



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

*Забабухинские научные чтения 2025*



**Влияние температуры водорода на  
ВОЗМОЖНОСТЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРИ  
внезапном истечении в канал с воздухом**

В.М. Анисимов, В.М. Бочарников, В.В. Володин, С.В. Головастов, В.В. Голуб,  
А.Е. Ельянов  
ОИВТ РАН, Москва

В.А. Симоненко, В.В. Стаханов  
РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

# Мотивация и актуальность

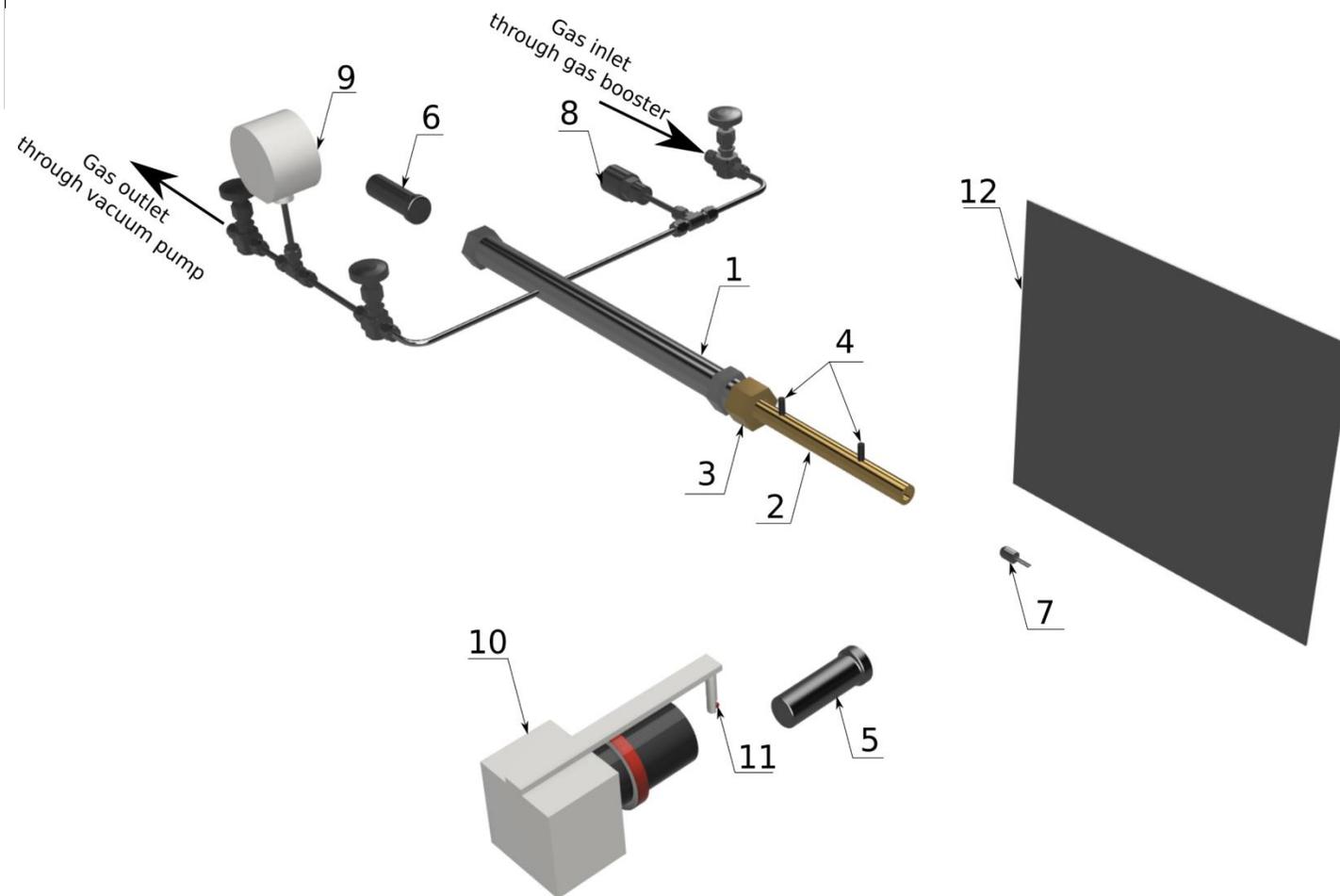
В 75% пожаров и взрывов водорода не обнаружено источника воспламенения

Для разработки безопасных систем хранения и транспортировки необходимо изучение условий самовоспламенения водорода при различных температурах и давлениях

# Задачи

- Определить минимальные давления самовоспламенения водорода в каналах разного диаметра
- Определить влияние начальной температуры водорода (20–150°C) на процесс воспламенения.
- Определить условия реализации режимов устойчивого горения, гашения и отсутствия воспламенения при внезапном истечении в канал .

# Схема установки



## Схема стенда.

- 1 – трубка высокого давления,
- 2 – измерительная секция,
- 3 – прижимная гайка,
- 4 – датчики динамического давления,
- 5 – ФЭУ-100,
- 6 – ФЭУ-79,
- 7 – светодиод,
- 8 – датчик статического давления,
- 9 – вакуумметр,
- 10 – высокоскоростная камера Phantom VEO710S,
- 11 – светодиодный модуль ВидеоТИР,
- 12 – световозвращающий экран

# Методика проведения эксперимента

## **Подготовка:**

- Камера высокого давления откачивалась вакуумным насосом
- Камера нагревалась до заданной температуры (20–150°C).
- Водород подавался порциями в КВД с паузами для равномерного нагрева.

## **Проведение эксперимента:**

- Диафрагма разрывалась, создавая импульсную струю водорода.
- Датчики давления и ФЭУ регистрировали параметры истечения и воспламенения.
- Высокоскоростная камера фиксировала распространение ударной волны и зоны горения.

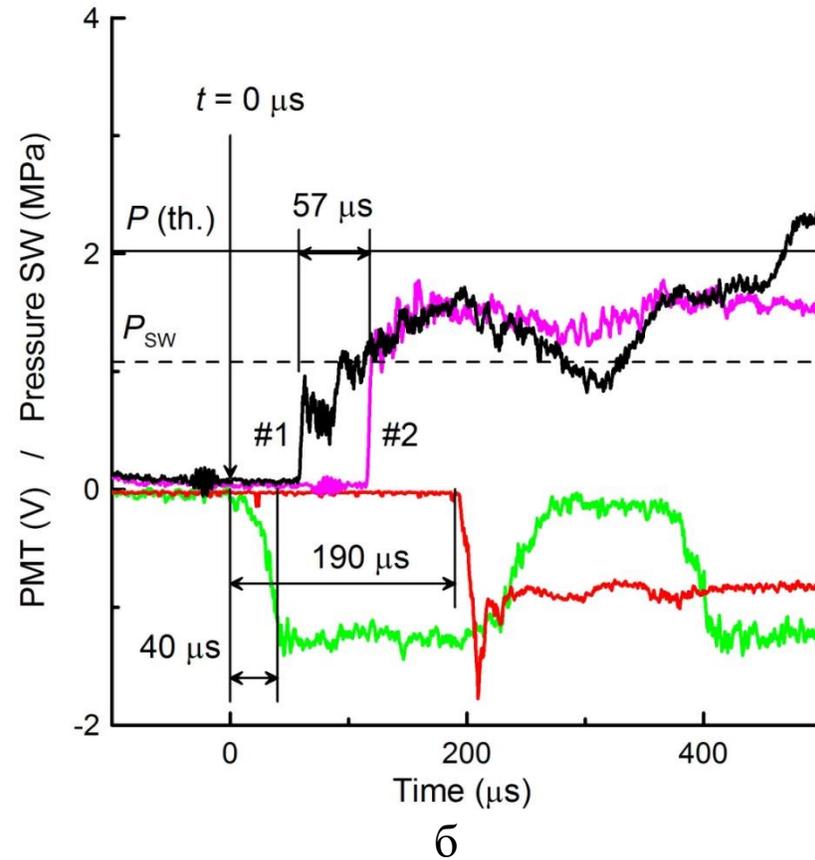
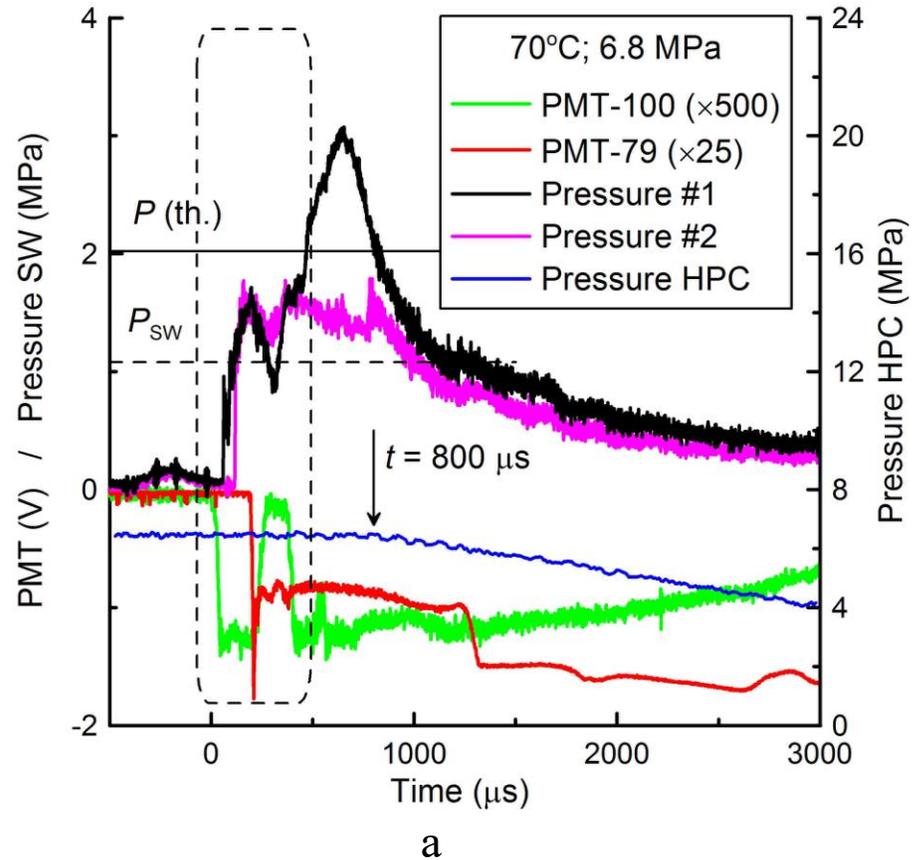
## **Анализ данных:**

- Анализировались осциллограммы для определения времени воспламенения и характера горения.
- Теневые фотографии использовались для визуализации ударных волн и зон свечения.



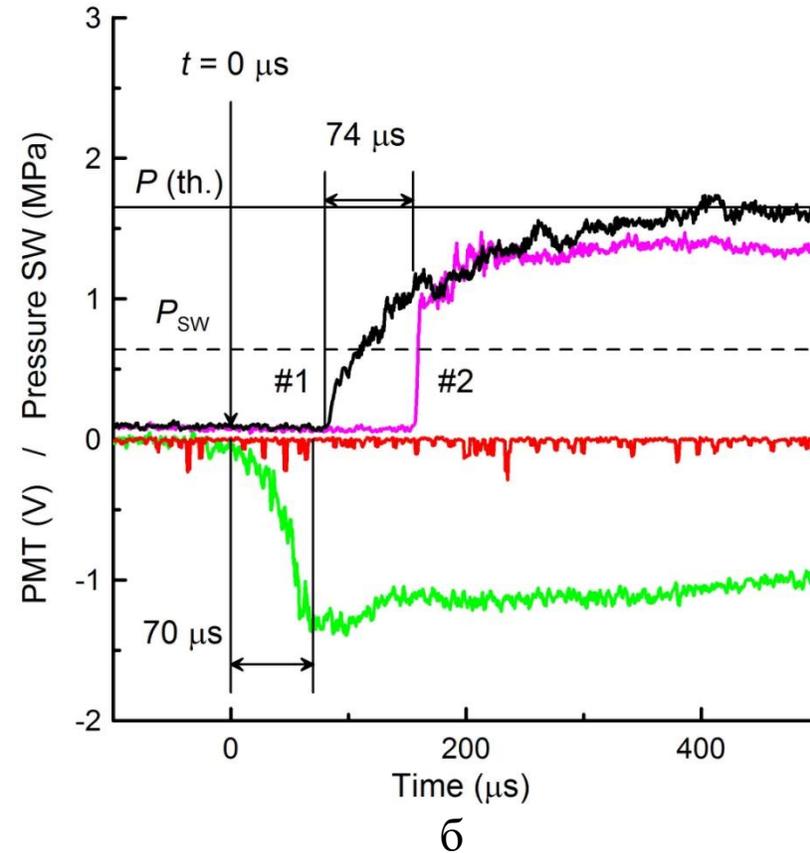
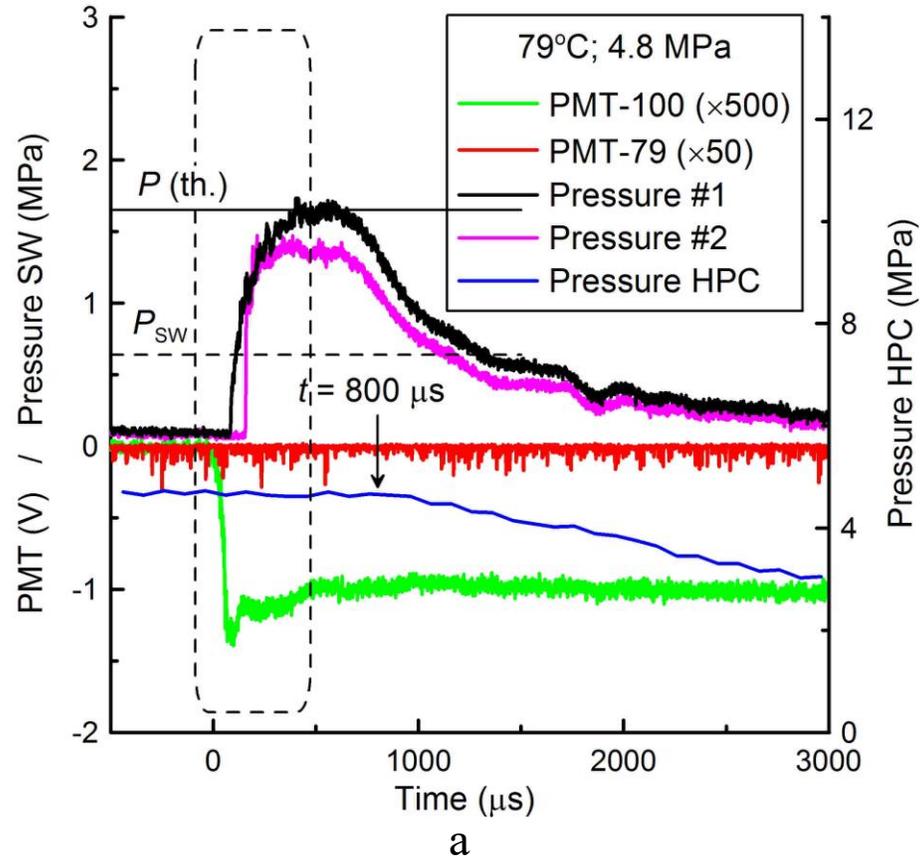
# **Истечение в канал диаметром 18 мм**

# Эксперимент с горением в канале 18 мм



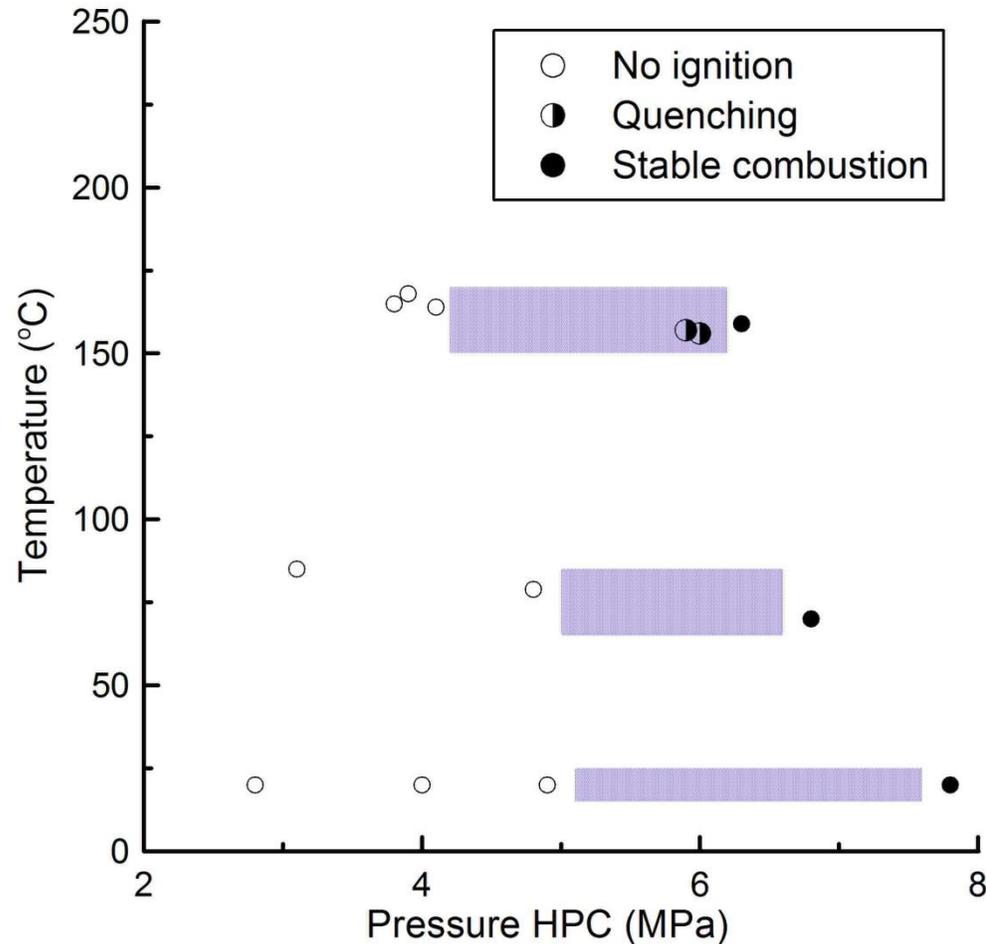
В обычном масштабе (а), в увеличенном масштабе (б)

# Эксперимент без горения в канале 18 мм



В обычном масштабе (а), в увеличенном масштабе (б)

# Условия воспламенения импульсной струи водорода при истечении в канал диаметром 18 мм

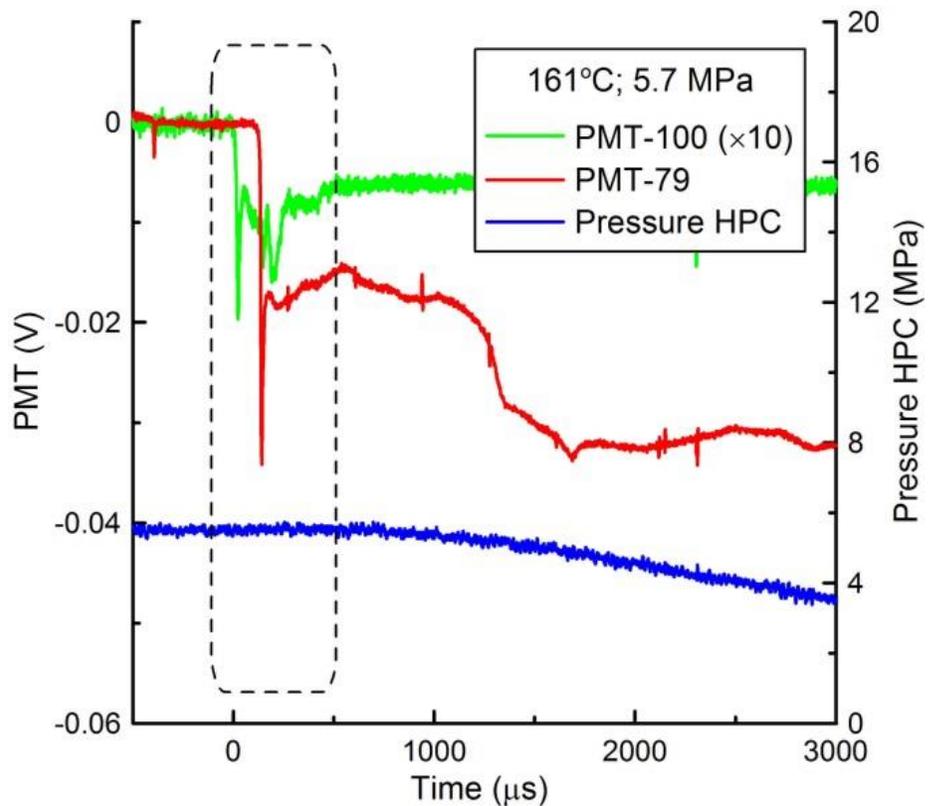


- Воспламенение наблюдалось при давлениях выше 6,1 МПа.
- Повышение температуры на 80°C снижает порог воспламенения на 10–15%.

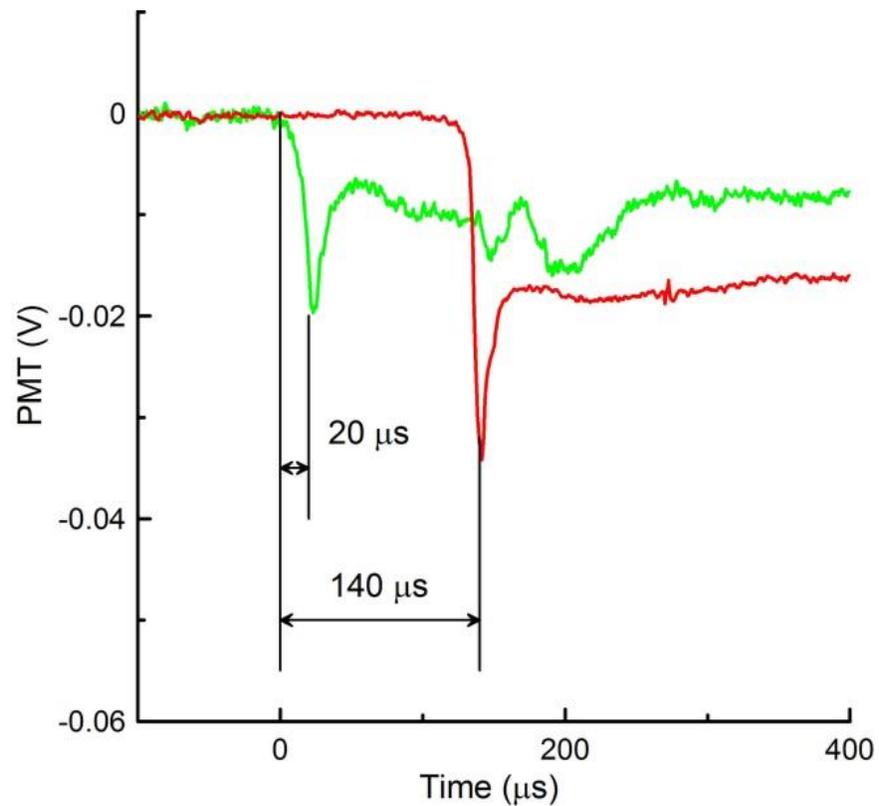


# **Истечение в канал диаметром 10 мм**

# Эксперимент с горением в канале 10 мм



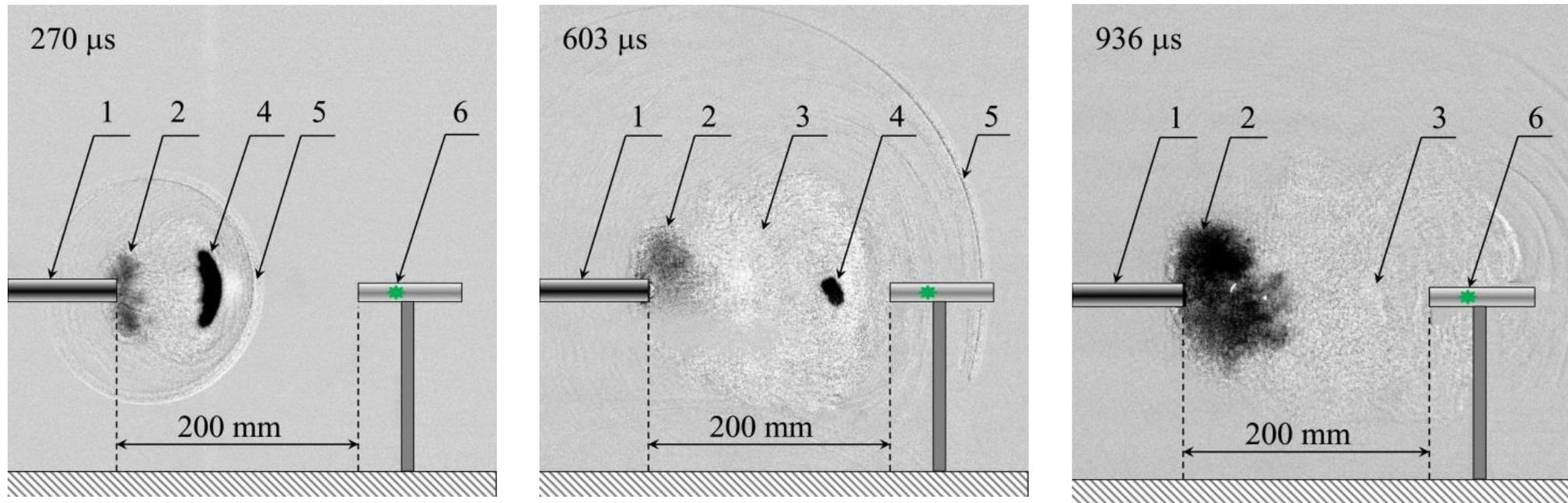
а



б

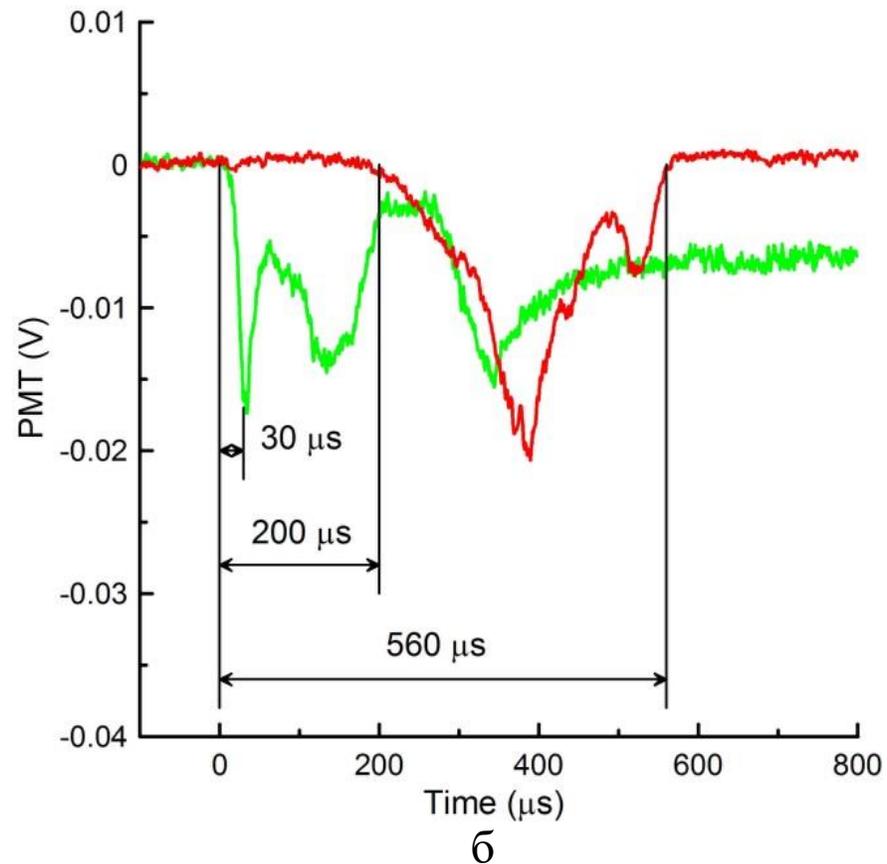
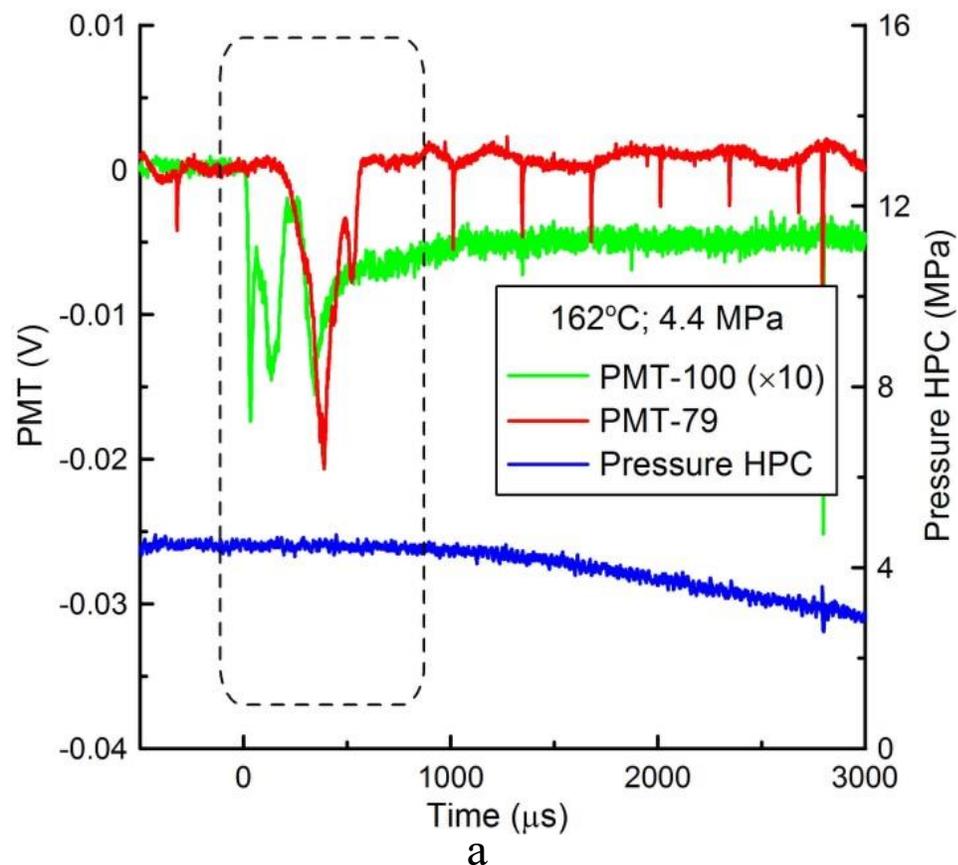
Осциллограммы сигналов фотоэлектронных умножителей и датчика давления в камере высокого давления (а), в увеличенном временном масштабе (б).

# Теневые фотографии импульсной струи водорода при горении



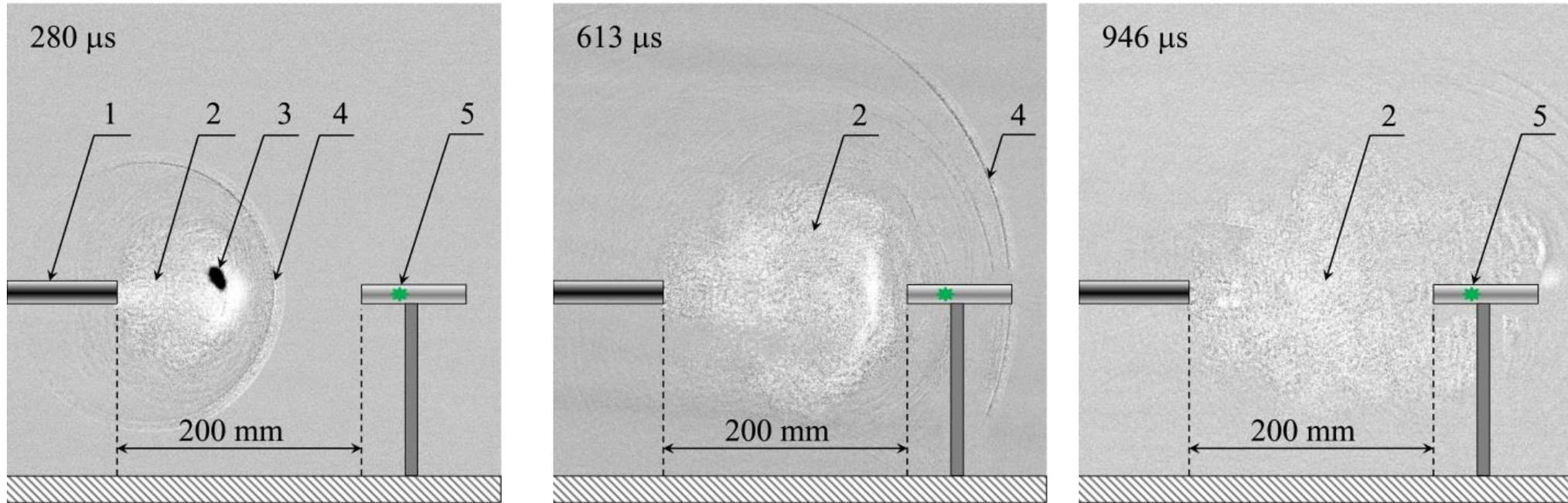
1 – канал; 2 – факел на срезе канала; 3 – газ, истекающий из канала; 4 – горение на контактной поверхности водорода и воздуха; 5 – ударная волна; 6 – светодиод. Начальное давление водорода 5.7 МПа, начальная температура водорода 161°C.

# Эксперимент с гашением в канале 10 мм



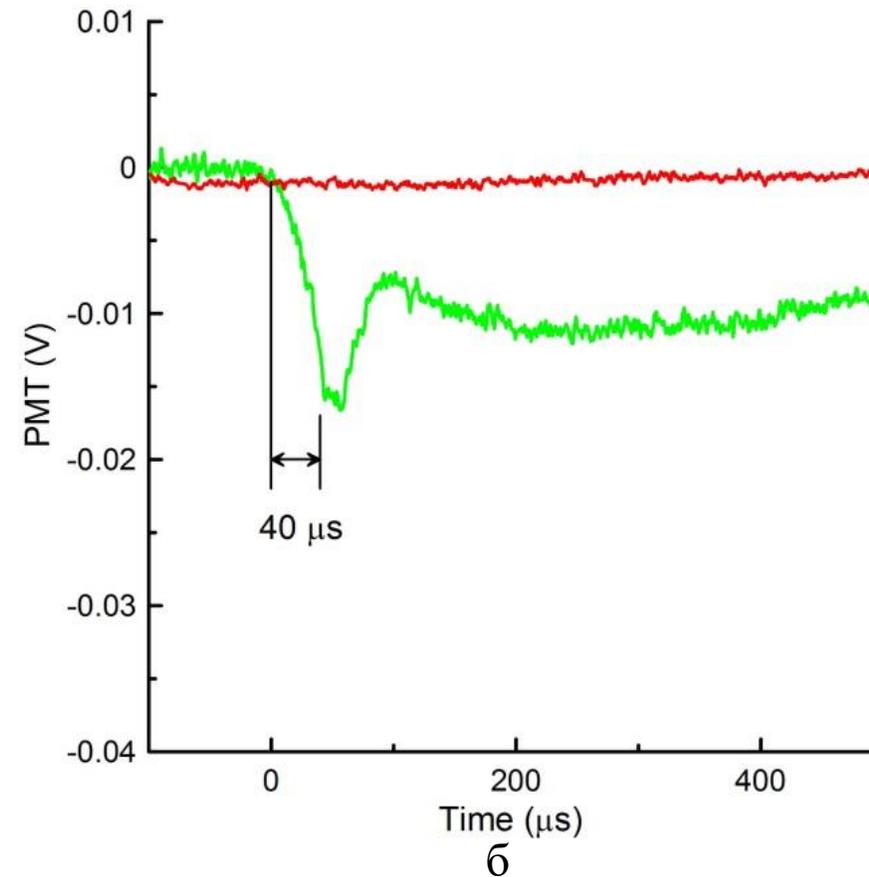
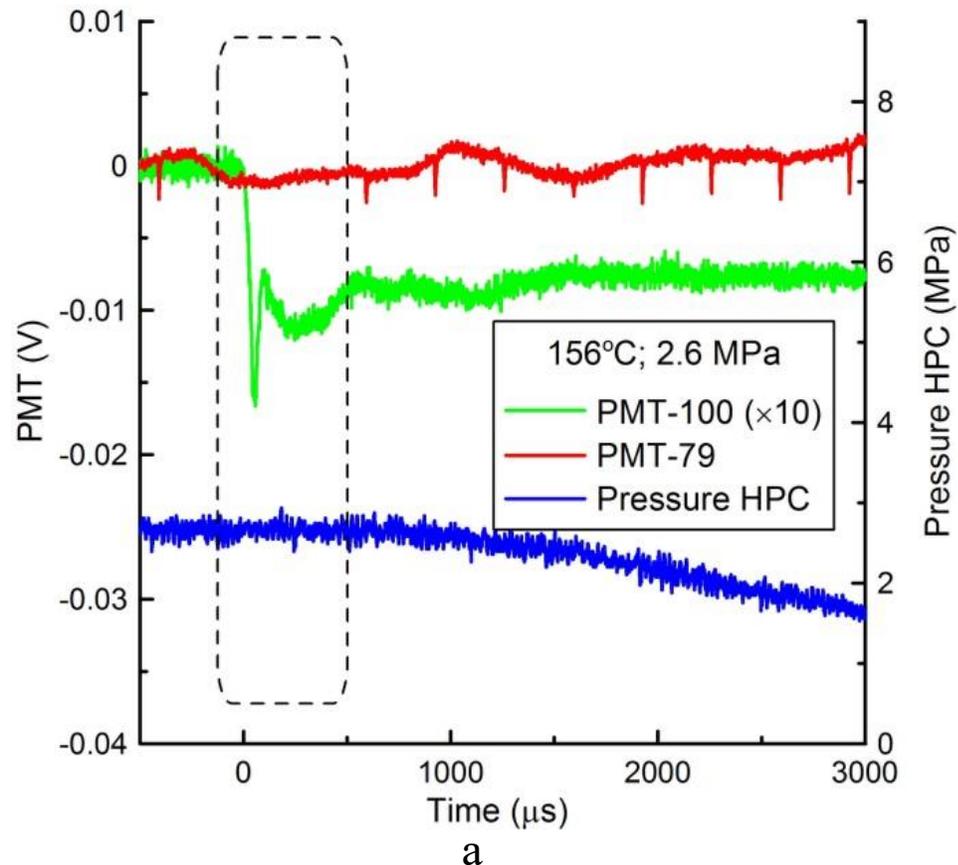
Осциллограммы сигналов фотоэлектронных умножителей и датчика давления в камере высокого давления (а), в увеличенном временном масштабе (б).

# Теневые фотографии импульсной струи водорода при гашении воспламенения



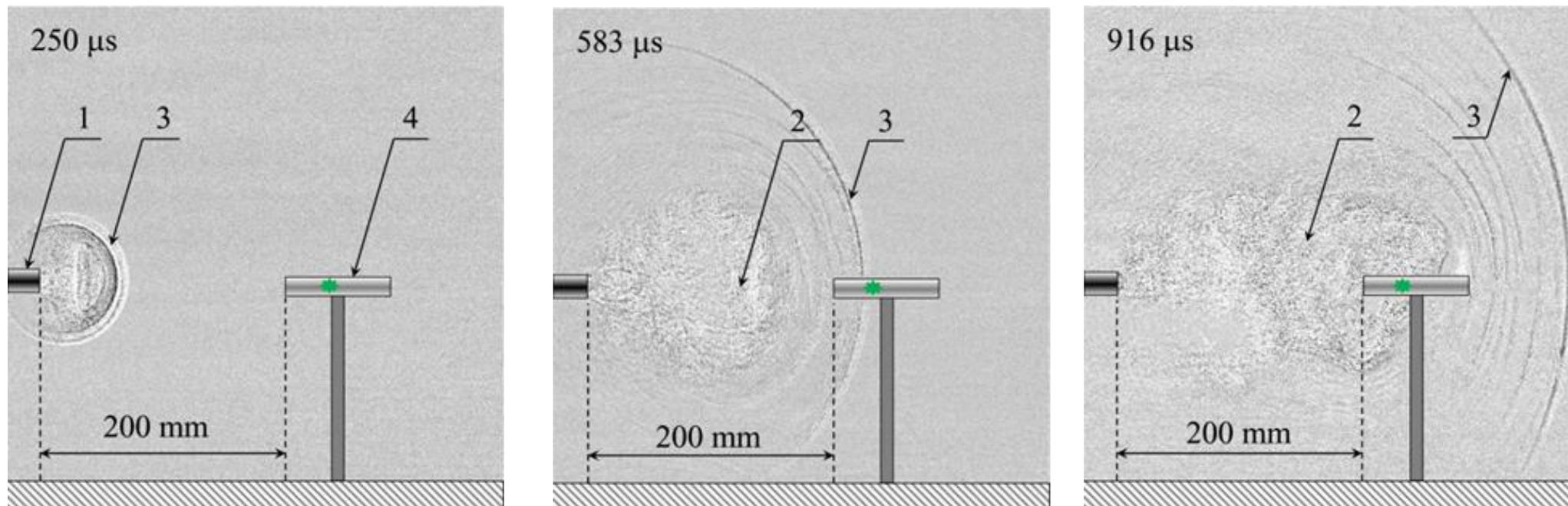
1 – канал; 2 – газ, истекающий из канала; 3 – горение на контактной поверхности водорода и воздуха; 4 – ударная волна; 5 – светодиод. Начальное давление водорода 4.4 МПа, начальная температура водорода 162°C.

# Эксперимент без горения в канале 10 мм



Осциллограммы сигналов фотоэлектронных умножителей и датчика давления в камере высокого давления (а), в увеличенном временном масштабе (б).

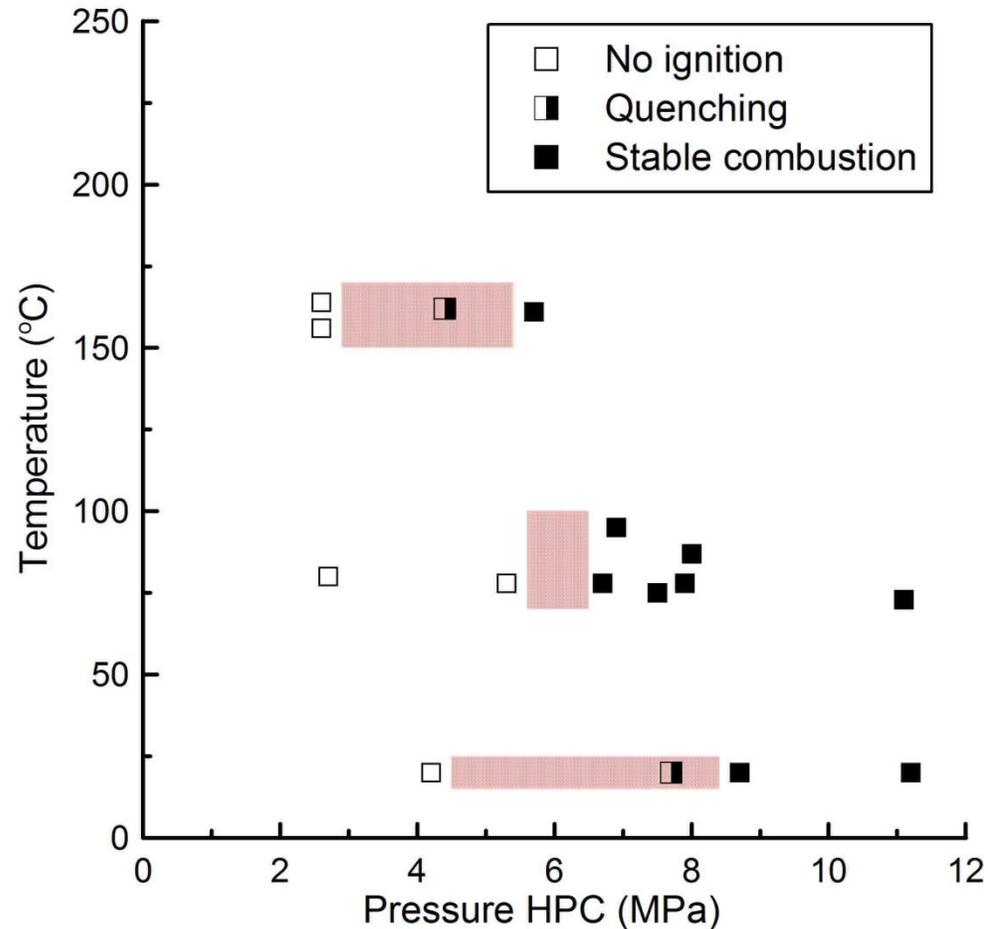
# Теневые фотографии импульсной струи водорода при отсутствии горения



1 – канал; 2 – газ, истекающий из канала; 3 – ударная волна; 4 – светодиод.

Начальное давление водорода 2.6 МПа, начальная температура водорода 156°C.

# Условия воспламенения импульсной струи водорода при истечении в канал диаметром 10 мм

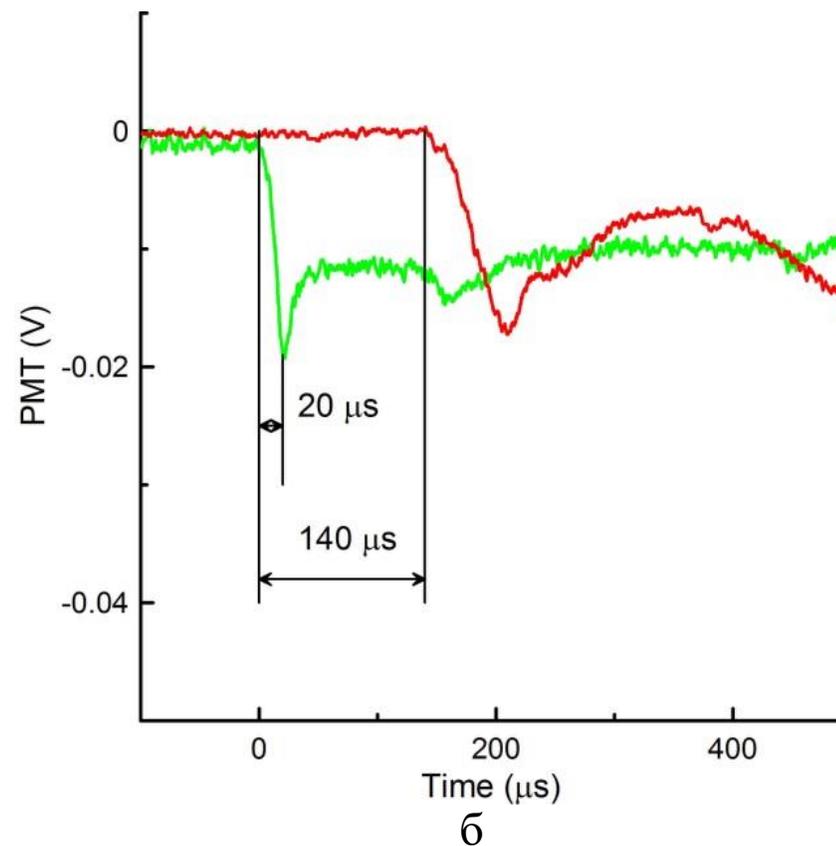
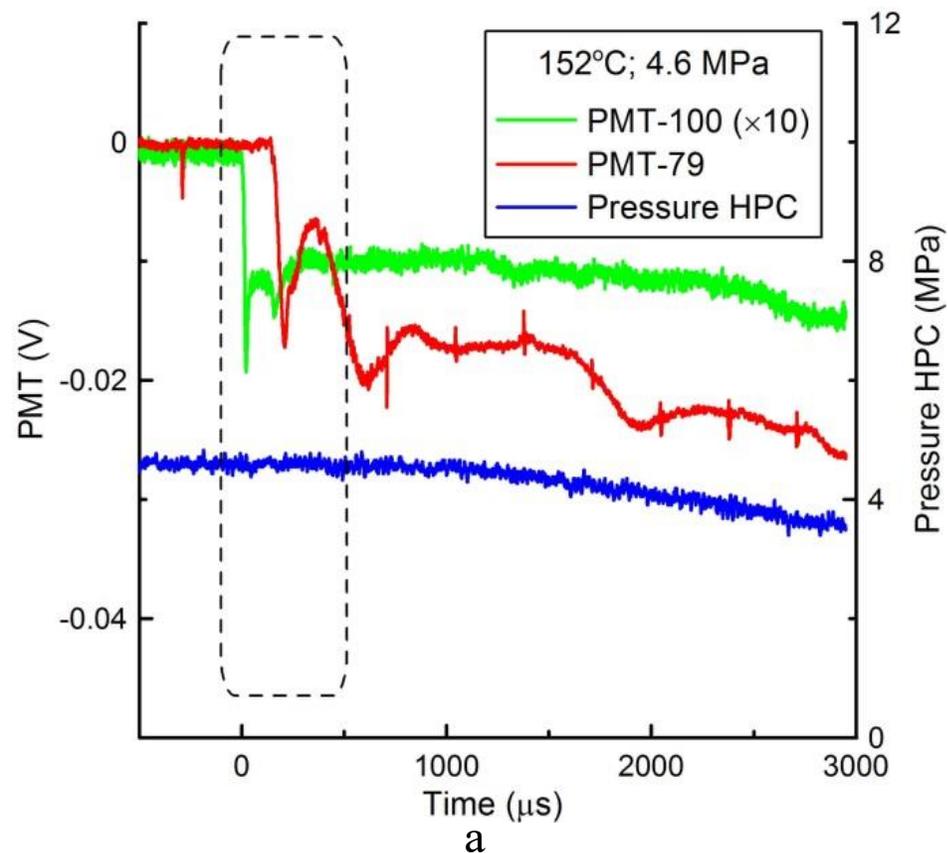


- Устойчивое горение наблюдалось при давлениях от 5,6 МПа.
- Гашение происходило в диапазоне 4,4–7,8 Мпа
- При давлениях ниже 4 МПа горения не было зарегистрировано



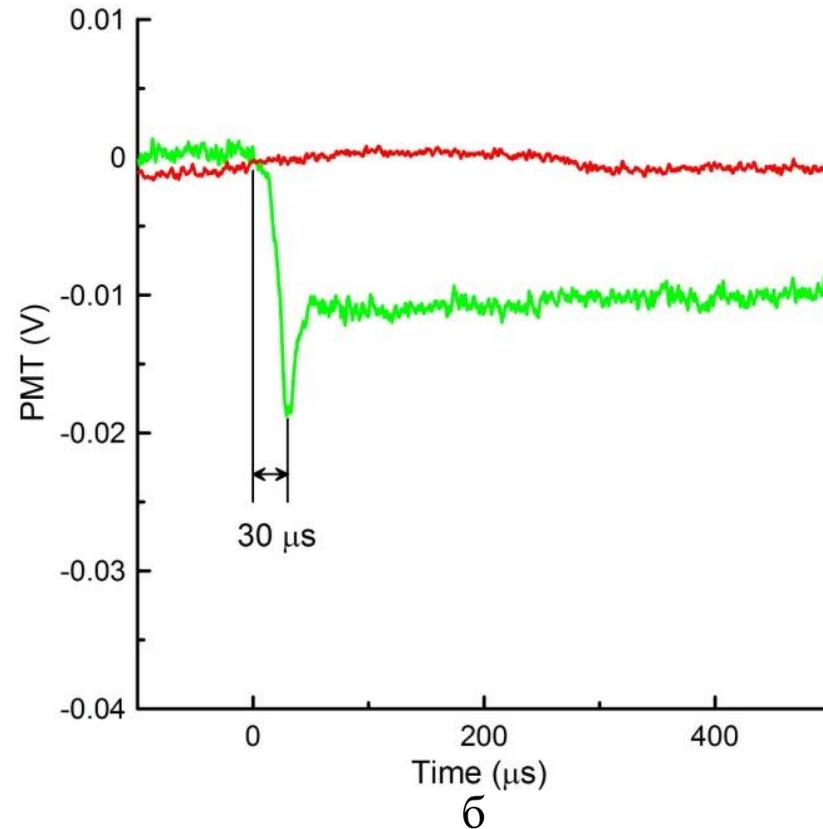
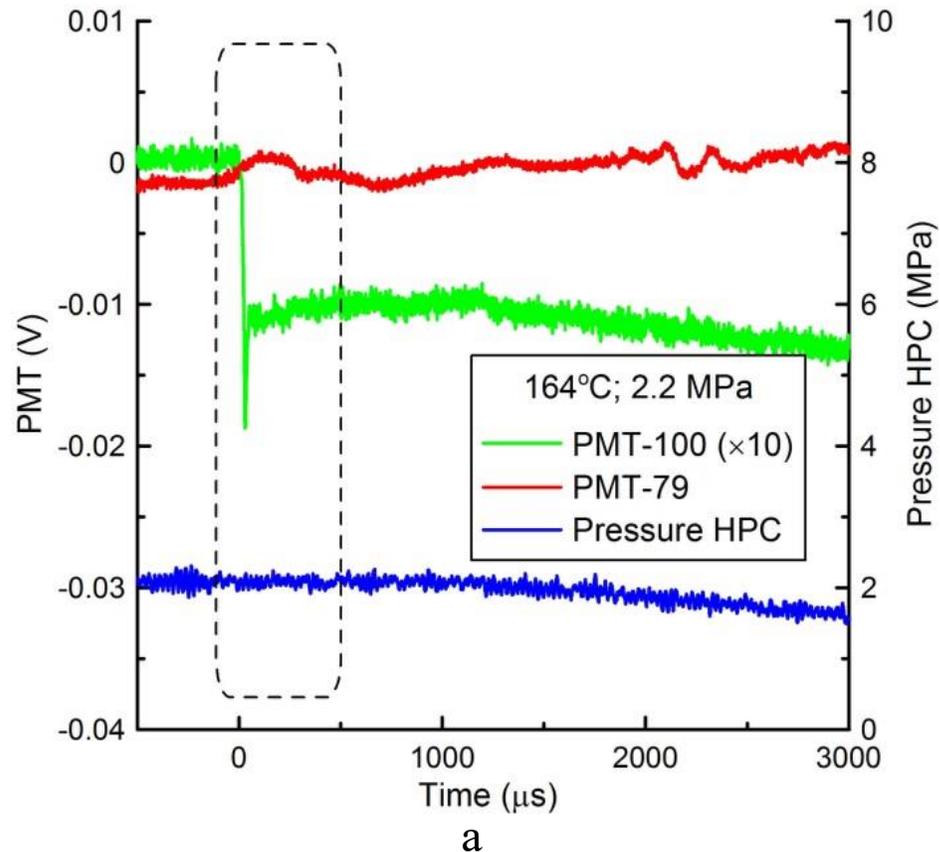
# **Истечение в канал диаметром 6 мм**

# Эксперимент с горением в канале 6 мм



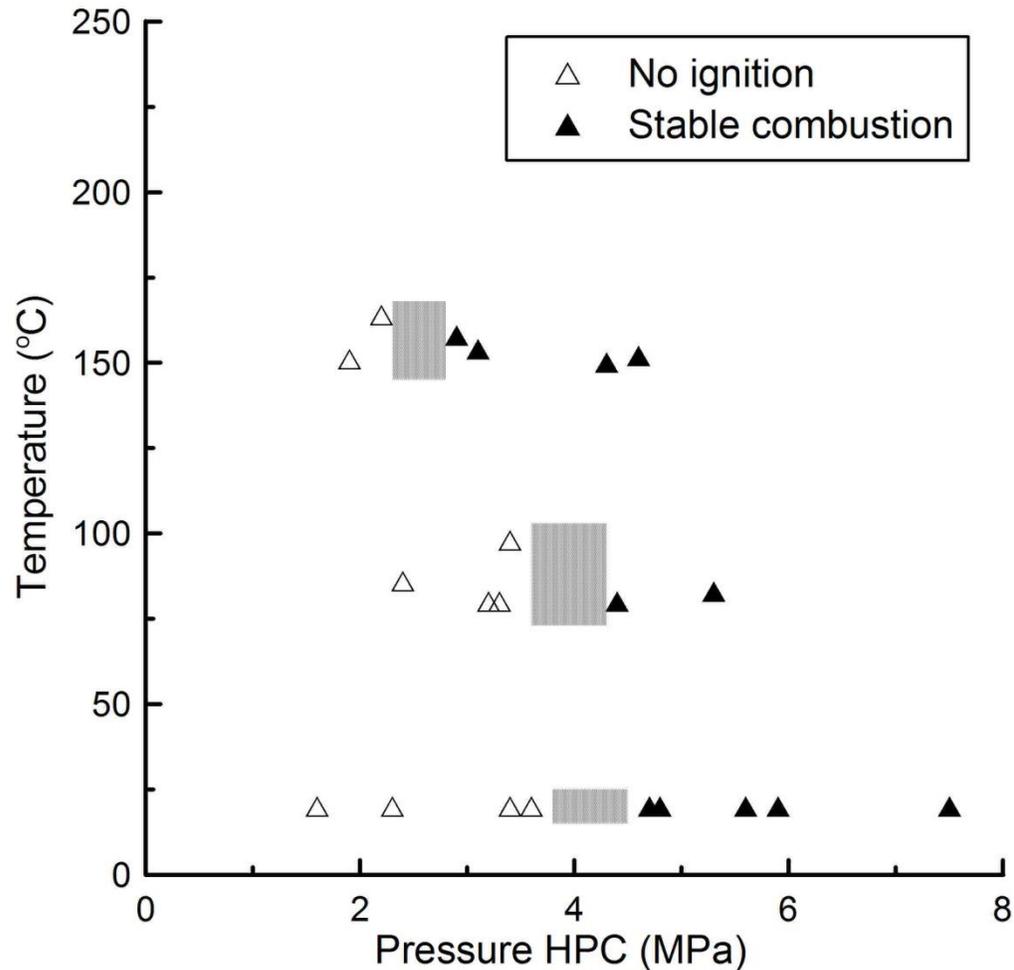
Осциллограммы сигналов фотоэлектронных умножителей и датчика давления в камере высокого давления (а), в увеличенном временном масштабе (б). Эксперимент с горением

# Эксперимент без горения в канале 6 мм



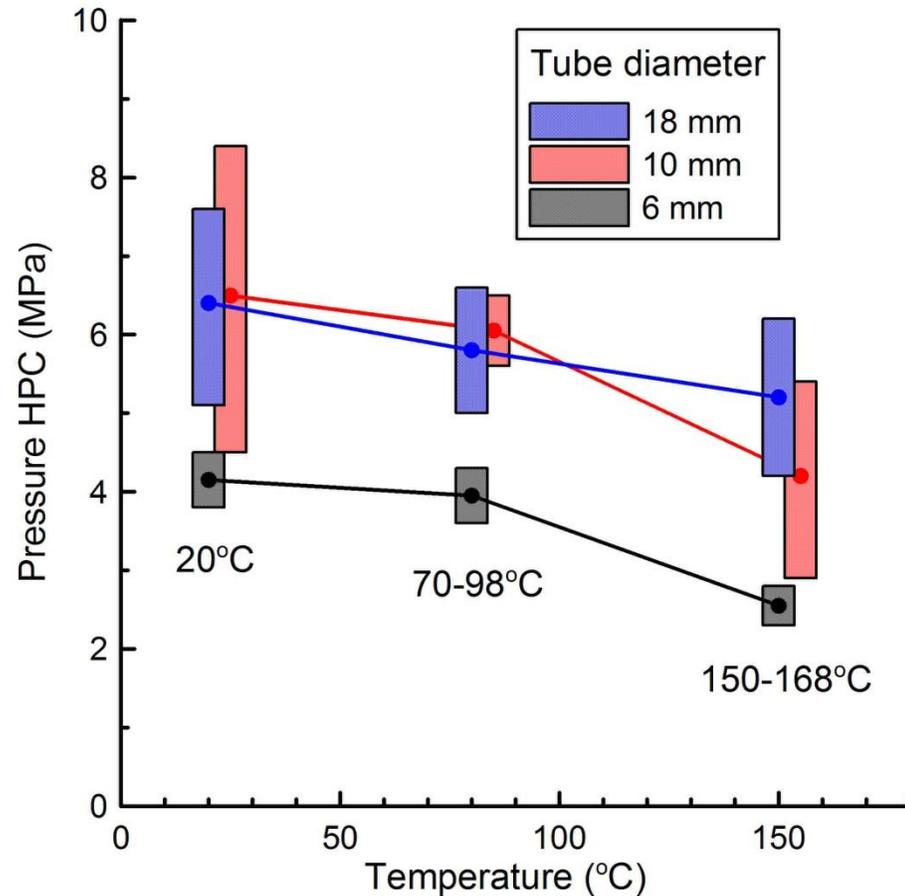
Осциллограммы сигналов фотоэлектронных умножителей и датчика давления в камере высокого давления (а), в увеличенном временном масштабе (б).

# Условия воспламенения импульсной струи водорода при истечении в канал диаметром 6 мм



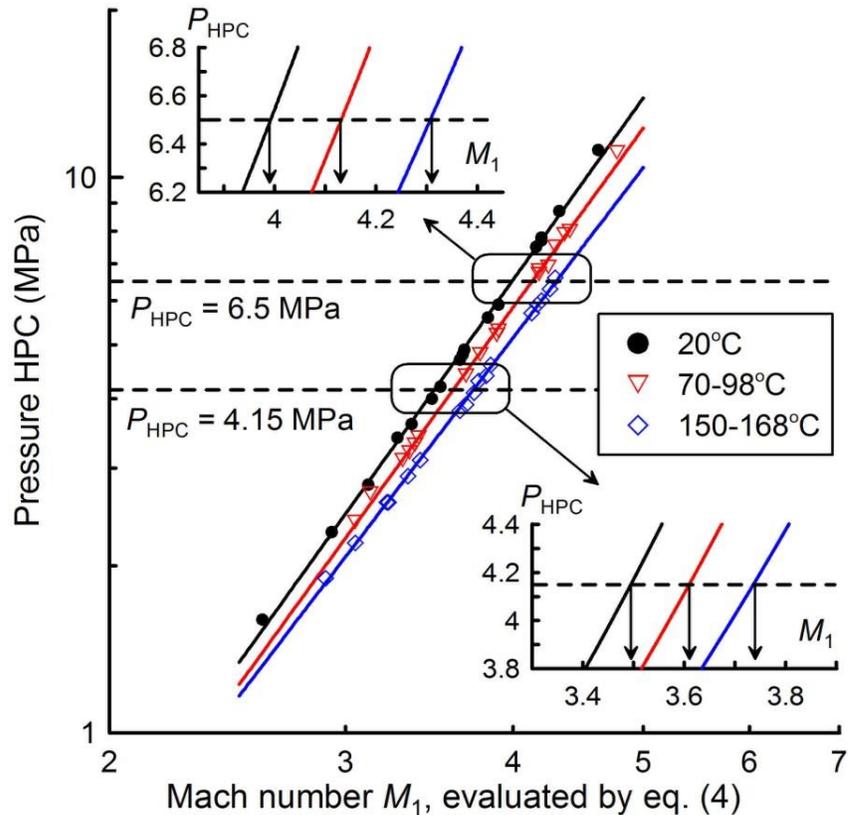
- Самовоспламенение при давлениях выше 4,6 МПа.
- Отсутствие воспламенения при давлениях меньше 2,4 МПа
- Влияние температуры наиболее выражено: повышение температуры при фиксированном давлении может привести к смене режима горения.

# Предельные значения давления воспламенения импульсной струи водорода при истечении в разные каналы



- повышение температуры может приводить к снижению минимального давления воспламенения.
- максимальный эффект достигается для меньшего отверстия, равного 6 мм.

# Влияние начального давления $P_{\text{HPC}}$ и температуры сжатого водорода на числа $M_1$ ударной волны



## Повышение температуры водорода:

- повышению скорости звука
- повышению скорости истечения
- повышению числа Маха ударной волны в воздухе,
- повышению температуры ударно сжатого воздуха.
- сокращению задержки воспламенения

$$\frac{P_{\text{HPC}}}{P_1} = \frac{2\gamma M_1 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \left[ 1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \frac{a_{\text{air}}}{a_{\text{H}_2}} \left( M_1 - \frac{1}{M_1} \right) \right]^{-\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}$$

## ВЫВОДЫ

- Определены условия реализации режимов устойчивого горения, гашения и отсутствия воспламенения при внезапном истечении в канал .
- При нагреве водорода до  $100^{\circ}\text{C}$  температура воздуха повышается на 5.5%, а плотность на 1.6%. При нагреве водорода до  $150^{\circ}\text{C}$  – на 12.8% и 3.5% соответственно.
- Повышение, как температуры, так и плотности смеси приводит к сокращению задержки воспламенения, в связи с этим, при нагреве водорода до  $150^{\circ}\text{C}$ , давление, требуемое для самовоспламенения, снижается до 1.5 раз.