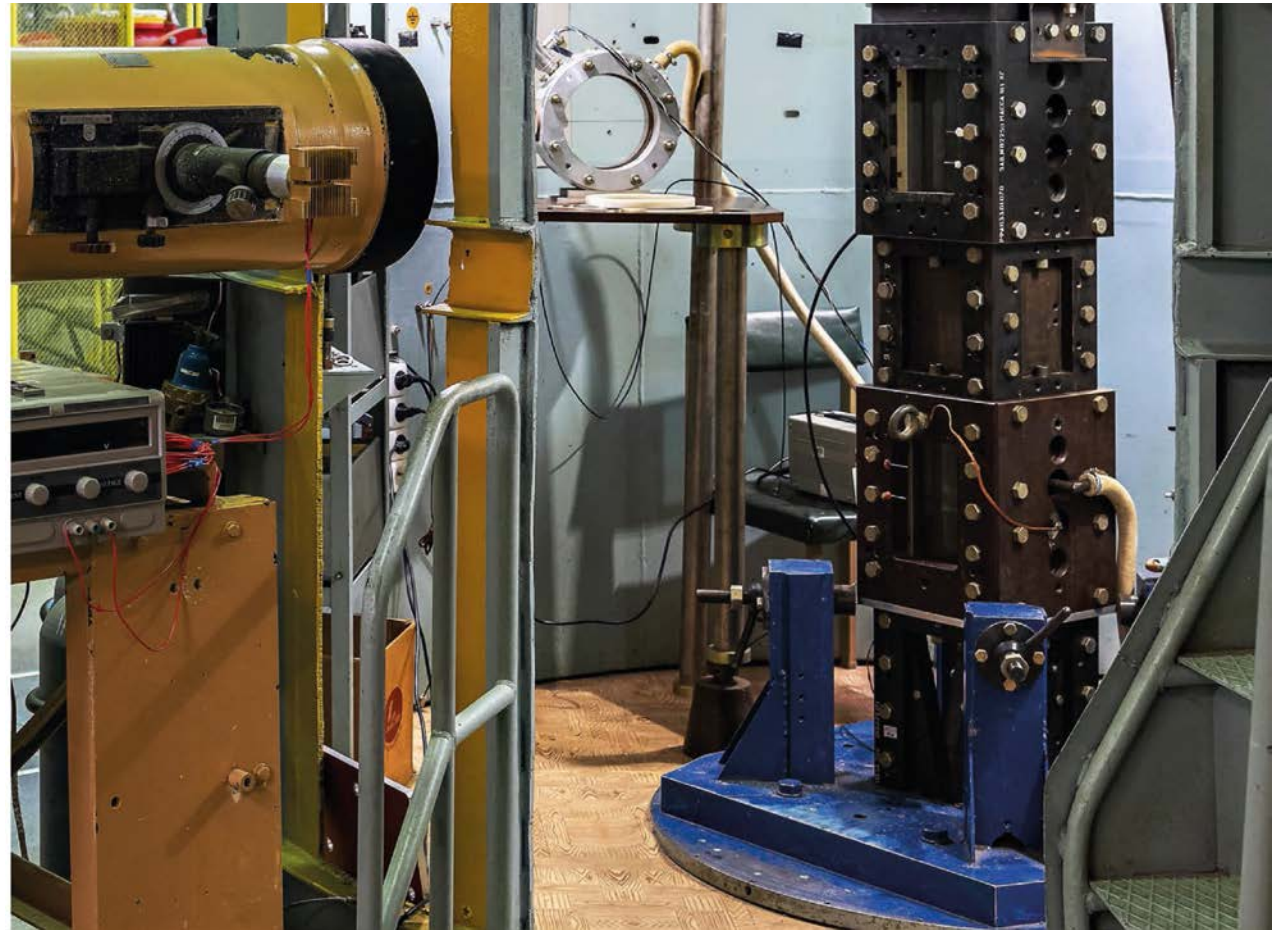
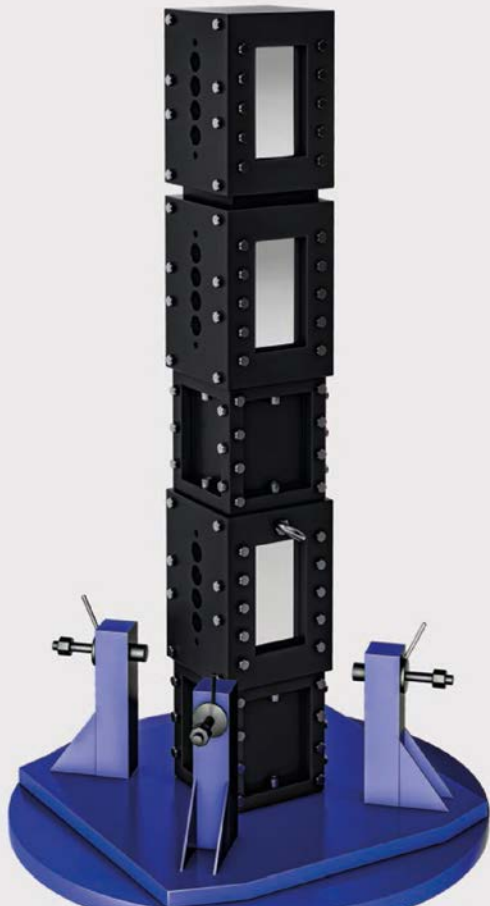
Экспериментальные исследования водородо-воздушных пламен на установках семейства МУТ

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

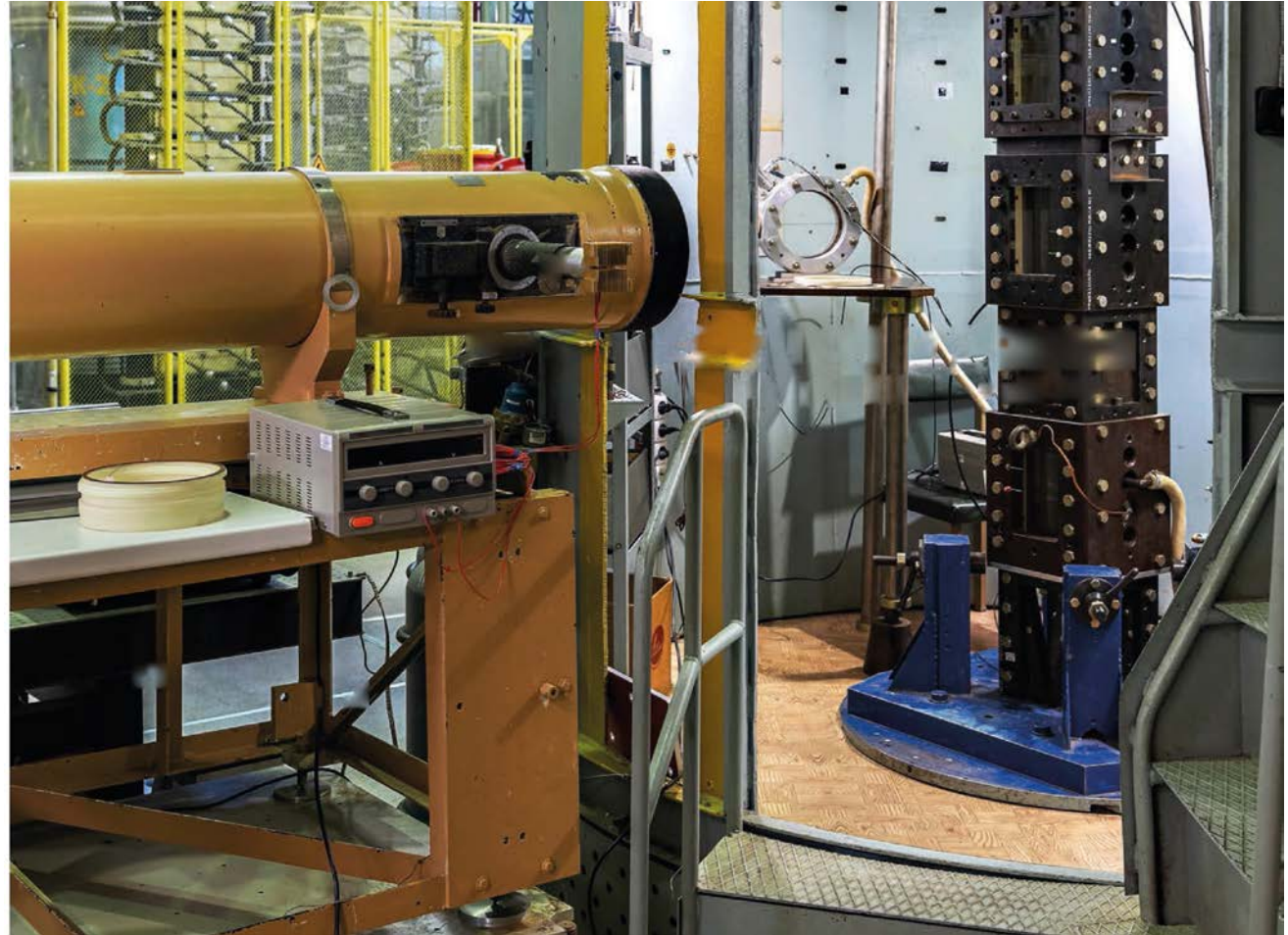
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

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.

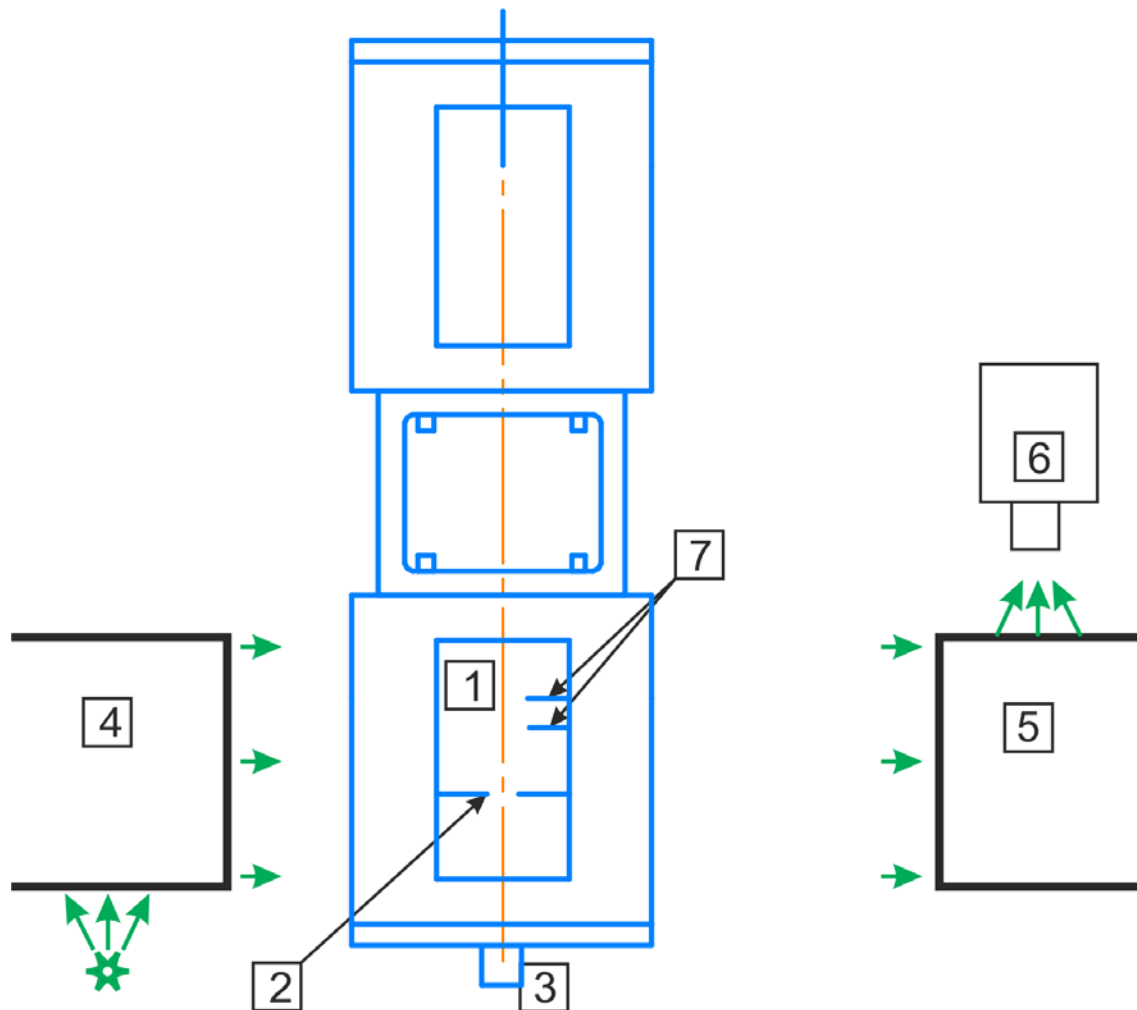


МУТ — это вертикально ориентированная труба квадратного сечения 138 x 138 мм с регулируемой высотой от 0,4 м до 10 м. Труба состоит из отсеков с оптическими окнами для шлирен-визуализации течения (пламени) с помощью теневого прибора ИАБ-451.

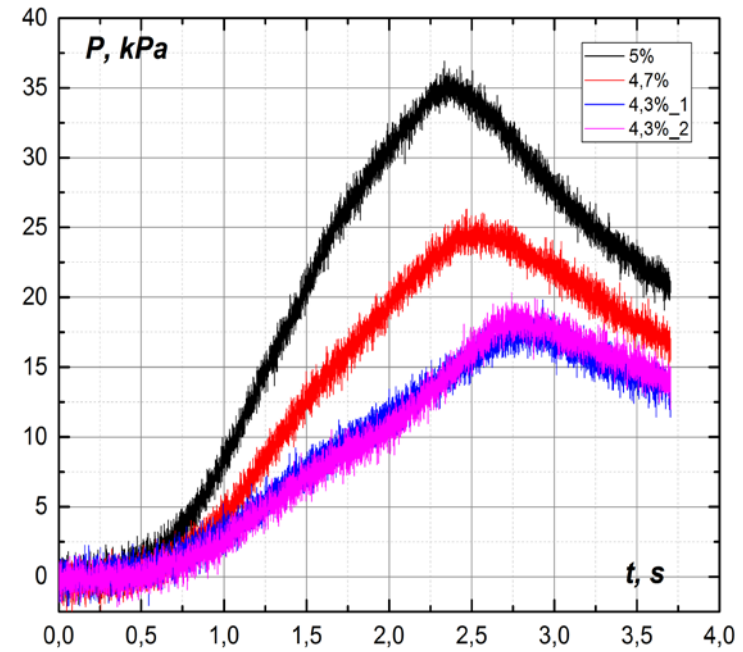


При помощи теневых приборов получают теневые изображения шлирен-методом, который по чувствительности превосходит другие, в том числе интерференционные методы. Шлирен-метод визуализирует градиент плотности в прозрачных средах.

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



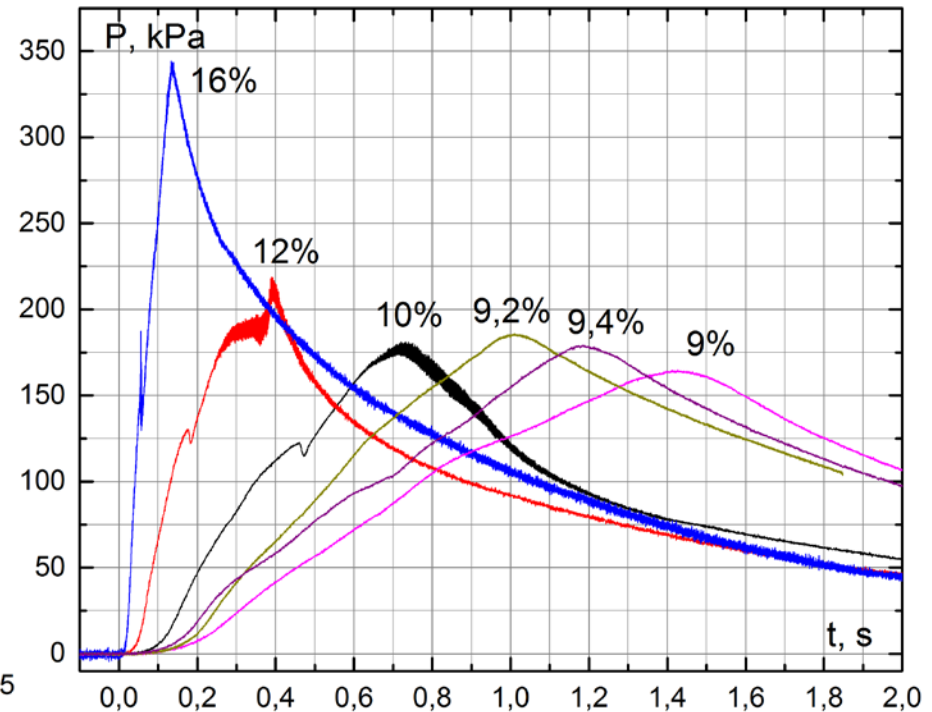
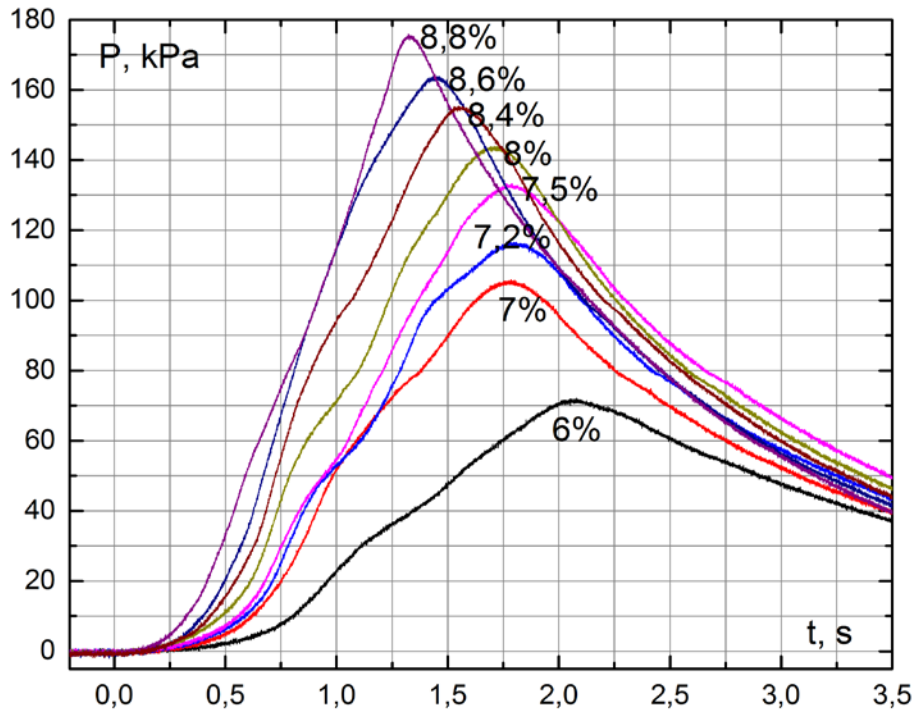
$C_{H_2} = 6 \text{ об.}\%$

$C_{H_2} = 9,4 \text{ об.}\%$

$C_{H_2} = 12 \text{ об.}\%$



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



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

6 об. %

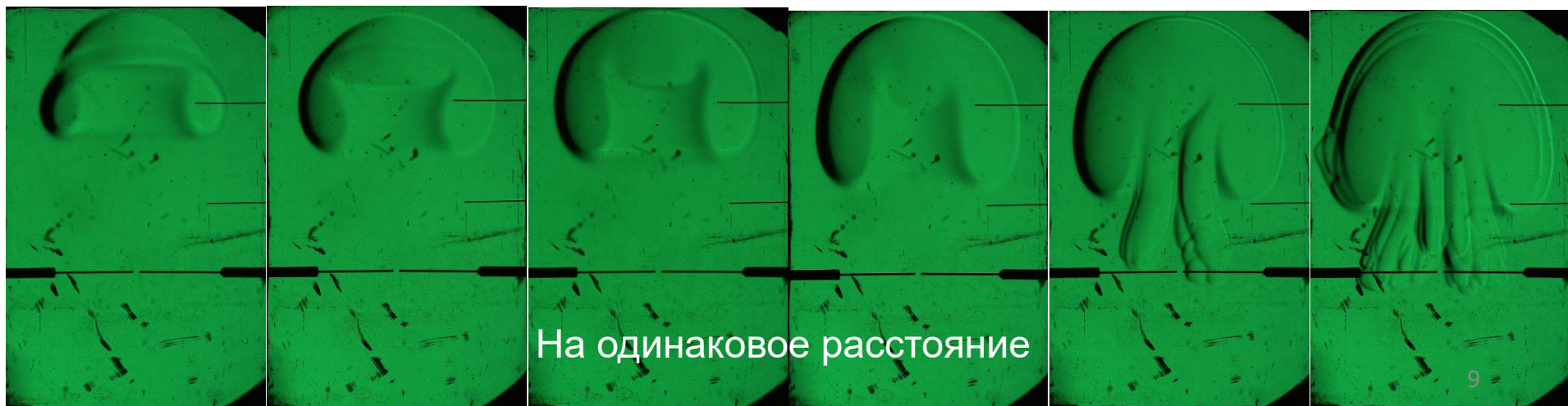
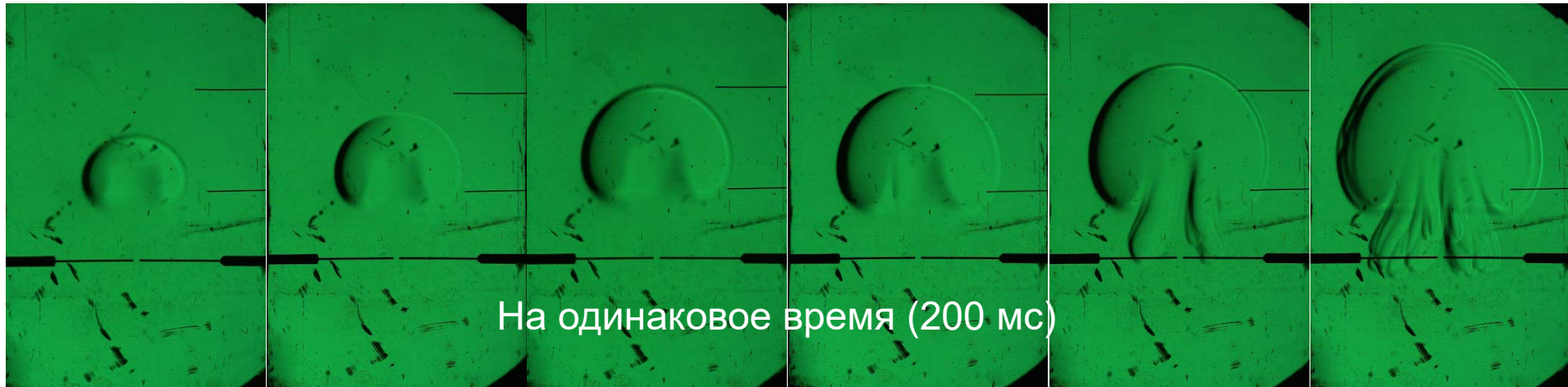
7 об. %

7.5 об. %

8 об. %

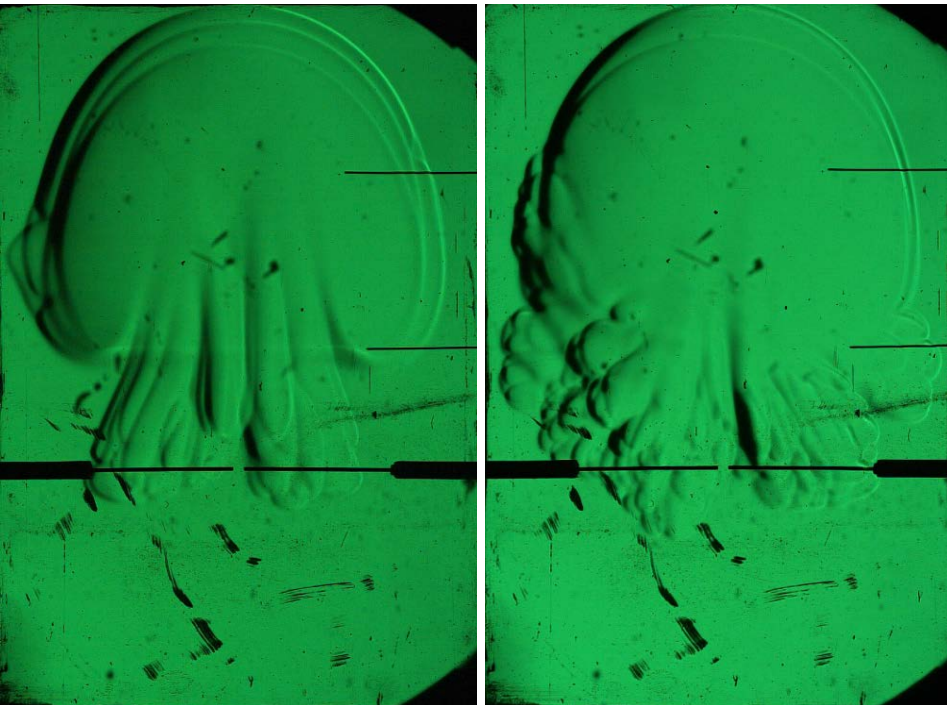
8.6 об. %

8.8 об. %

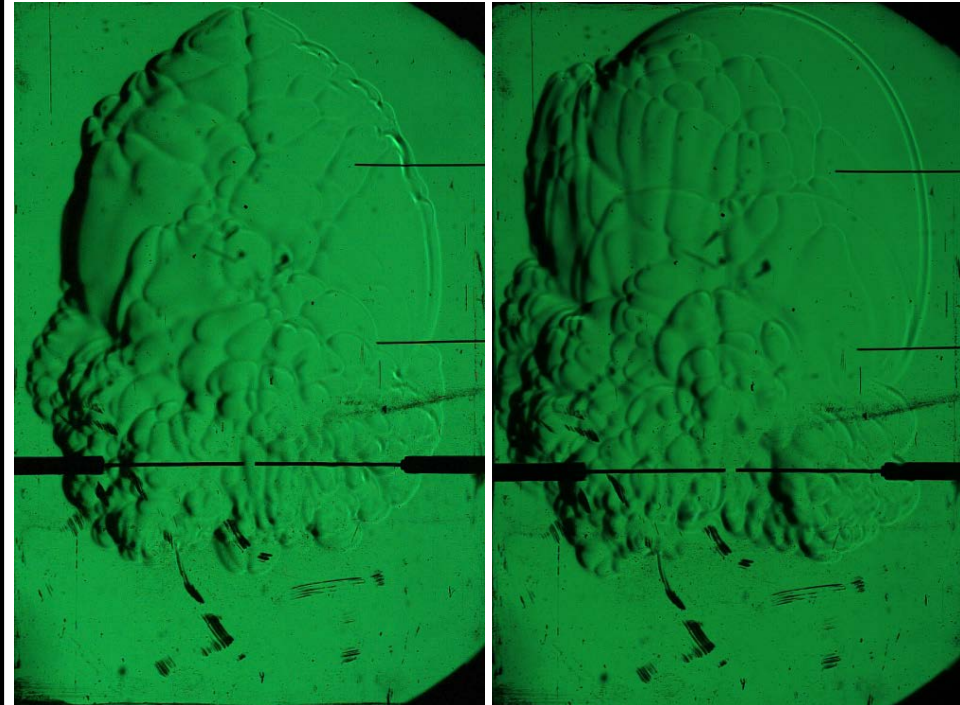


Переход от плавучего пламени к ячеистому ($8,8 \div 9$ об.% H_2)

8,8 об.%

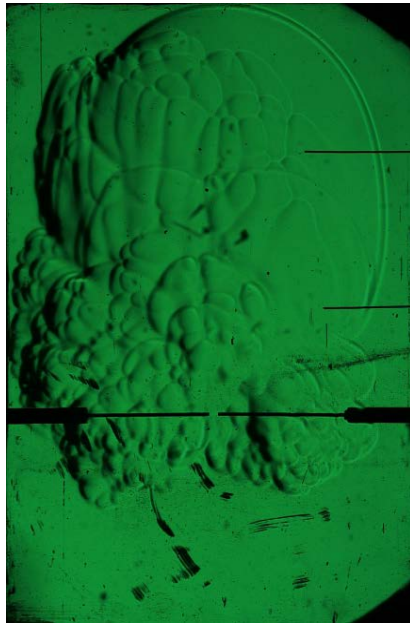


9 об.%

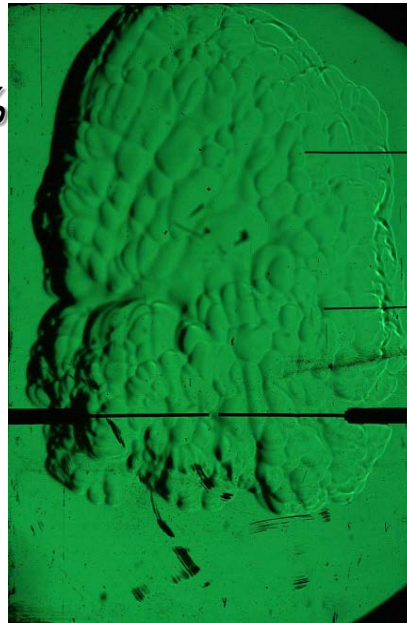


Ячеистые пламёна (9 ÷ 16 об.% H₂)

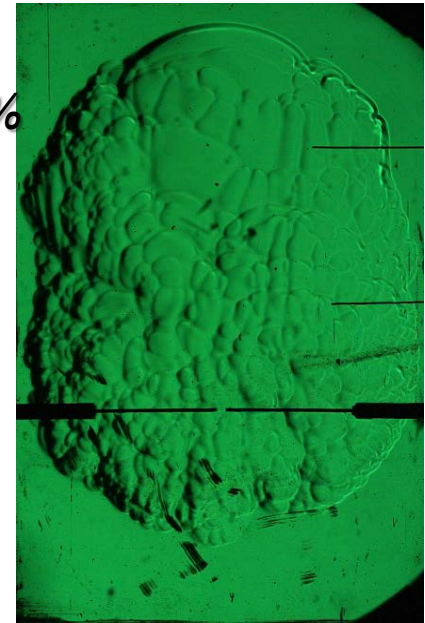
9 об.%



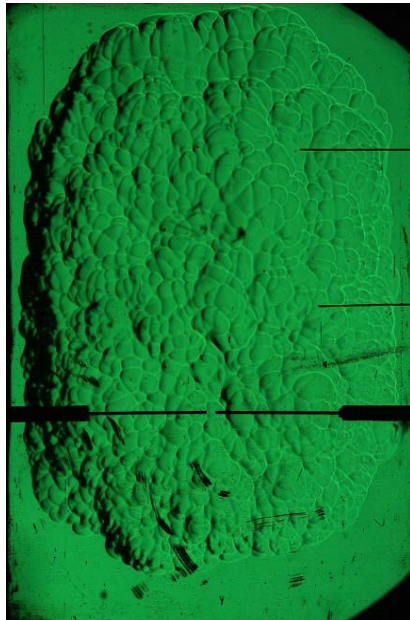
9,2 об.%



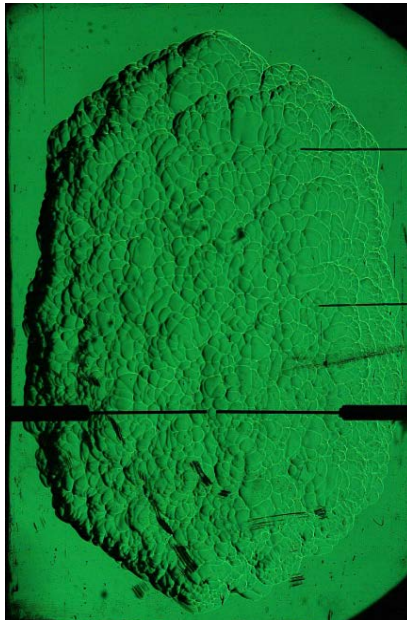
9,4 об.%



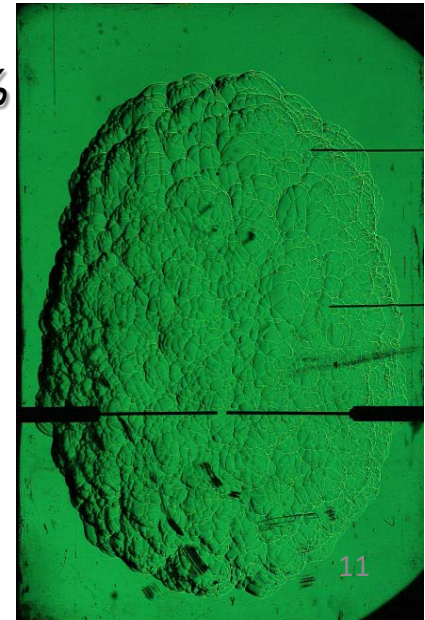
10 об.%



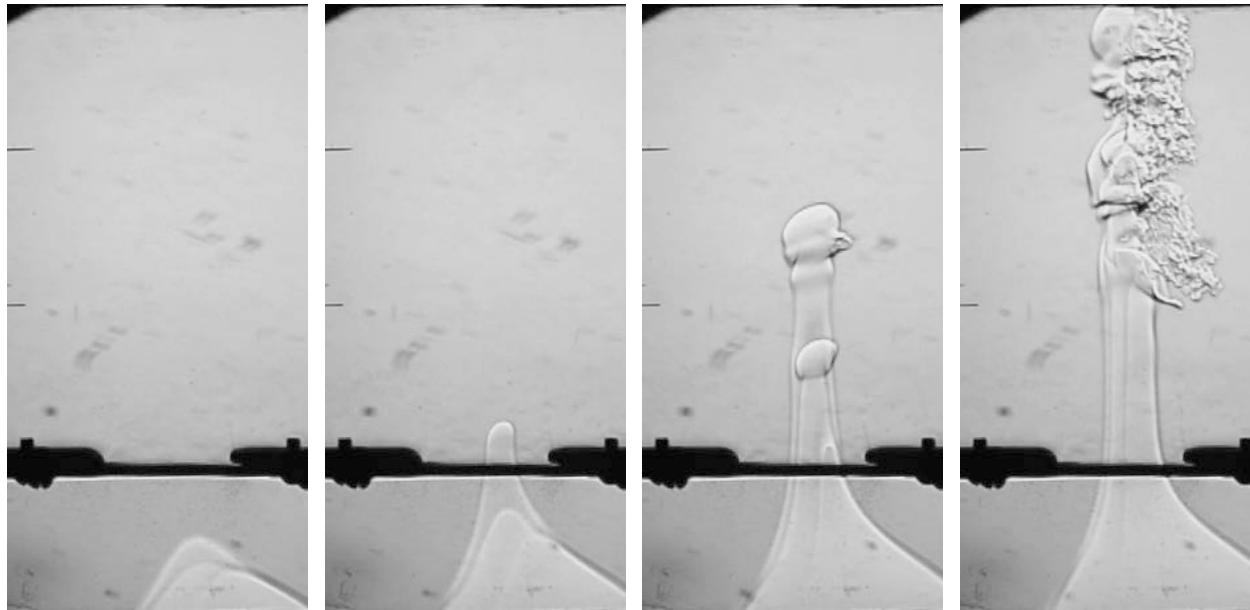
12 об.%



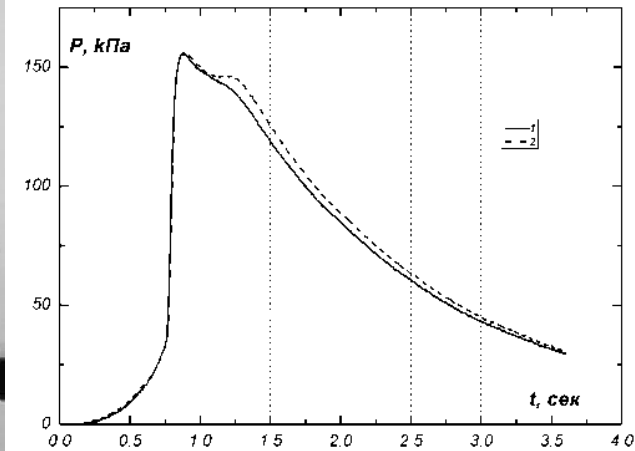
16 об.%



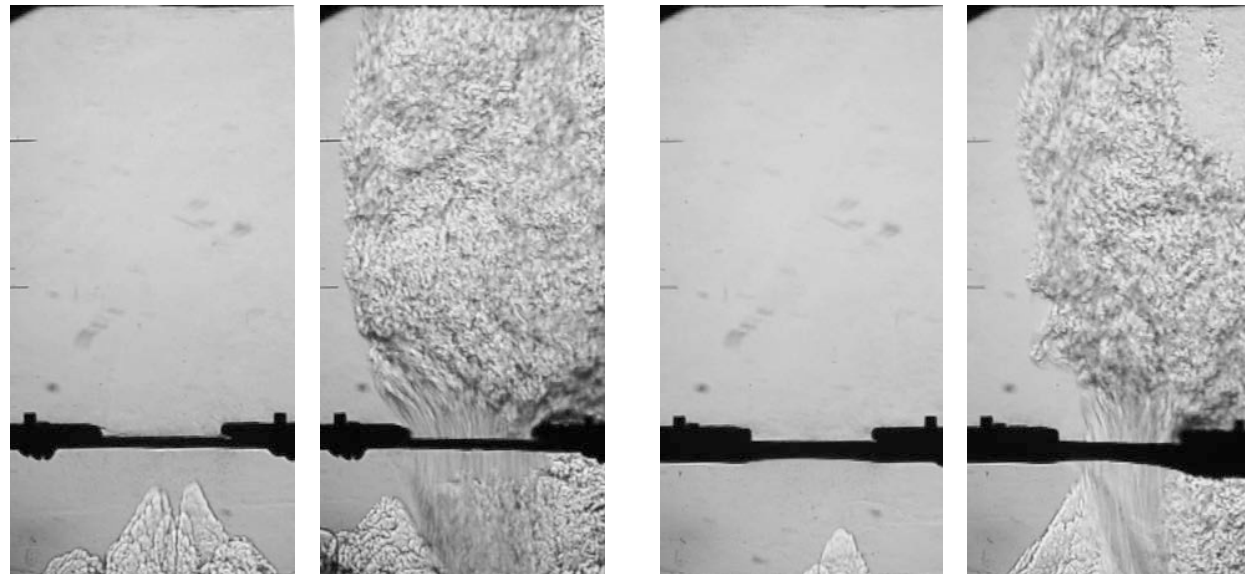
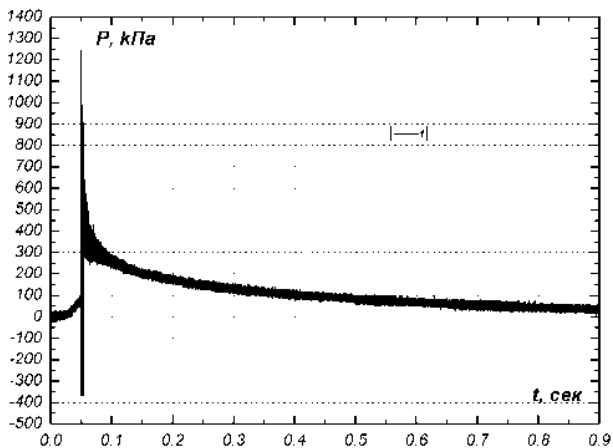
Переход пламени через перегородку с отверстием, H₂+воздух



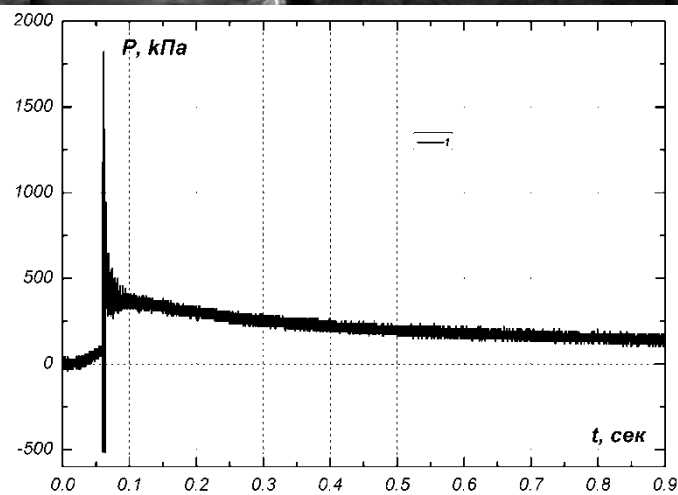
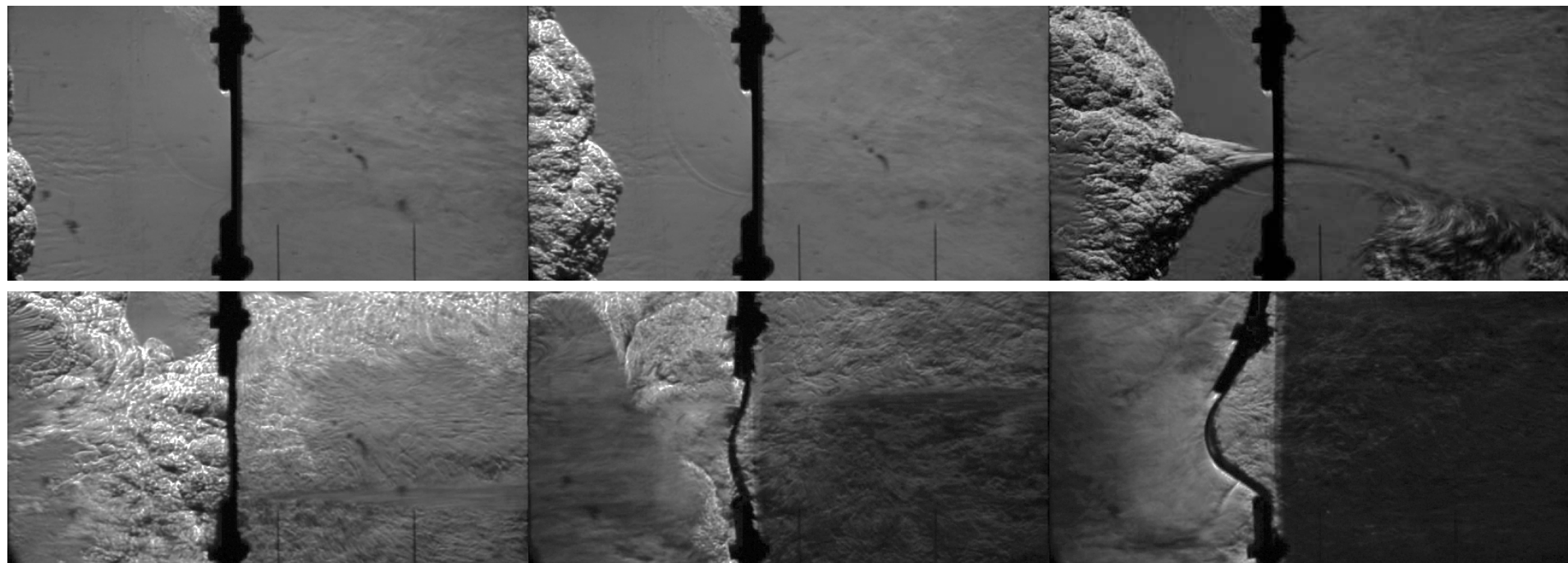
8% H₂, 15 мс



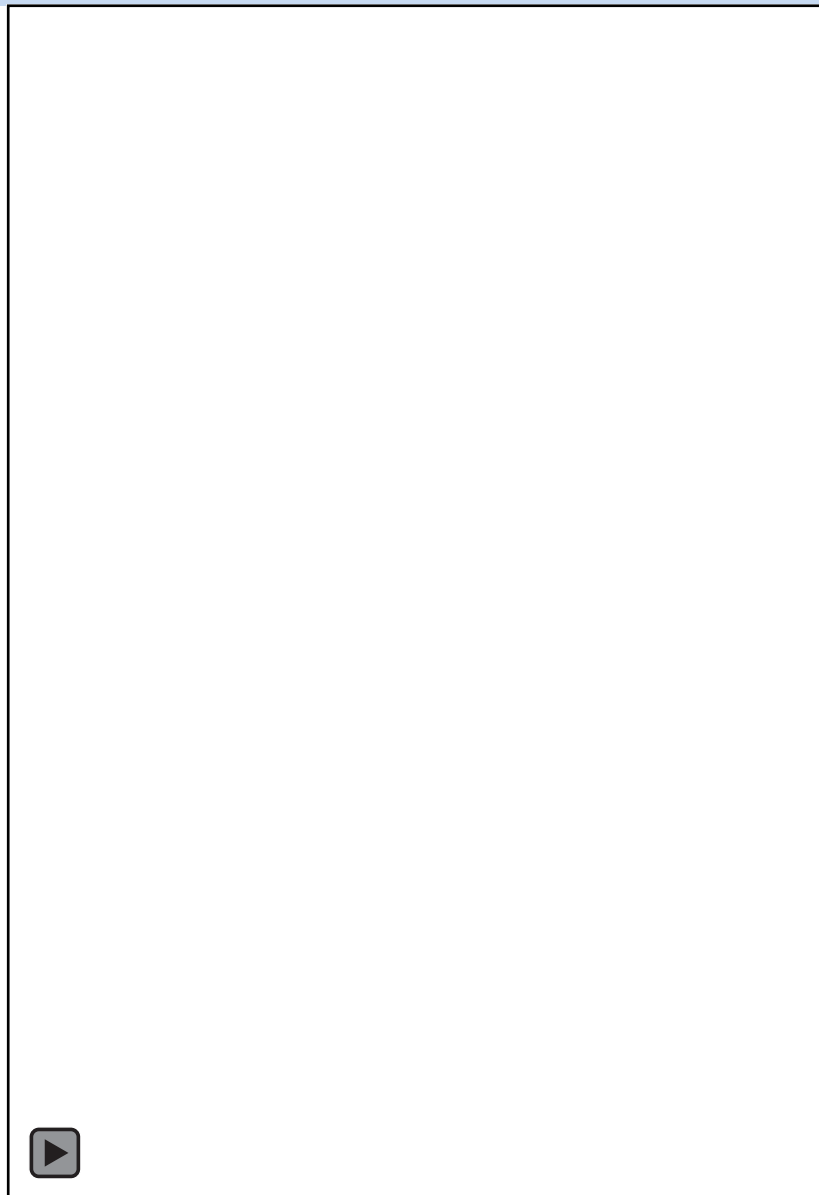
16% H₂, 3 мс



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

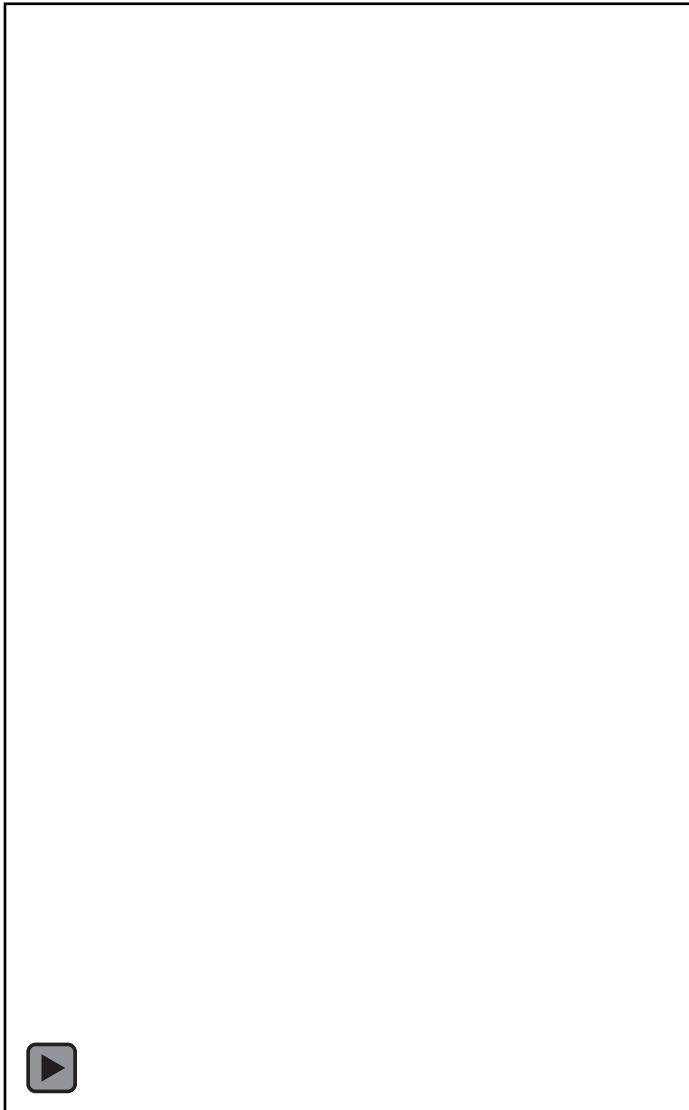


Переход пламени через перегородку с отверстием, 16 об.% H_2

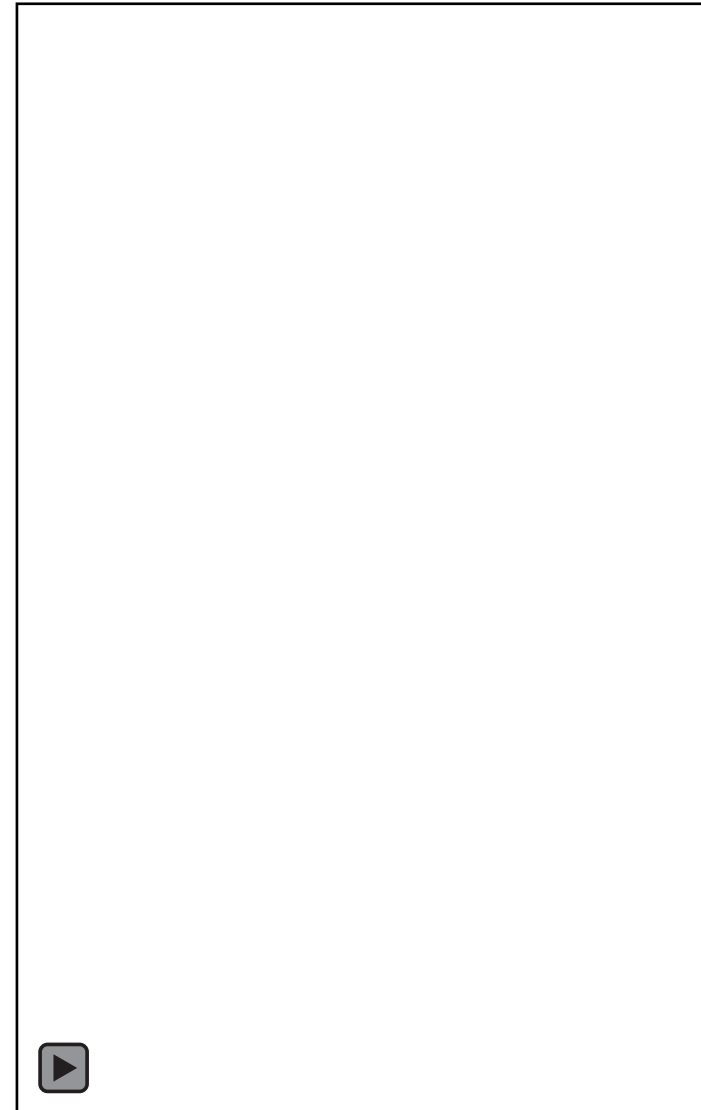


Взаимодействие пламени с решеткой, 8 об. % H₂

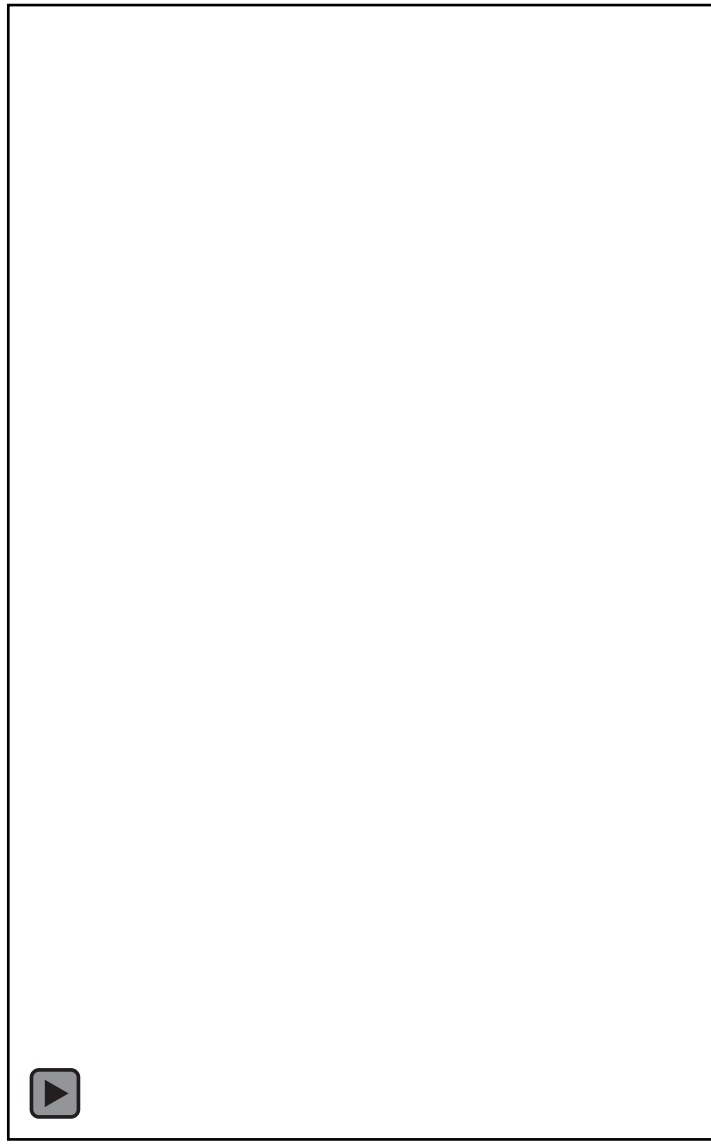
Решетка с отверстиями 1 мм



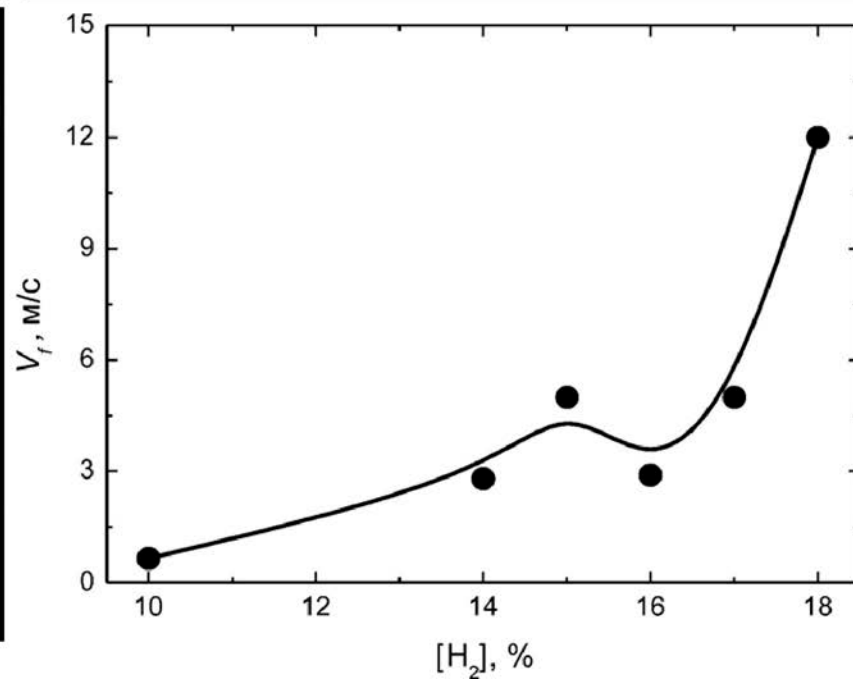
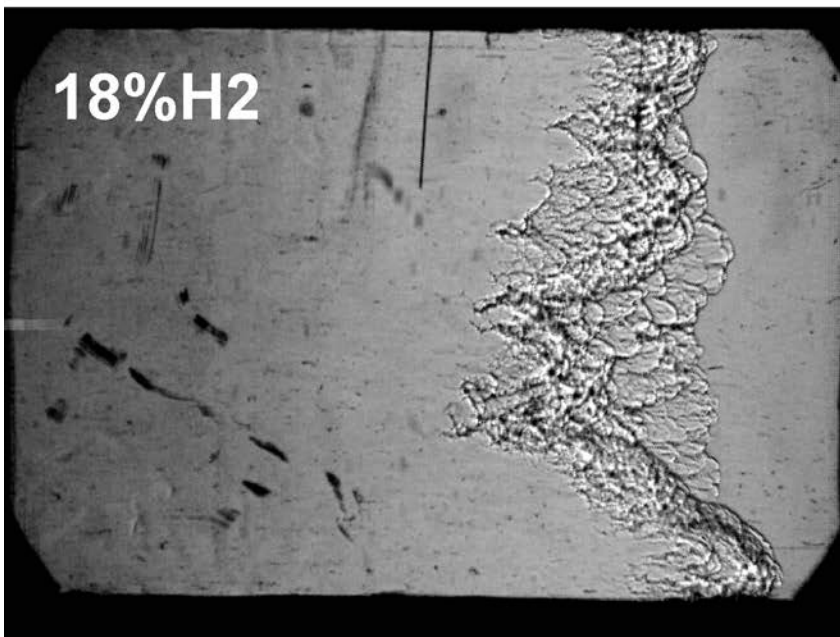
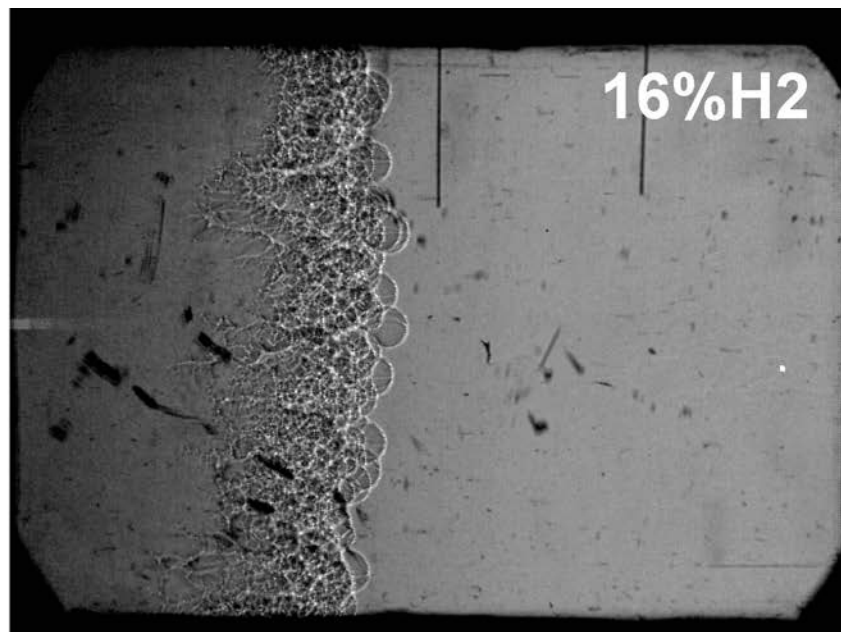
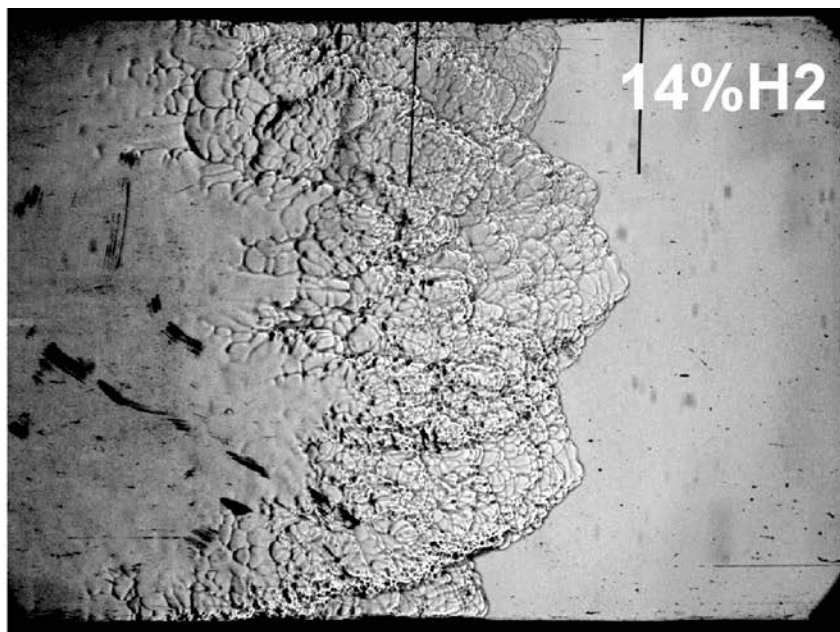
Решетка с отверстиями 2 мм



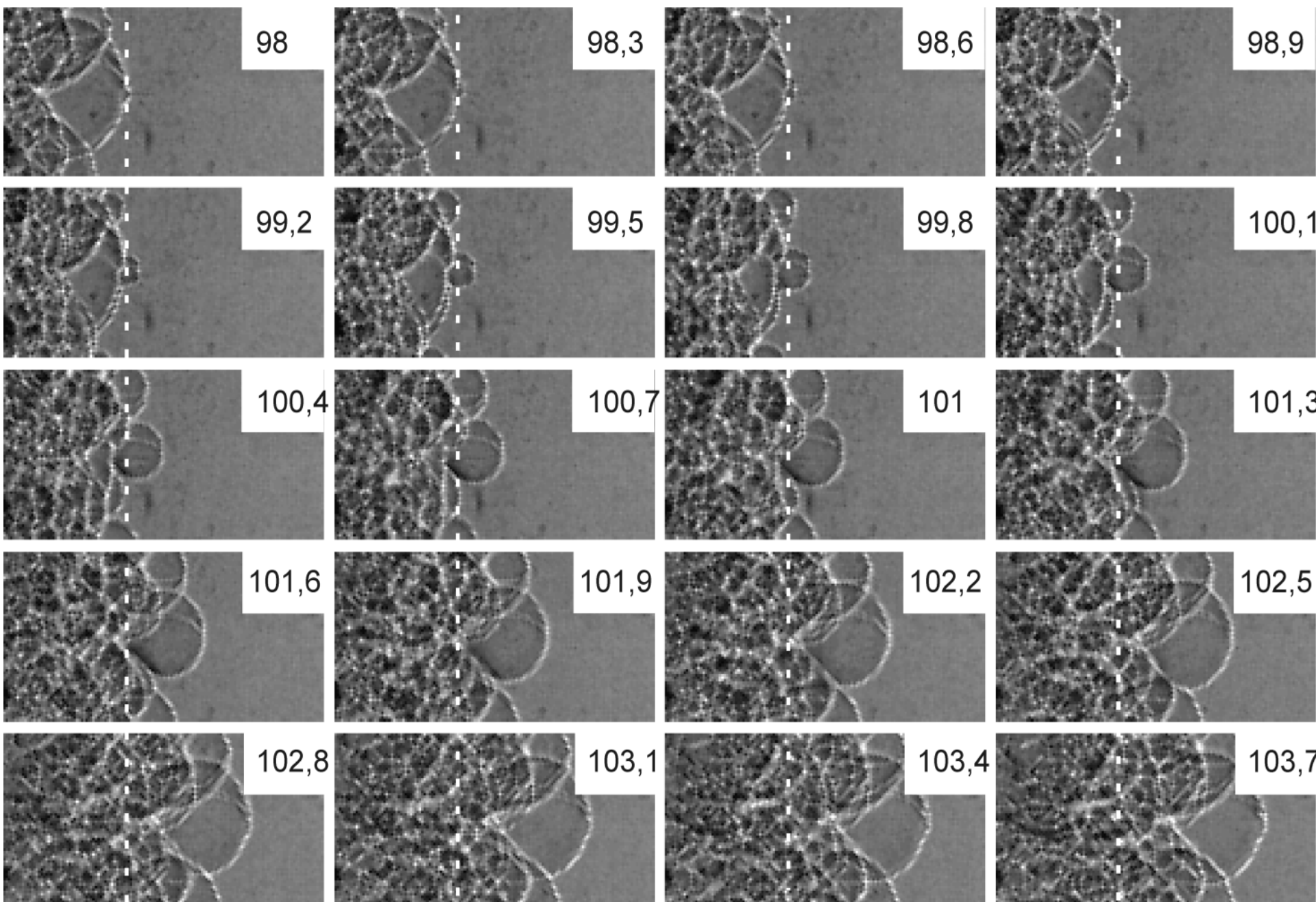
Акустическая неустойчивость пламени в закрытом канале, 16 об. % Н₂



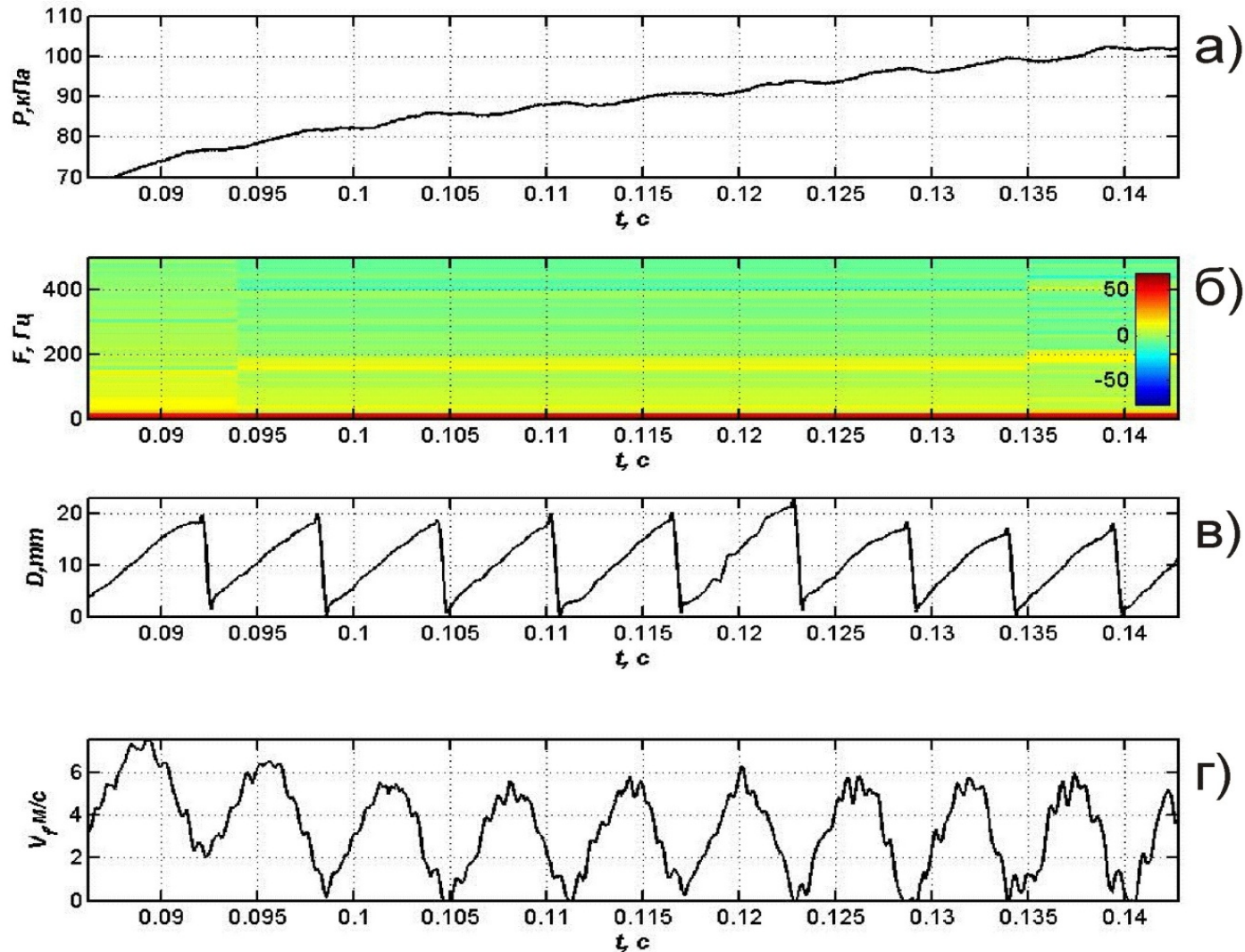
Пламена в смесях водорода с воздухом



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

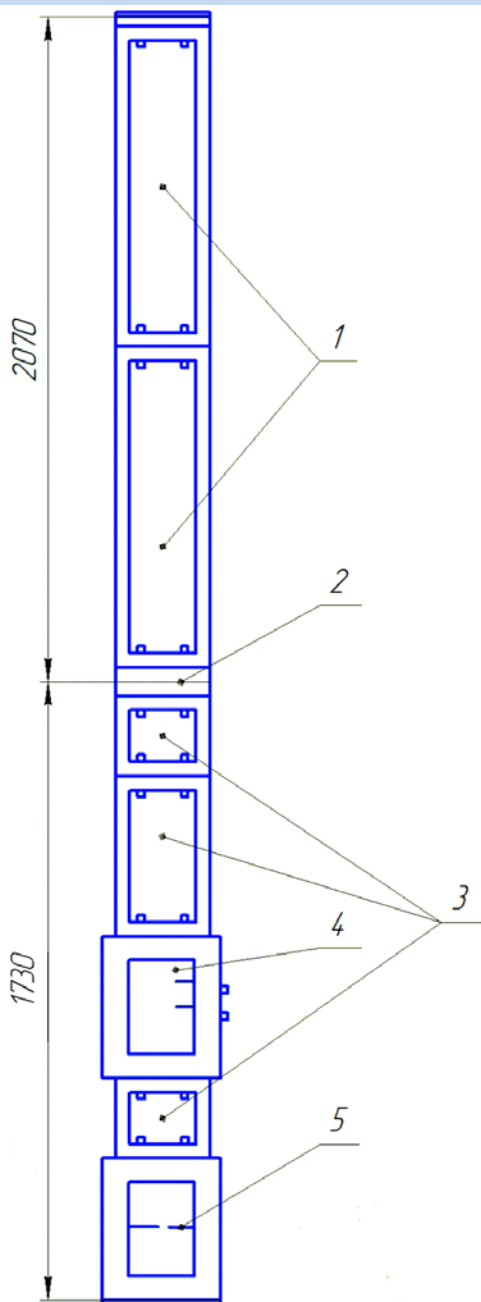


16% водорода в воздухе



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

Эксперимент с ударной волной и волной разрежения



1- отсеки драйвера высокого давления/разрежения

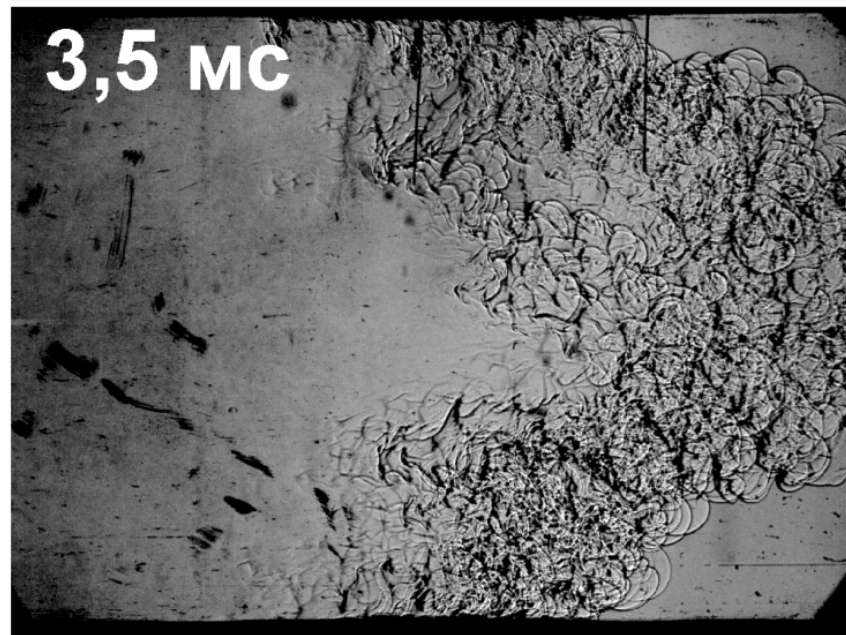
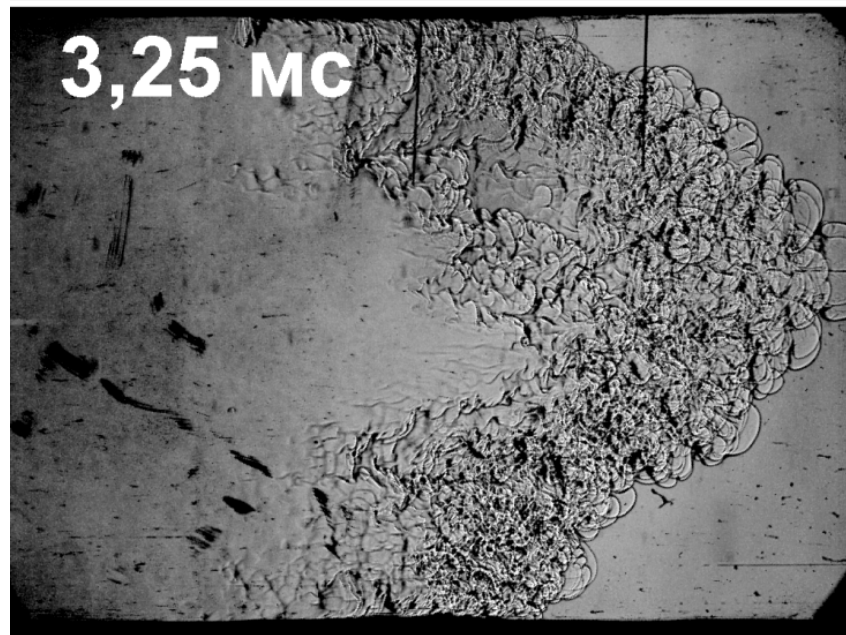
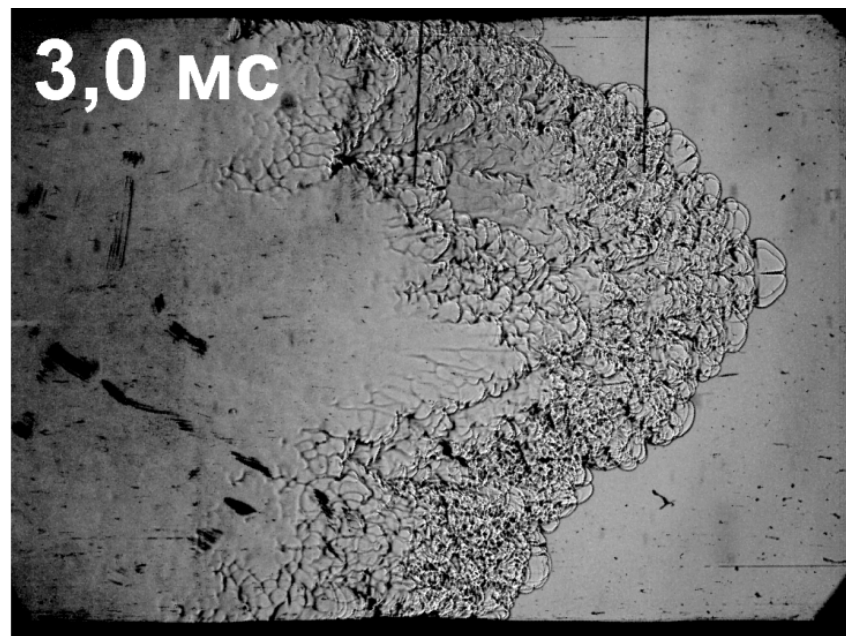
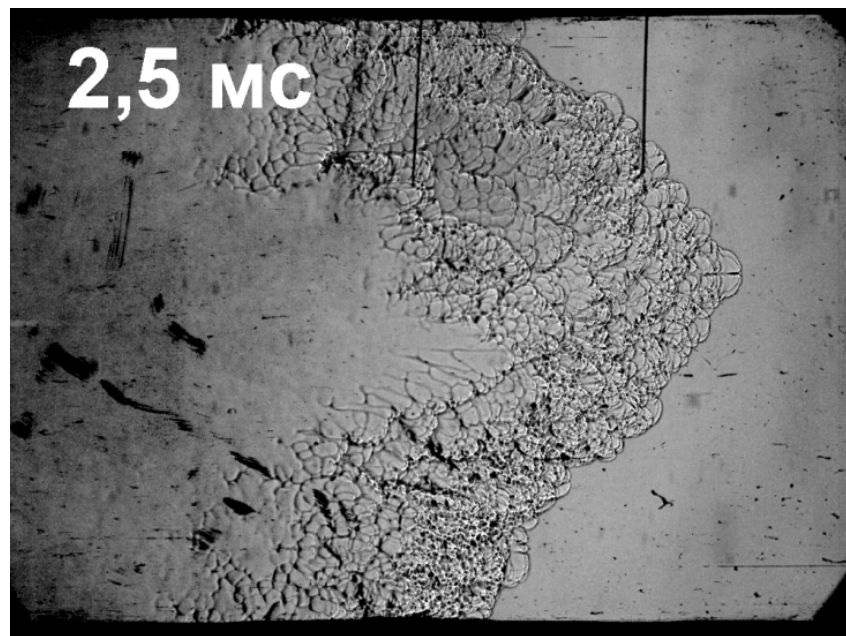
2- вакуумная мембрана

3- отсеки, заполненные смесью водорода с воздухом

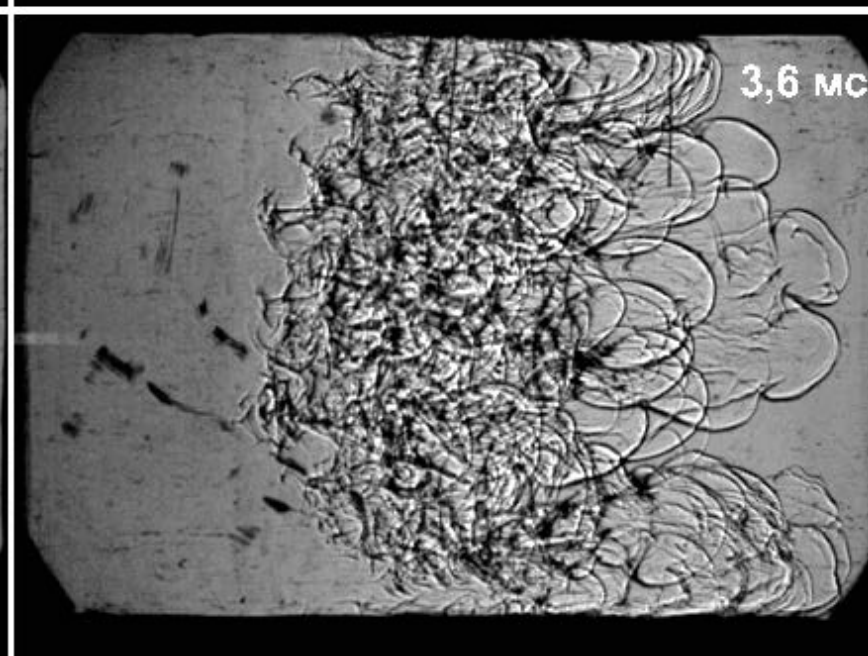
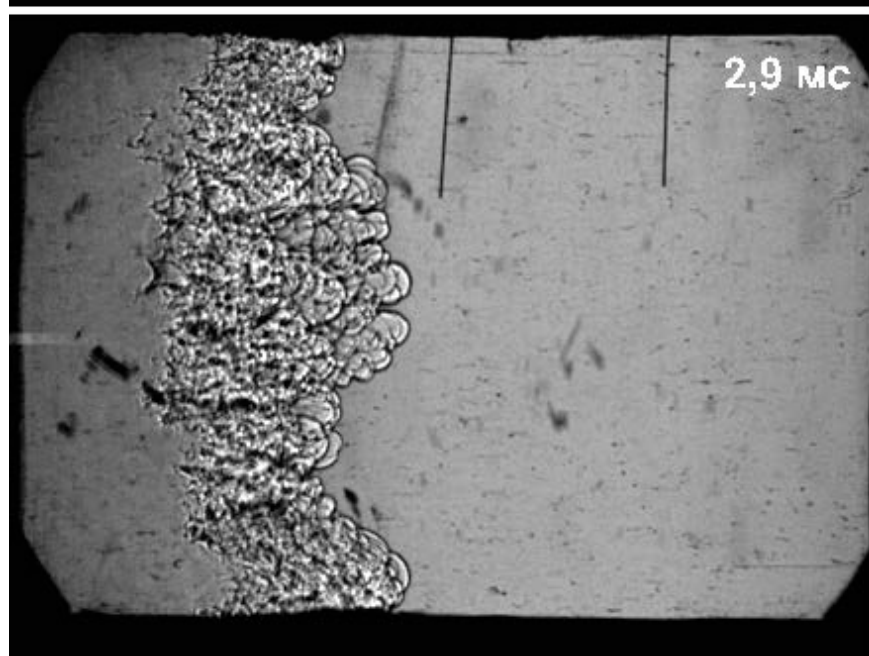
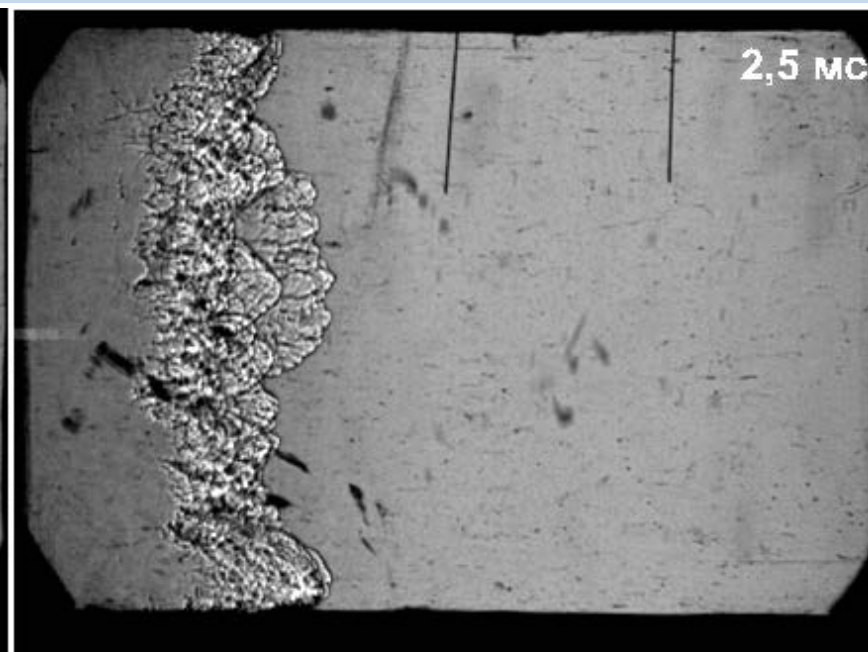
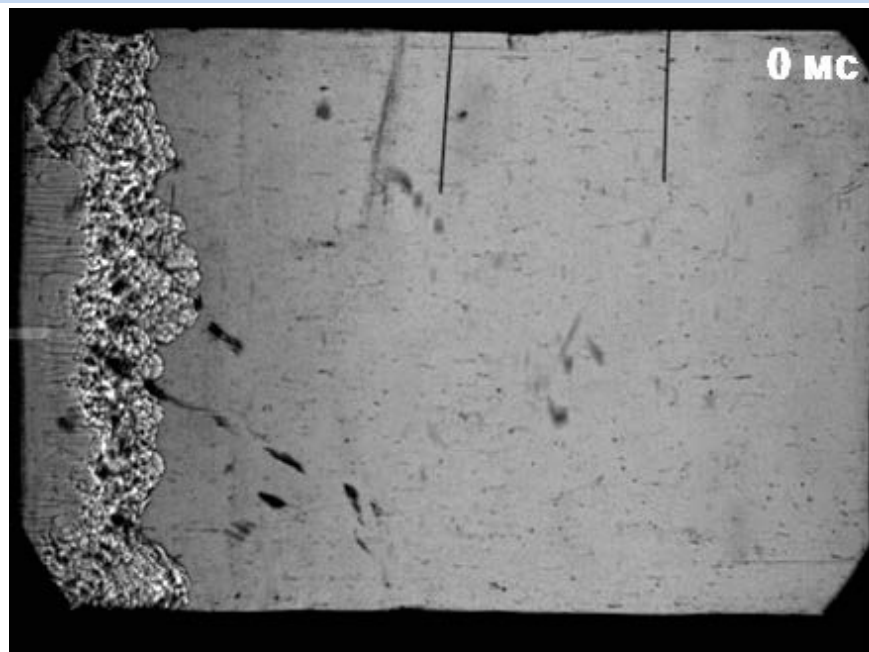
4- измерительный отсек

5- искровой промежуток

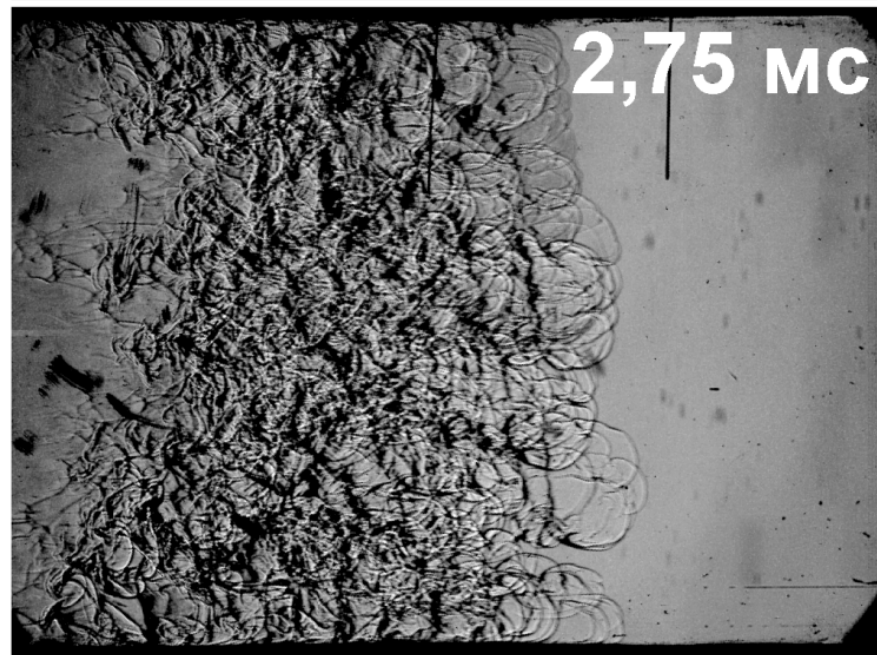
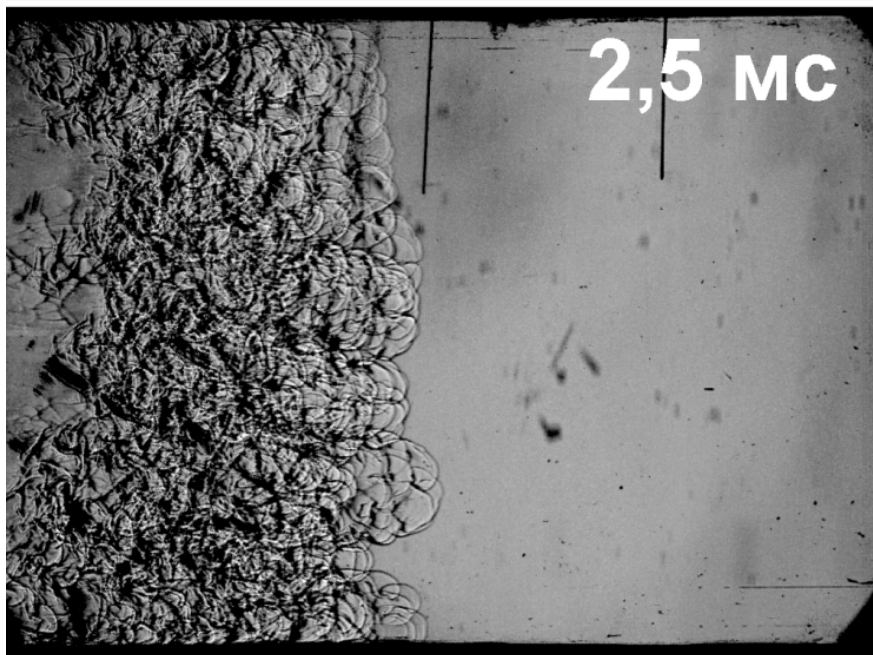
14 % водорода в воздухе, с волной разрежения



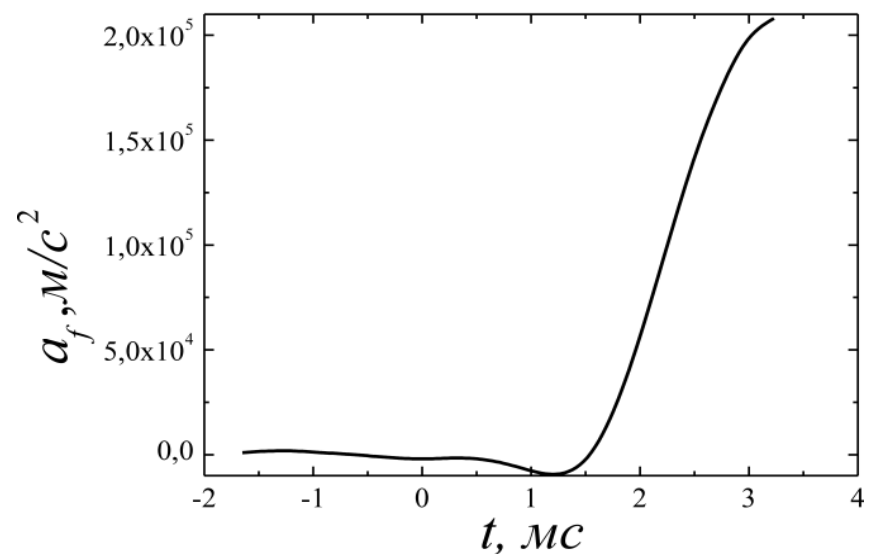
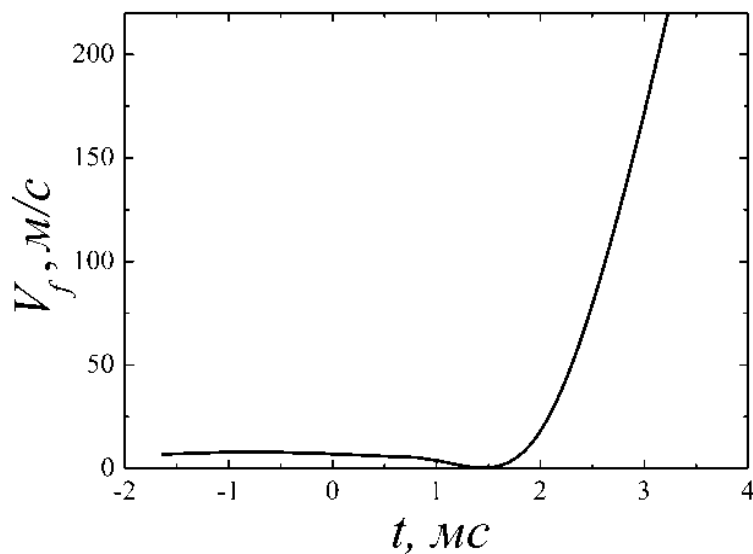
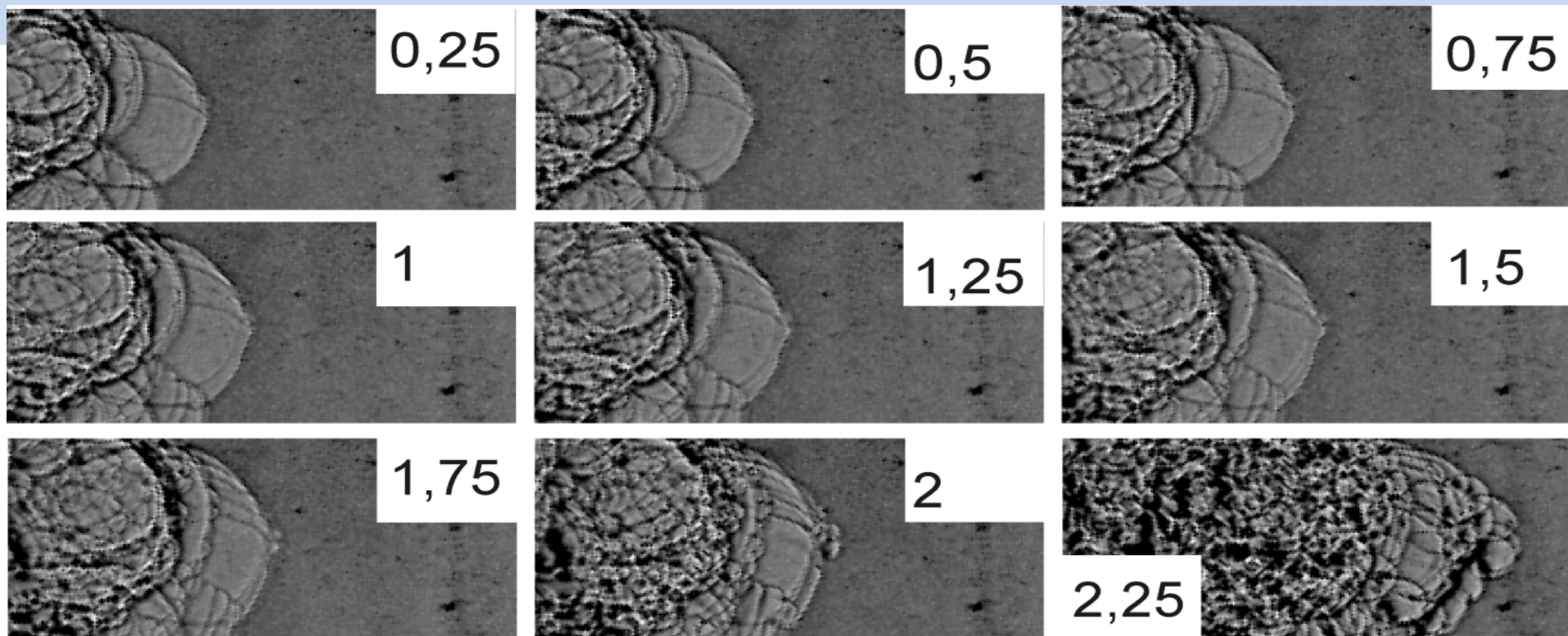
18 % водорода в воздухе, с волной разрежения



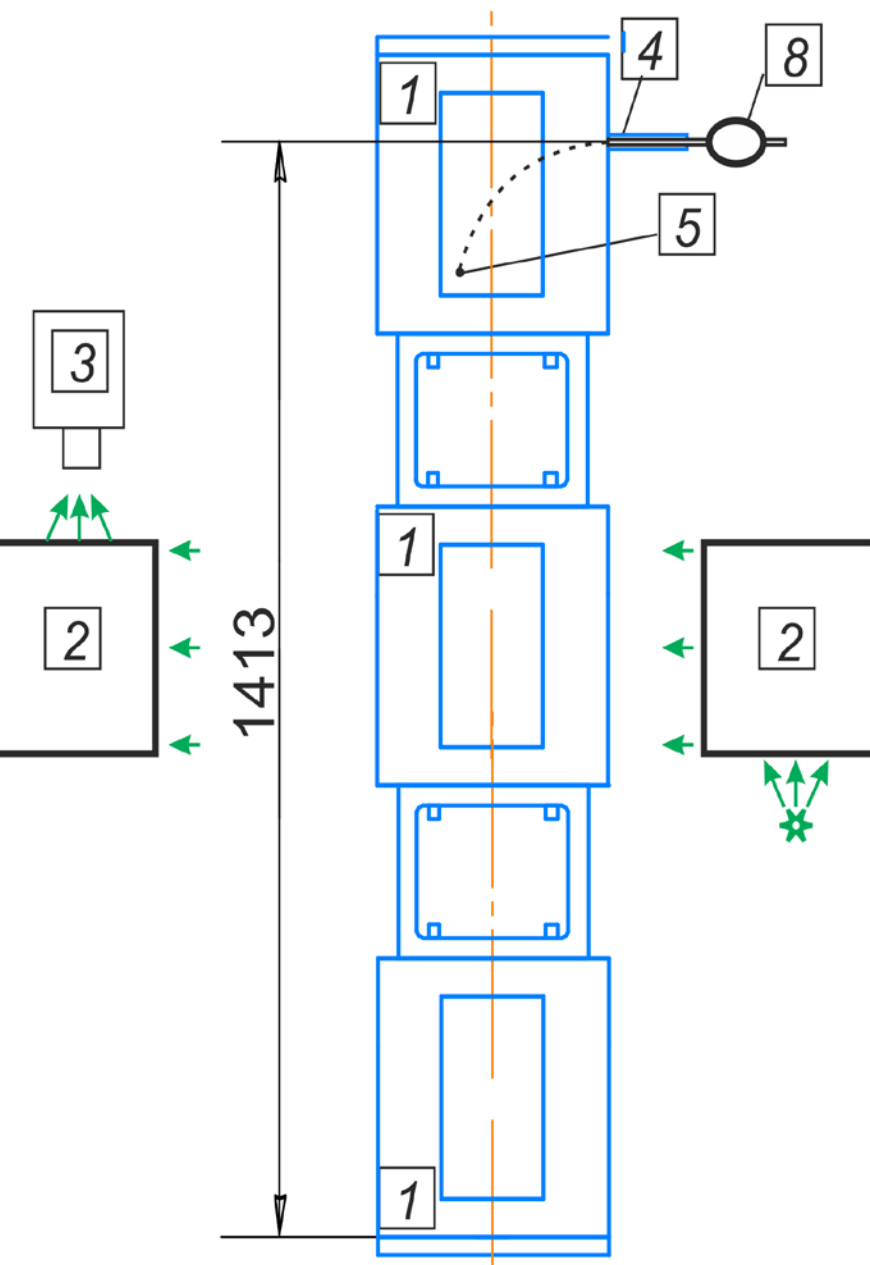
16 % водорода в воздухе, с волной разрежения



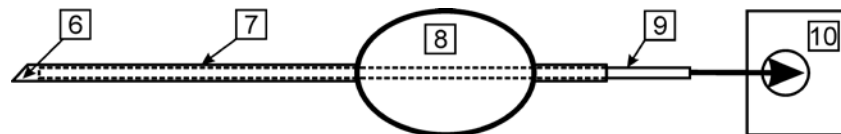
16% водорода в воздухе, с волной разрежения



Воспламенение каталитическими частицами



устройство инжектора

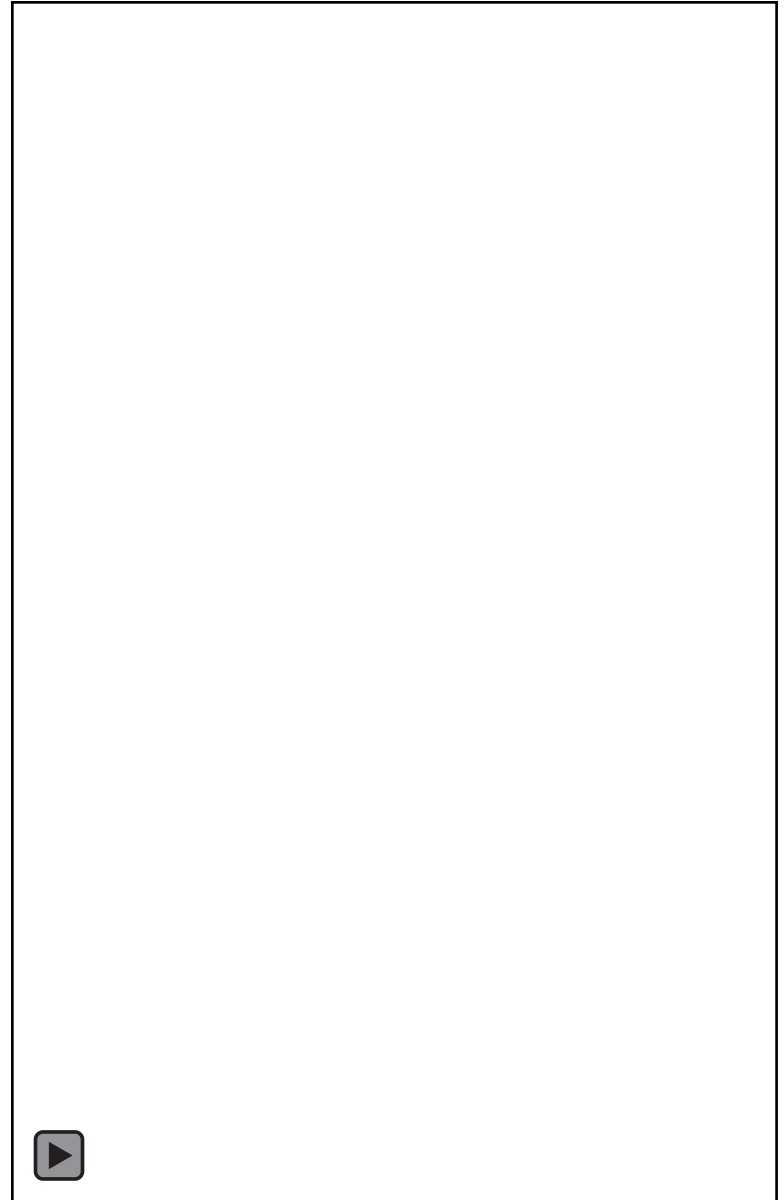
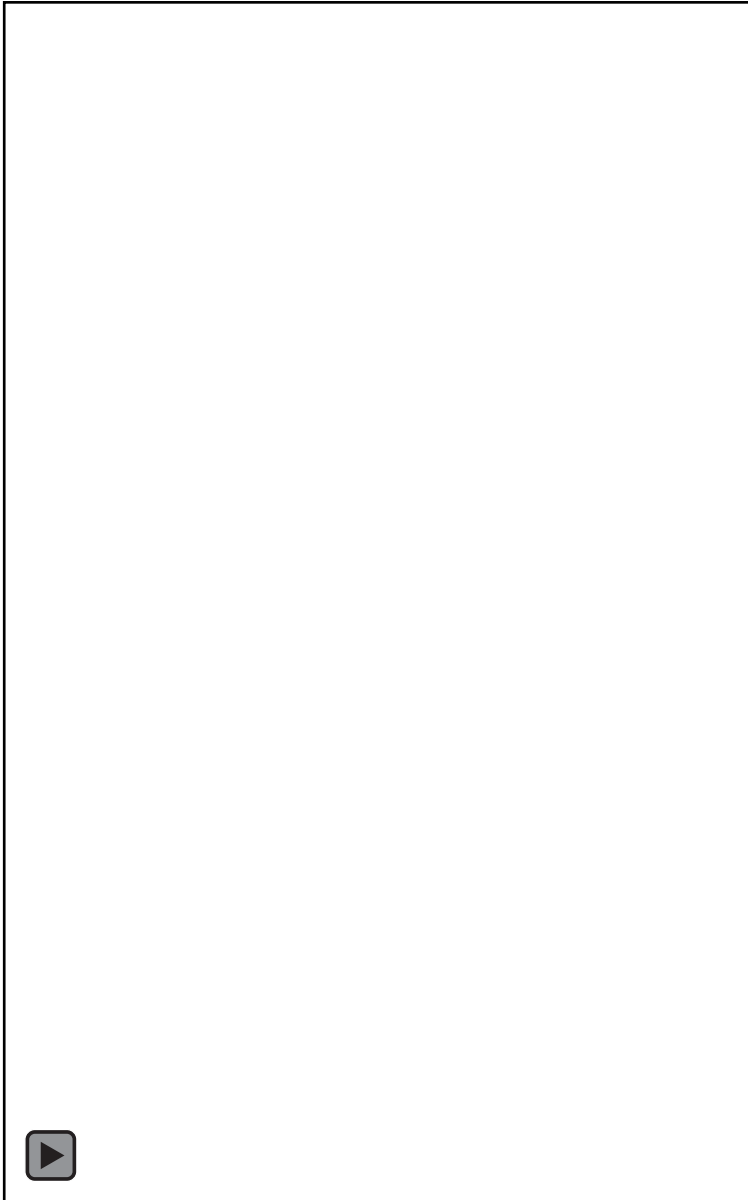


- 1 – секции трубы с оптическими окнами,
- 2 – части теневого прибора ИАБ-451,
- 3 – видеокамера,
- 4 – устройство инъекции частиц,
- 5 – инжектированная частица,
- 6 – местоположение частицы перед опытом,
- 7 – корпус инжектора,
- 8 – резиновая груша,
- 9 – термопара, 10 – измеритель температуры

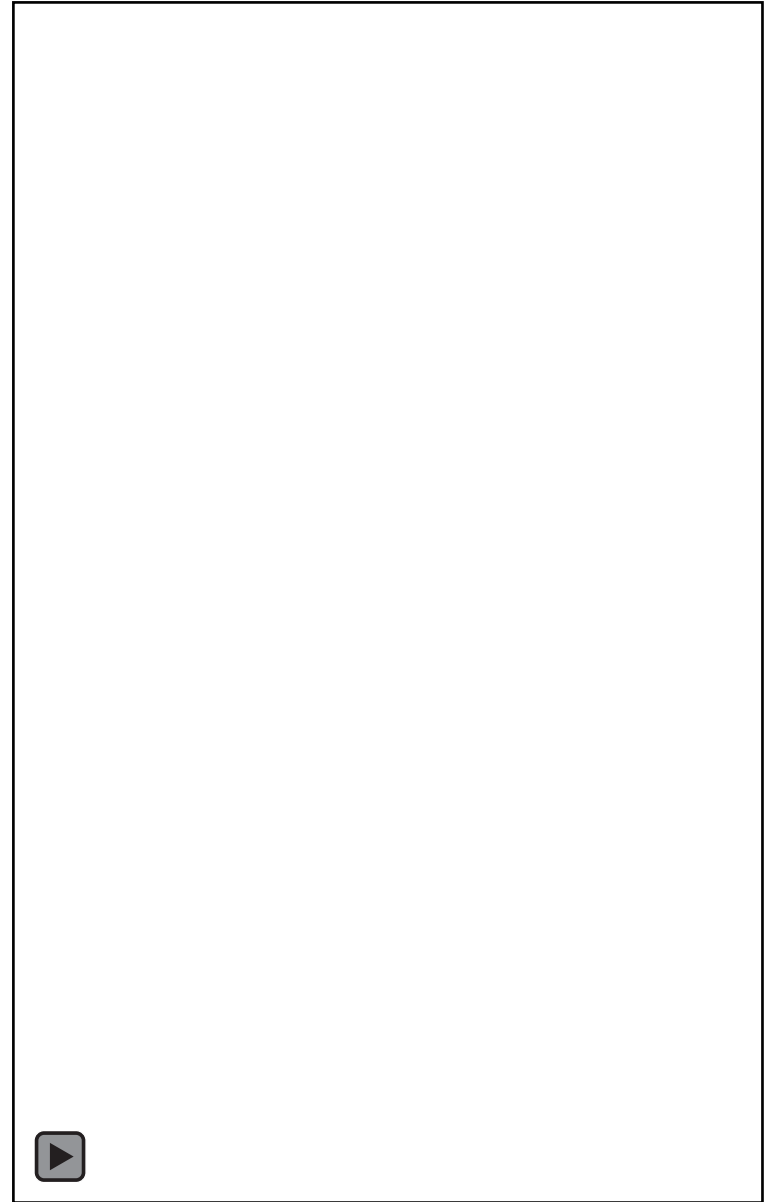
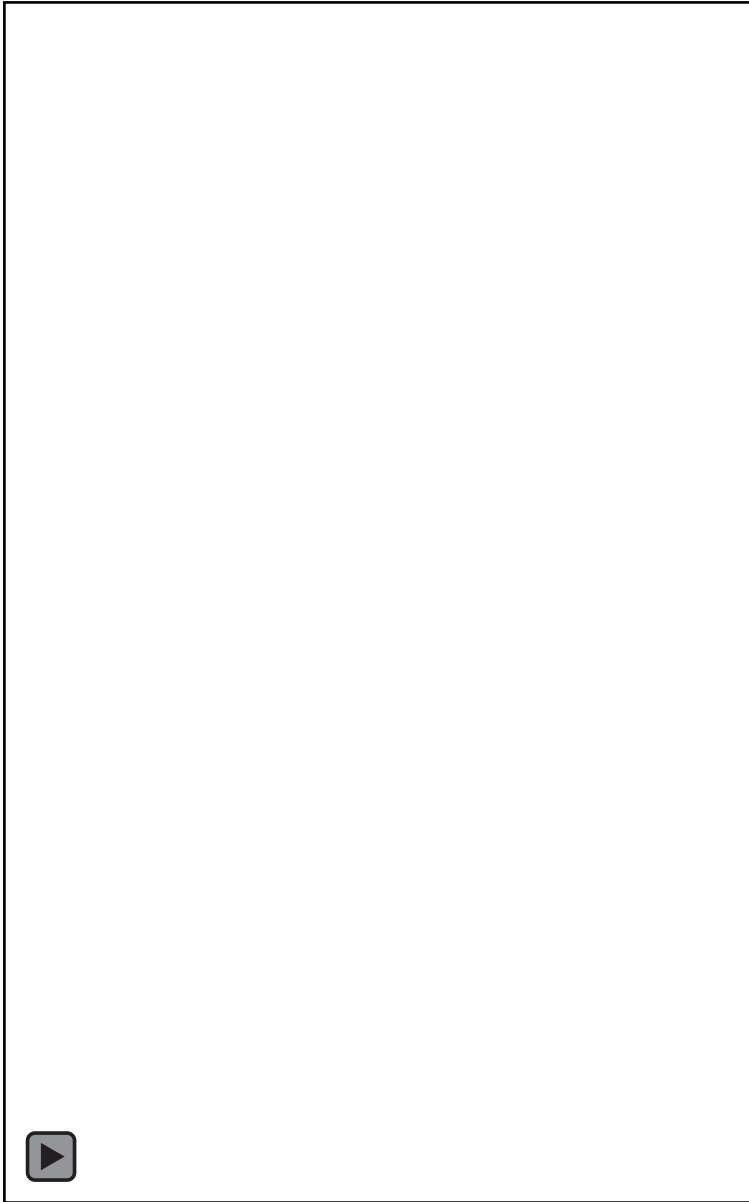
Каталитическая частица ~ 0,5 мм



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.% H₂, 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



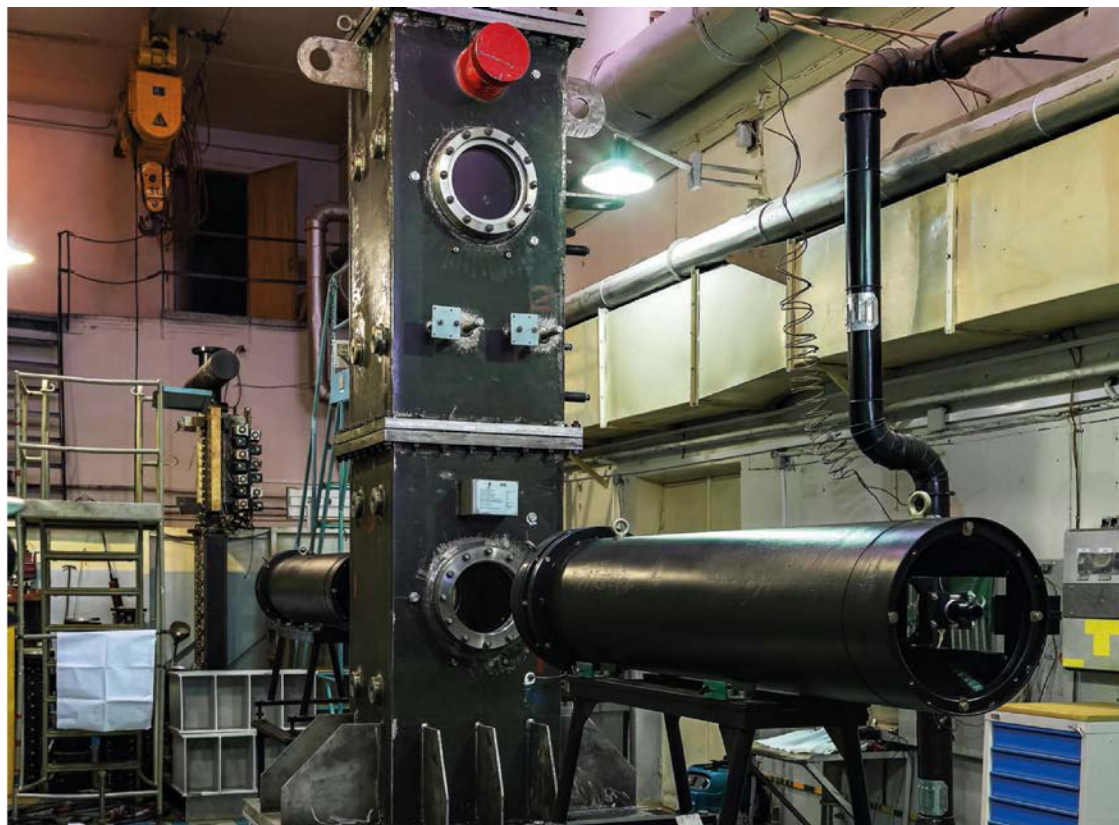
**Горение в щелевом зазоре,
16 об.% H₂, $p_{ini} = 100$ кПа, $h = 2,6$ мм**



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.

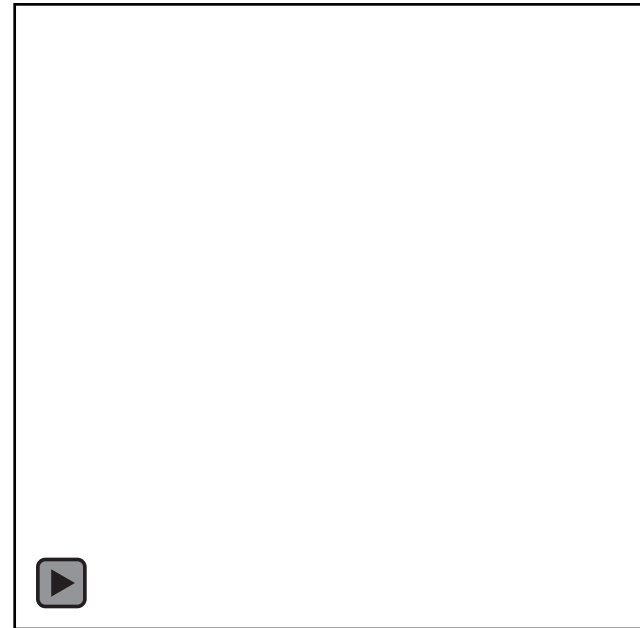
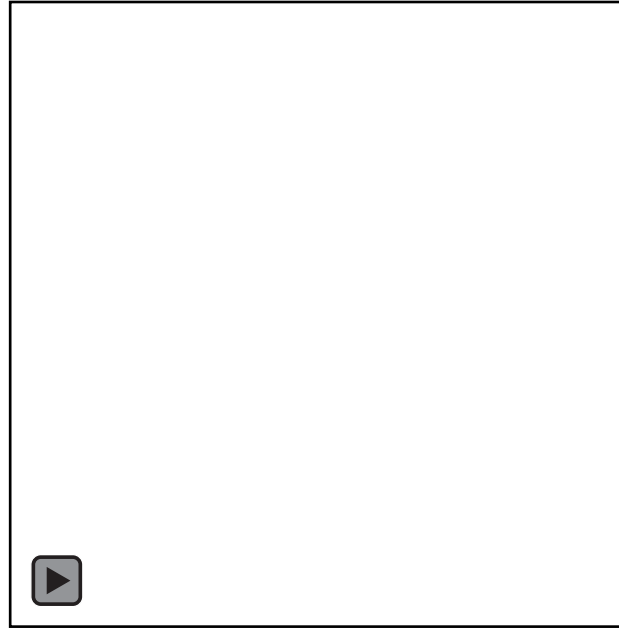
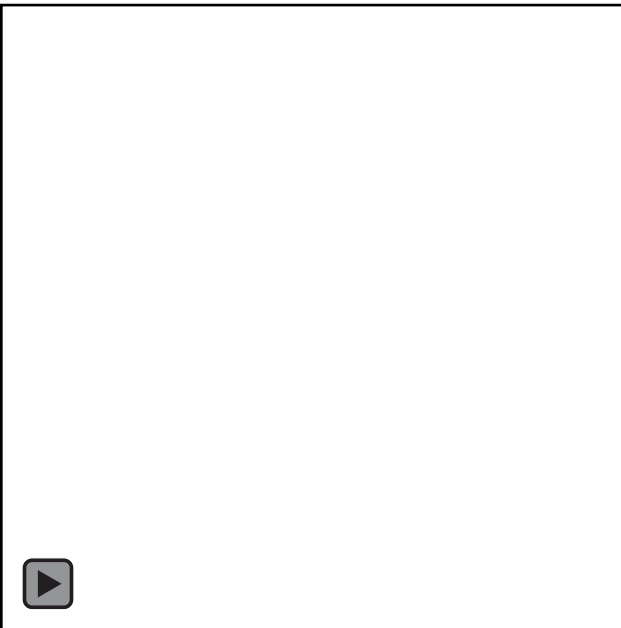
Горение водородо-воздушных смесей в установке МУТ-ПК



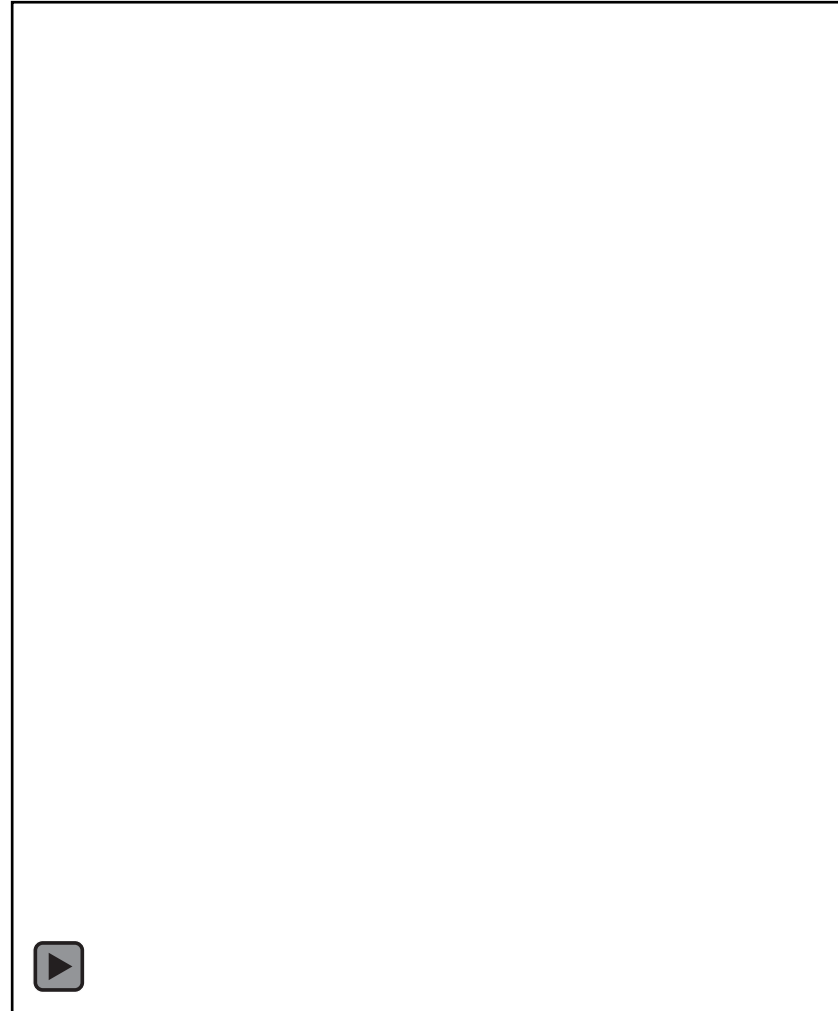
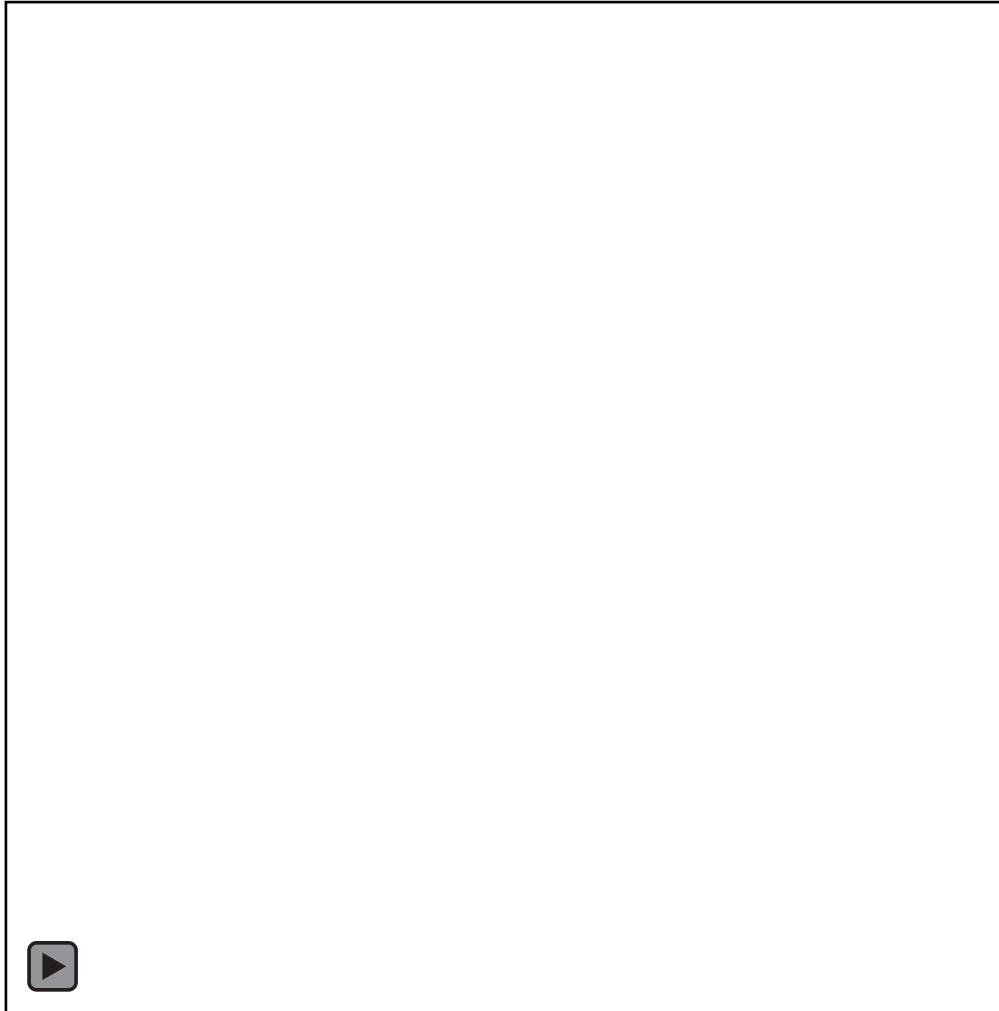
$C_{H_2} = 6 \text{ об.}\%$

$C_{H_2} = 8 \text{ об.}\%$

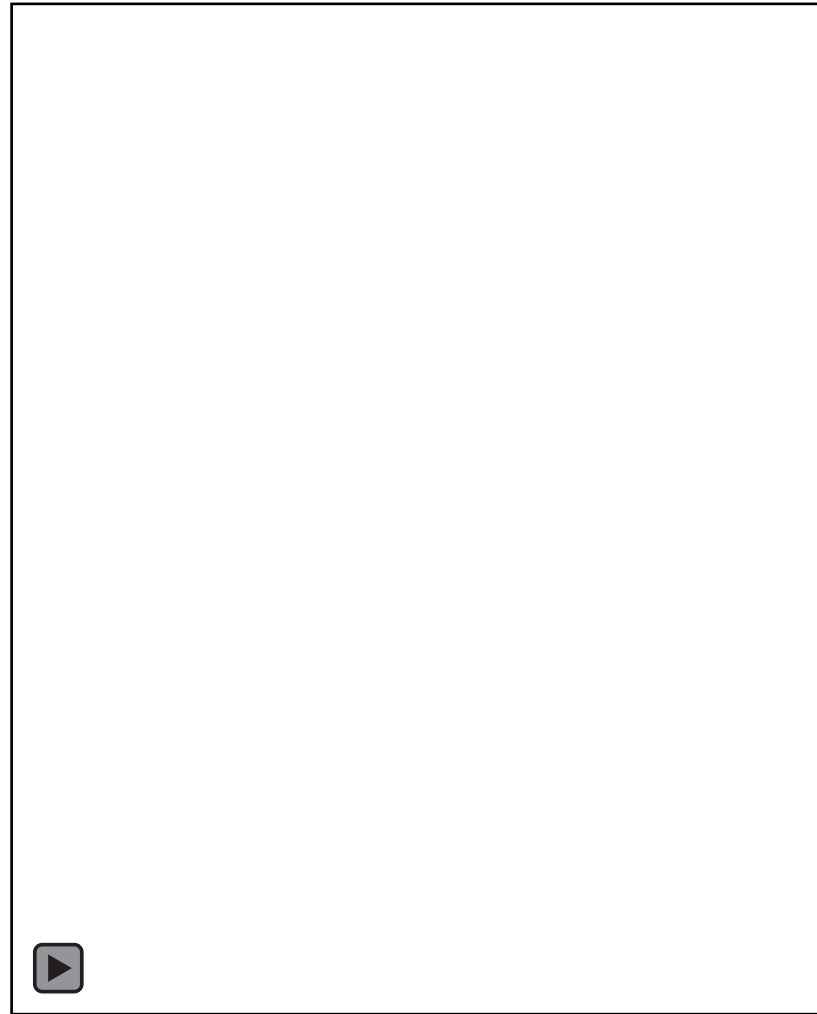
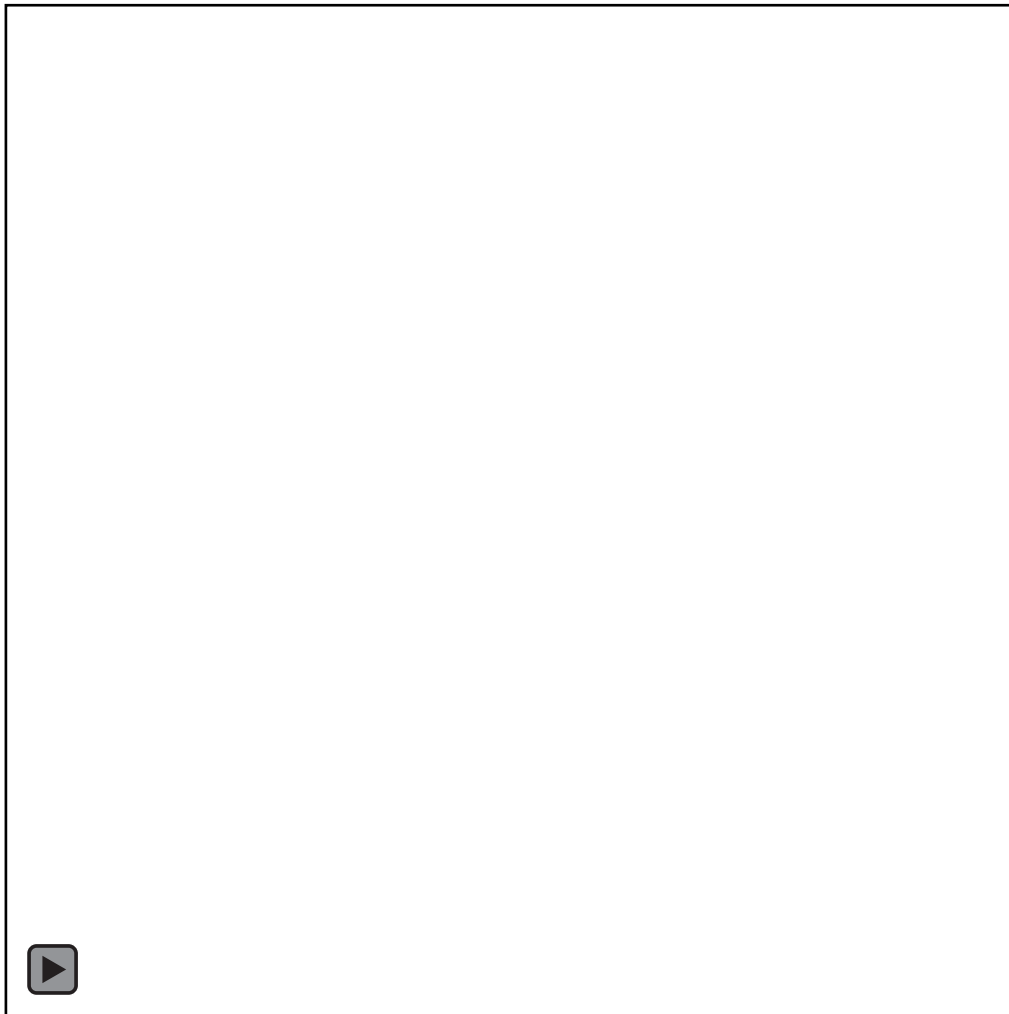
$C_{H_2} = 8 \text{ об.}\%$



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!