



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОПРОСОВ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА АЭС

Е.В. Безгодов
И.В. Лавренюк
В.А. Симоненко
С.Д. Пасюков
М.В. Никифоров
В.П. Бакаев
В.Н. Федюшкин
И.А. Попов

Цель доклада



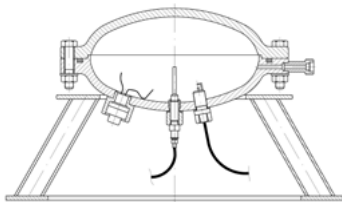
- Продемонстрировать возможности РФЯЦ-ВНИИТФ в проведении экспериментов и испытаний, направленных на исследование вопросов заполнения газами моделей помещений и распространения фронтов горения в них;
- Продемонстрировать преимущества поликарбонатной конструкции как установки, предназначенной для исследования вопросов водородной безопасности (ВБ);
- Представить результаты экспериментов на поликарбонатной установке;
- Указать направления для будущих проектов.

Введение

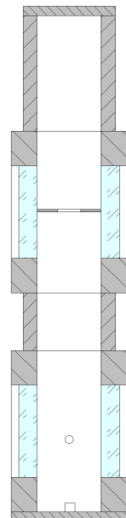
В 2015-2016 гг. в РФЯЦ-ВНИИТФ проведены эксперименты, направленные на обоснование водородной безопасности на АЭС с ВВЭР*

Четыре типа экспериментальных установок

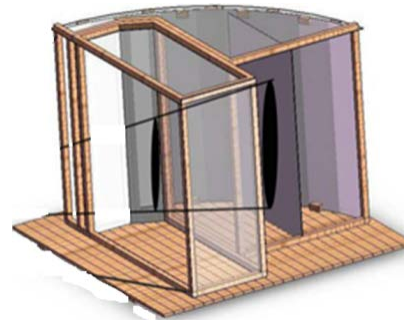
Установка по определению концентрационных пределов



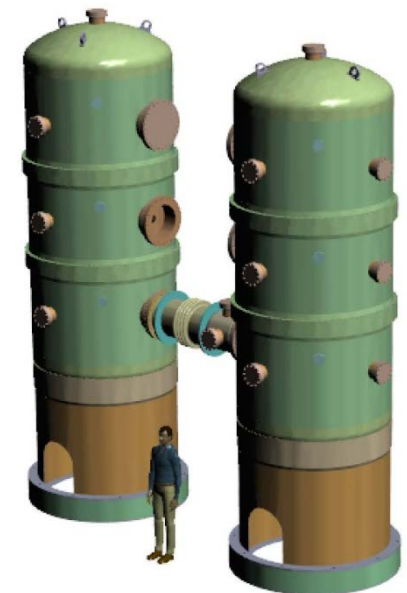
МУТ [1]



Поликарбонатная
Установка
(БМ-Л)

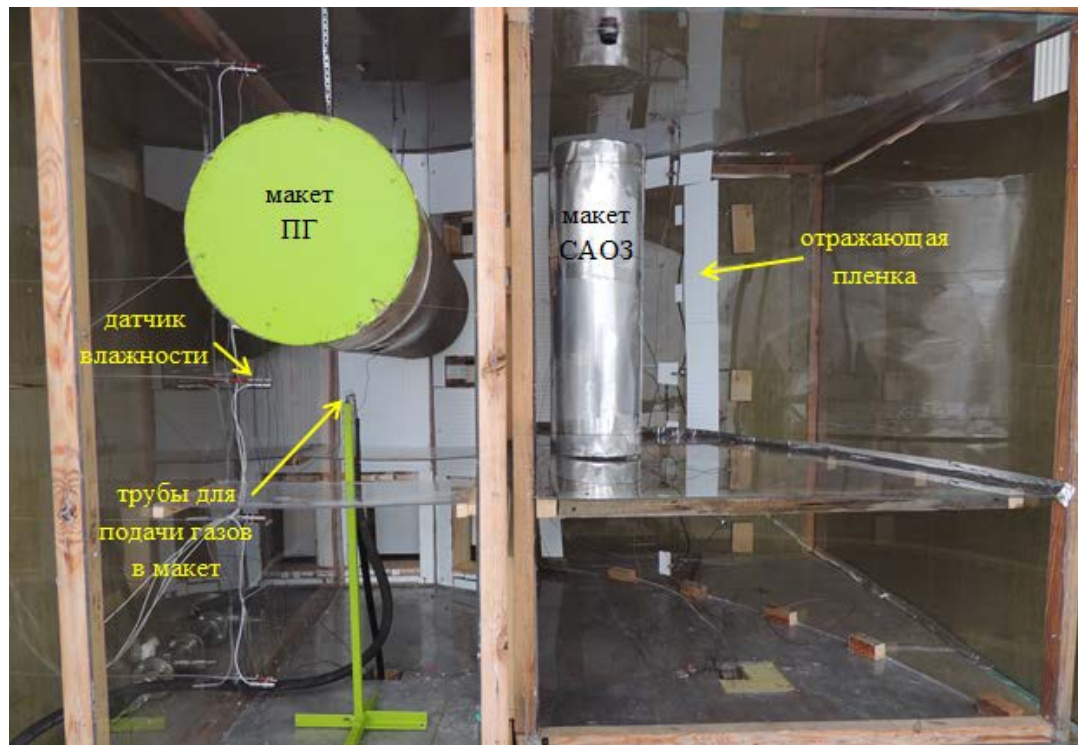


Прочная установка
(БМ-П)



* договор №6.030/2830/13108/269

Конструкция поликарбонатной установки



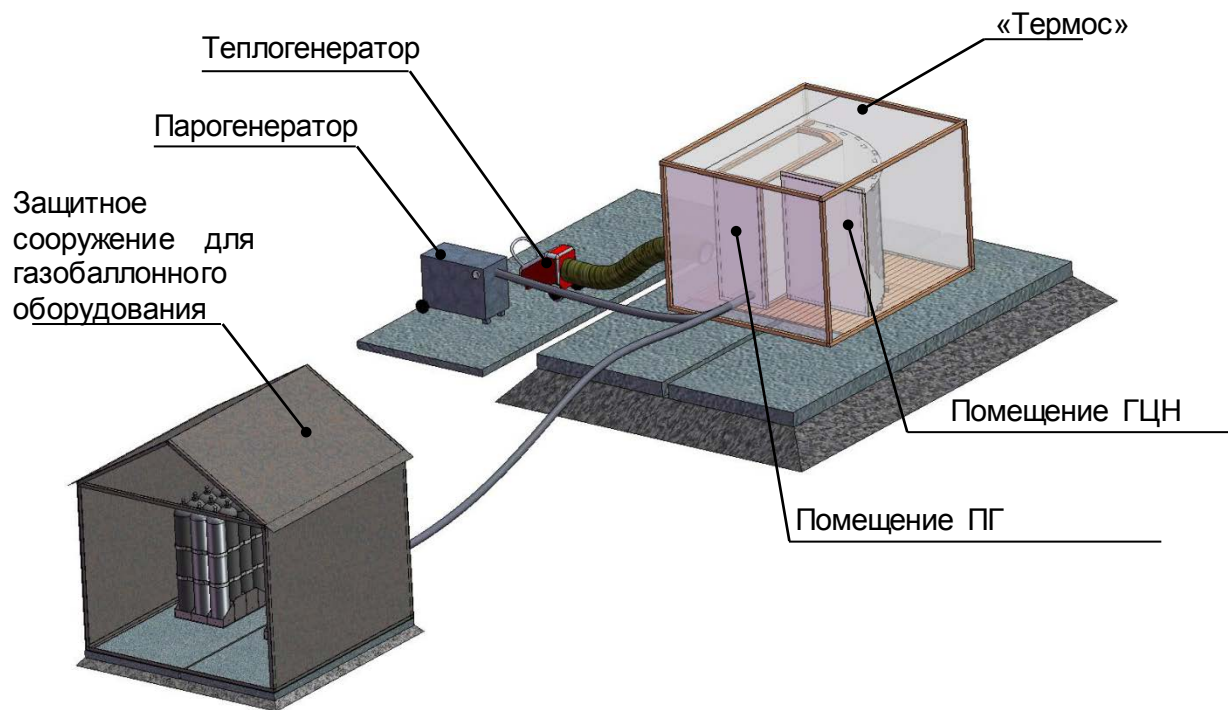
Давление: $P \approx 0,1$ МПа
Температуры: $0 \leq T \leq 150$ °С

Максимальная молярная
доля водорода: до 60%
Расход водорода:
0,02 г/с до 1 г/с

Максимальная молярная
доля водяного пара: $\approx 80\%$
Расход водяного пара:
0,1 г/с до 10 г/с

- Объем ~ 4 м³;
- Деревянный каркас;
- Материал стенок – поликарбонат;
- В полу макета отверстия для связи с атмосферой.

Расположение установки



Внешний вид экспериментальной площадки

Возможности
РФЯЦ-ВНИИТФ:

Специальная площадка
для проведения
экспериментов со
взрывными газами

Экспериментаторы
находятся в защищенном
каземате

Достоинства поликарбонатной конструкции



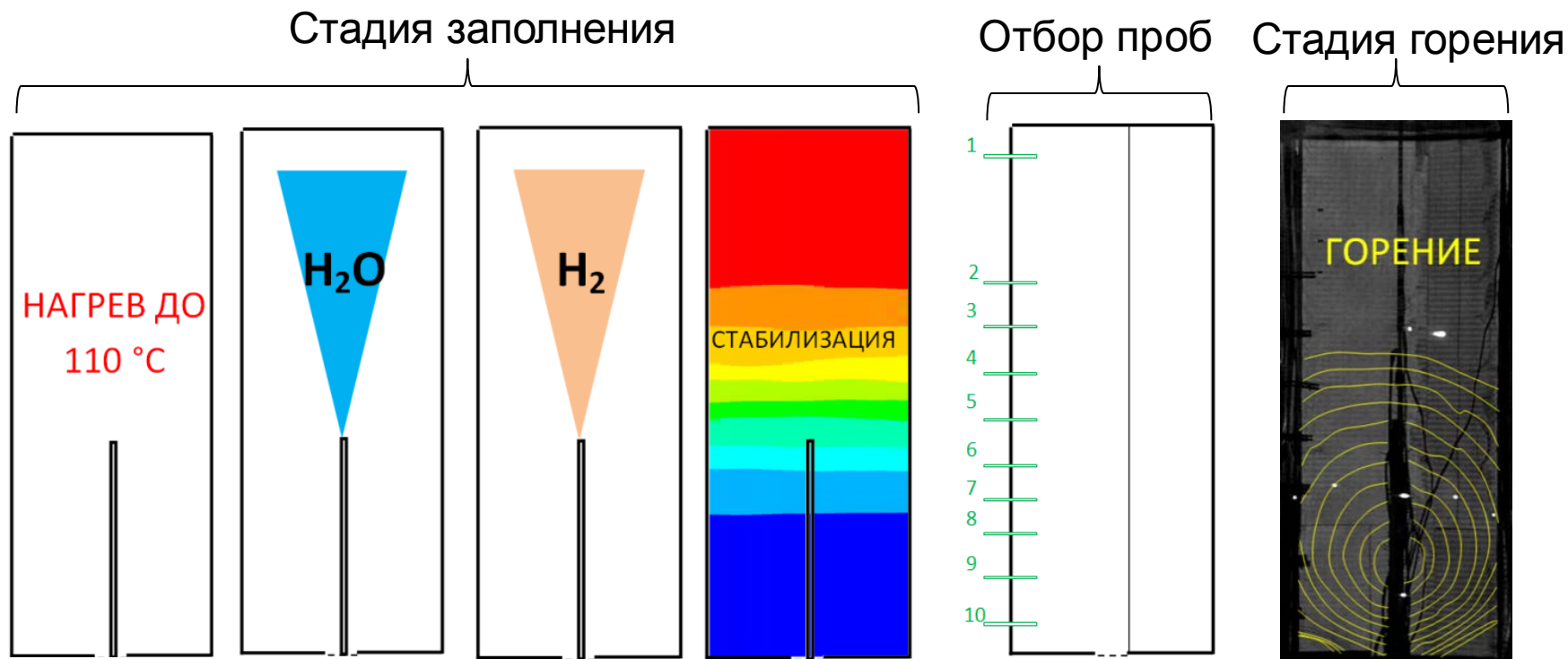
Достоинства:

- сравнительно низкая стоимость конструкции и эксперимента;
- простота сборки;
- возможность геометрически скопировать прототип;
- облегченный монтаж датчиков внутри макетов;
- прозрачные стенки (визуальное наблюдение за процессами).

Ограничения:

- $P \approx 0,1$ МПа, $T \leq 150$ °С;
- «запотевание» поликарбоната при моделировании процессов, связанных с конденсацией водяного пара на стенках;
- частичная разрушаемость макета, сложности с соблюдением герметичности.

Порядок проведения эксперимента

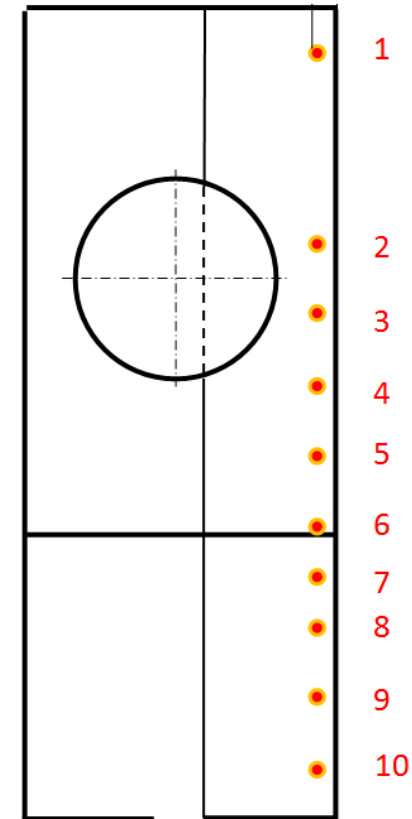
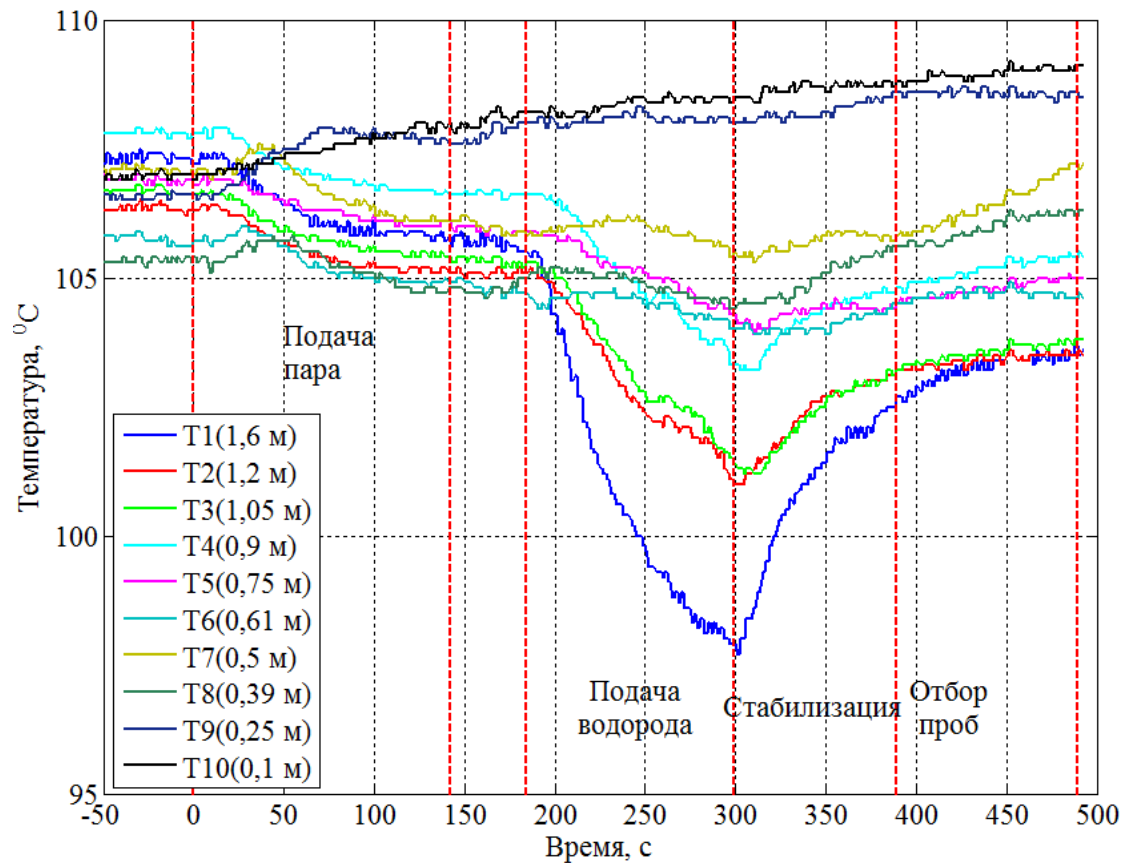


Стадии проведения эксперимента по программе БМ-Л

Возможна как раздельная, так и совместная подача водяного пара и водорода

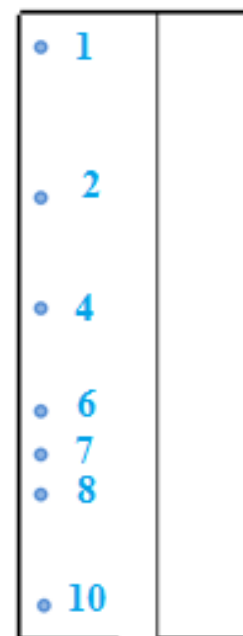
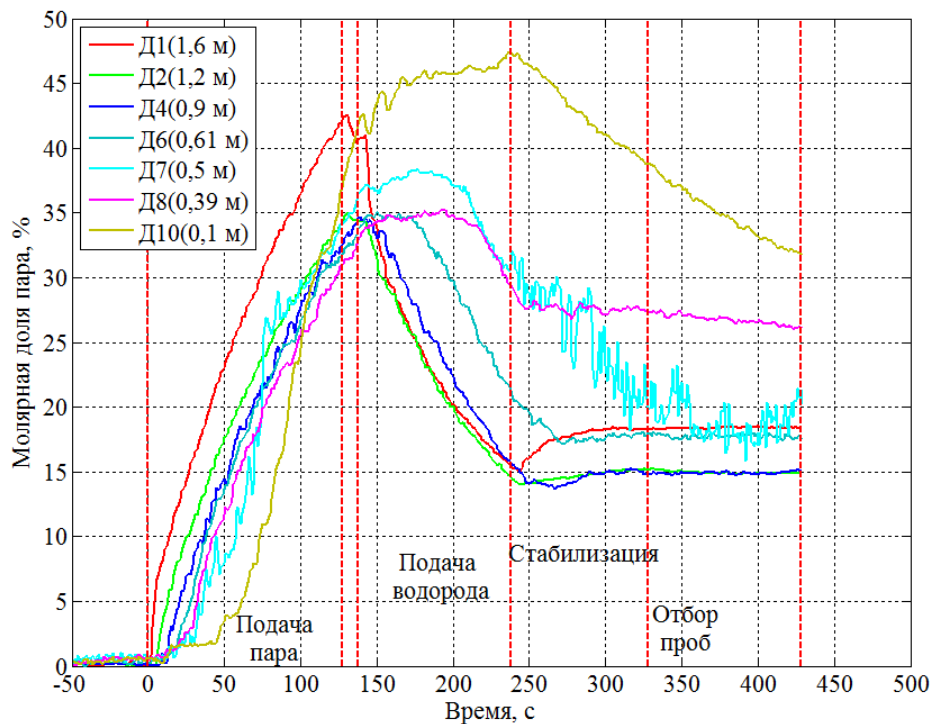
Методики регистрации

Измерение температуры: термодатчики (36 шт.)



Методики регистрации

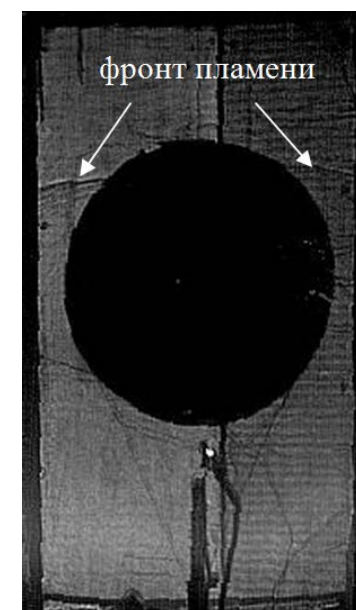
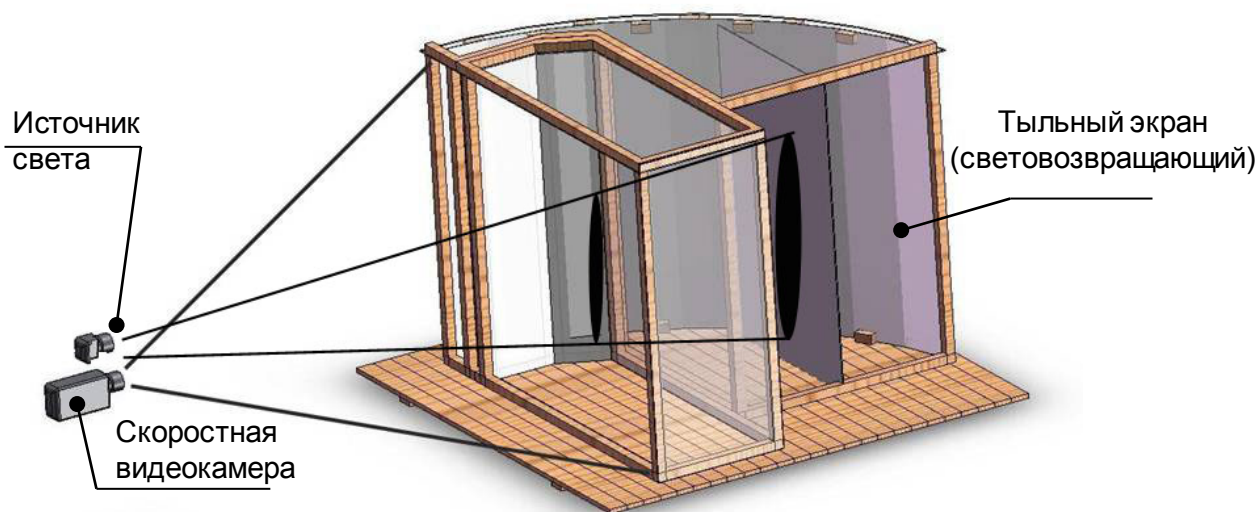
Измерение относительной влажности: датчики ВНИИТФ



- Давление до 2,5 МПа
- Температура до 190 °С

Методики регистрации

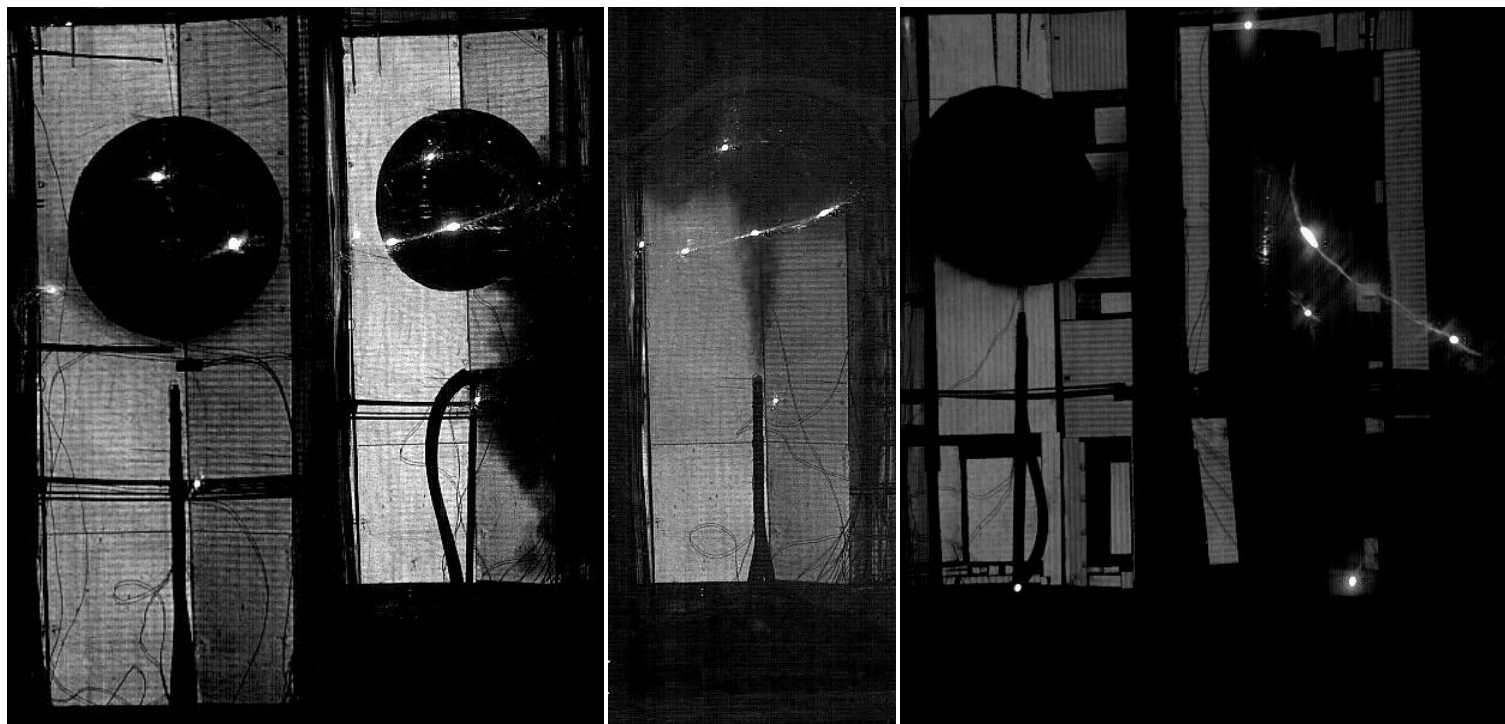
Видеорегистрация процессов распространения фронта горения



Видеокадр с фронтом пламени в эксперименте программы БМ-Л

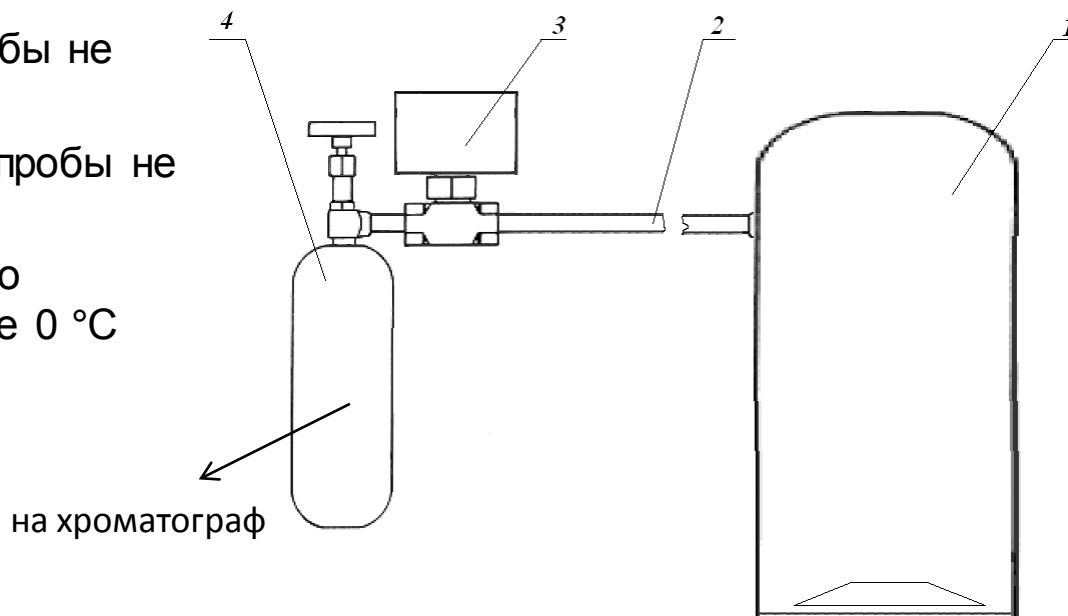
Методики регистрации

Визуализация истечения газа напылением частицами оксида титана (1 мкм) + видеорегистрация (теневой метод)



Регистрация газового состава

- Давление отбираемой пробы не более 1 МПа
- Температура отбираемой пробы не более 900 °С
- Температура воздуха около баллона и клапана не ниже 0 °С



В настоящий момент:

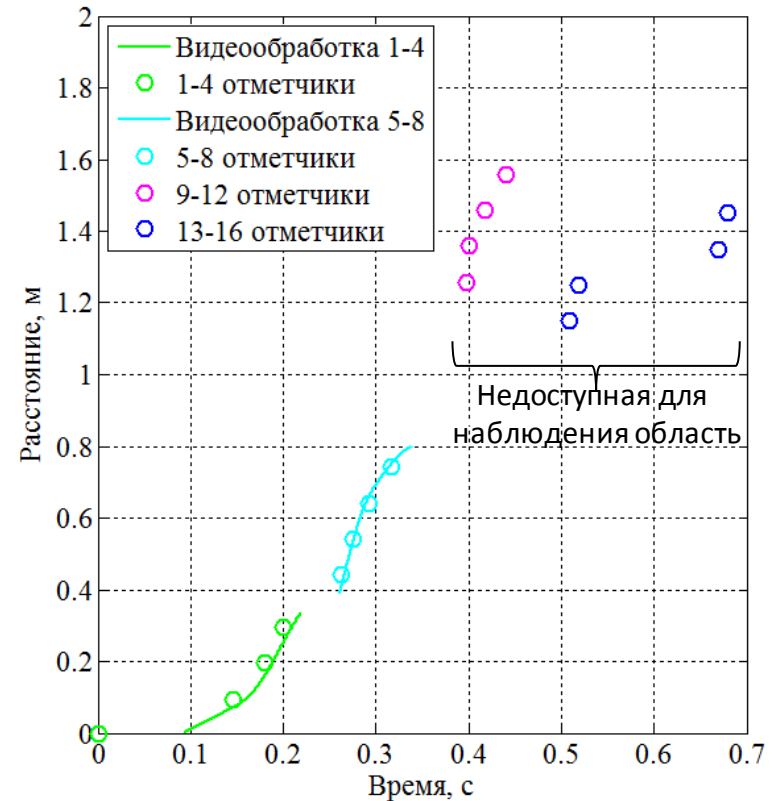
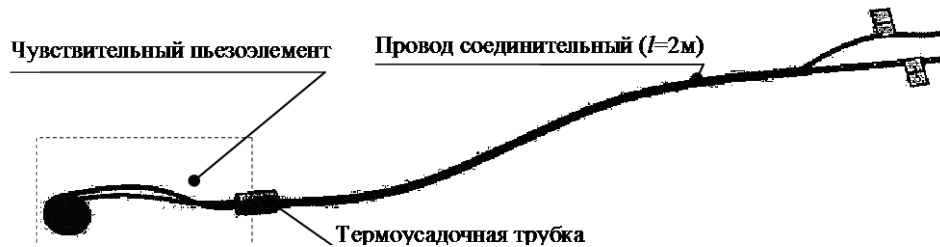
«непрерывно-дискретный» отбор в хроматограф (период 0,5÷1 мин)

1 –макет; 2 – трубопровод; 3 – электромагнитный клапан;
4 - баллон-пробоотборник

Схема отбора газовой пробы

Методики регистрации

Датчик-отметчик прохождения фронта пламени



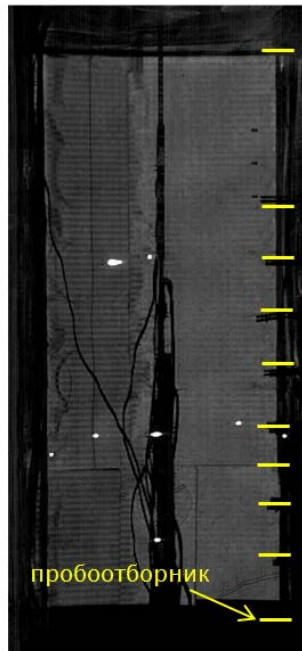
Зависимость расстояния, пройденного пламенем, от времени с начала поджига в эксперименте

Цели экспериментальной программы БМ-Л:

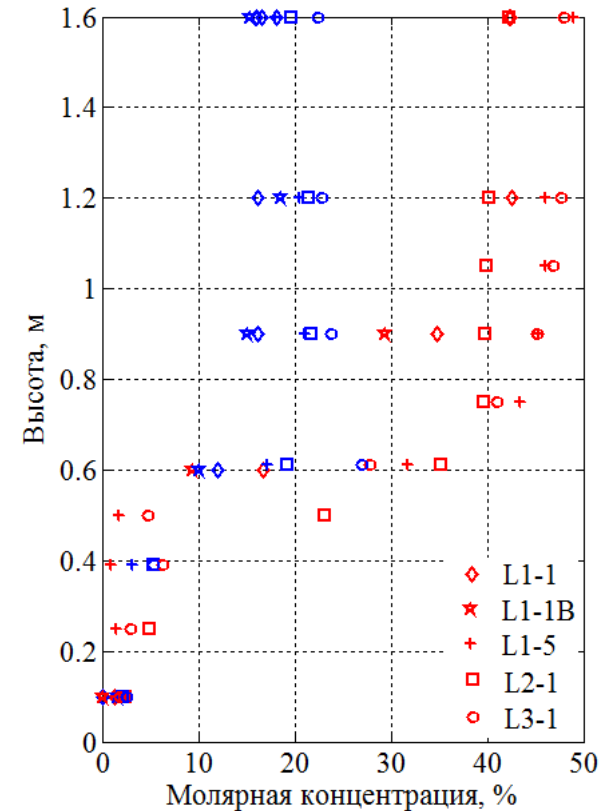
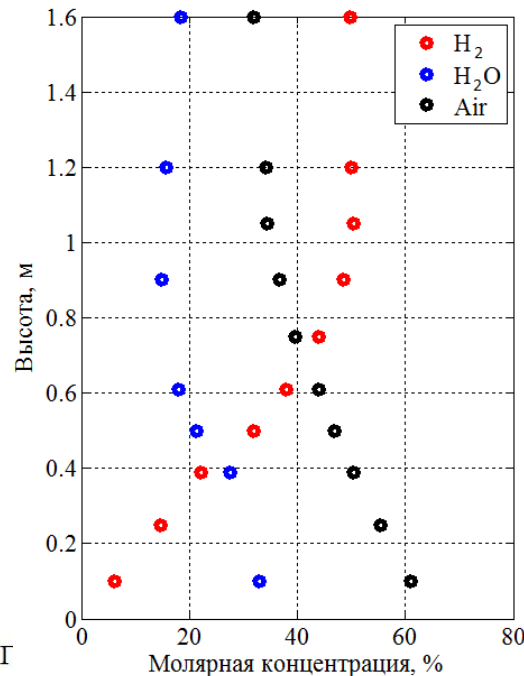
- Отработка методик для проведения экспериментов в прочной установке (БМ-П);
- Получение данных по распространению водородосодержащей парогазовой смеси (ВПГС) по макетным помещениям;
- Получение данных по распространению пламени в составах, характерных для тяжелых аварий на АЭС;
- Исследование ряда методических вопросов, связанных с особенностями помещений АЭС с ВВЭР;
- Получение экспериментальных данных, предназначенных для валидации кодов.

БМ-Л: стратификация в одиночном боксе

- Однородное «облако» сверху с макс. содержанием водорода
- Градиентная область
- Область с малым содержанием водорода внизу



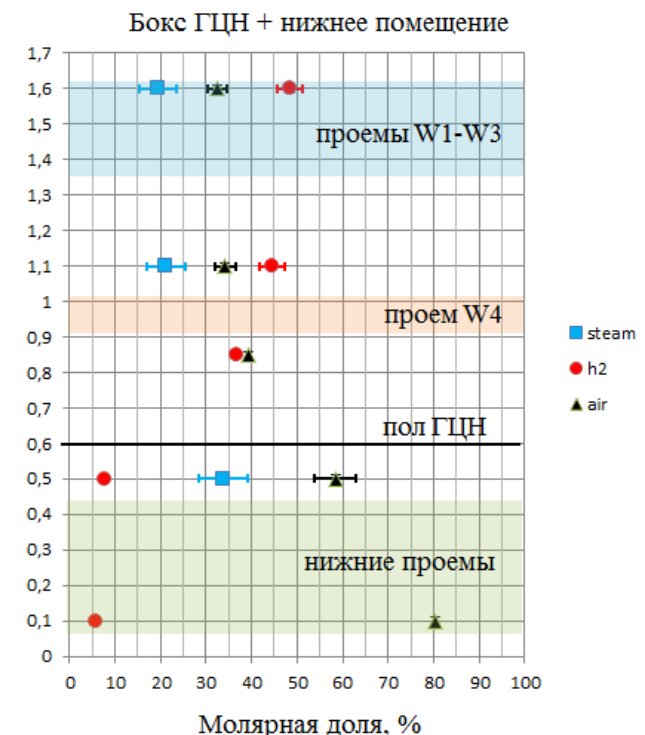
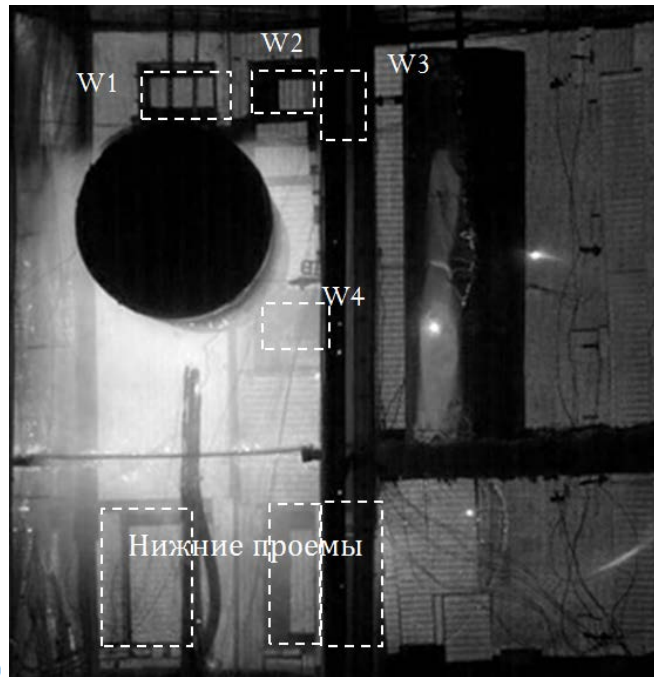
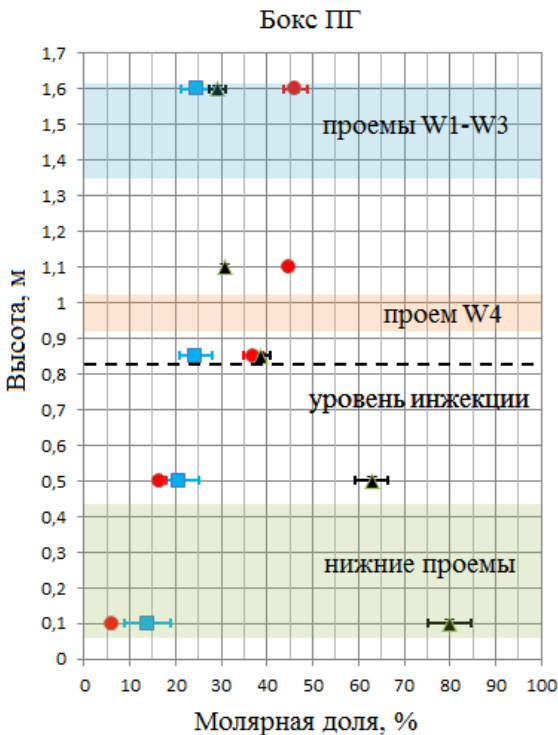
Пустой макет помещения III
вид сбоку



Результаты 5-ти экспериментов

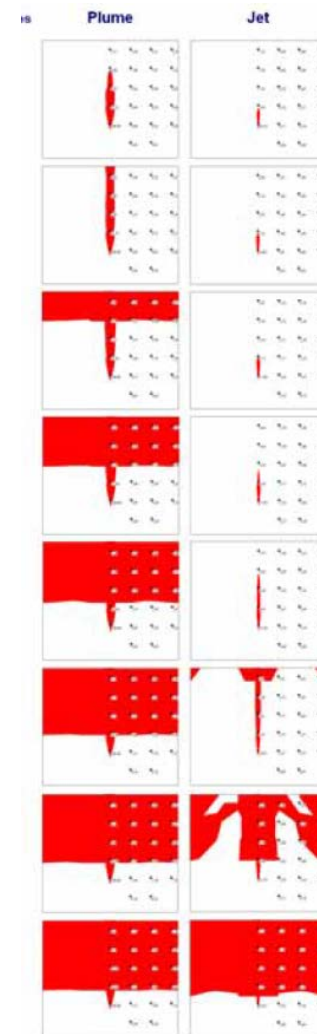
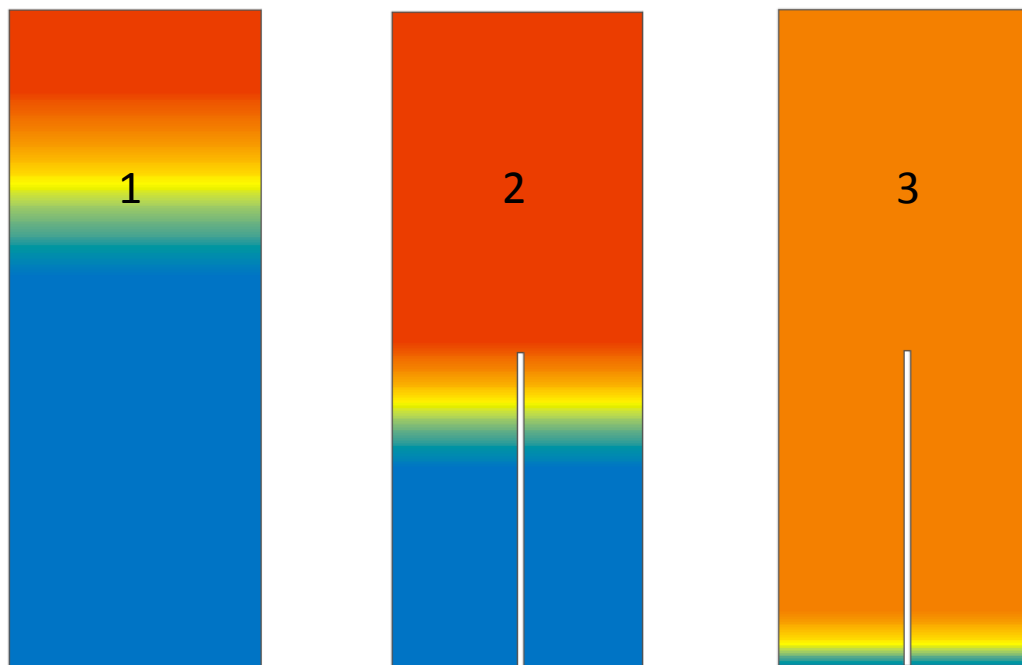
(проверка горизонтальной однородности распределения ВПГС, воспроизводимости эксперимента, разное направление струи)

- Стратификация в помещениях
- «Размытая» по высоте градиентная область
- Близкое распределение ВПГС в помещениях на уровнях проемов



Режимы заполнения газами установки

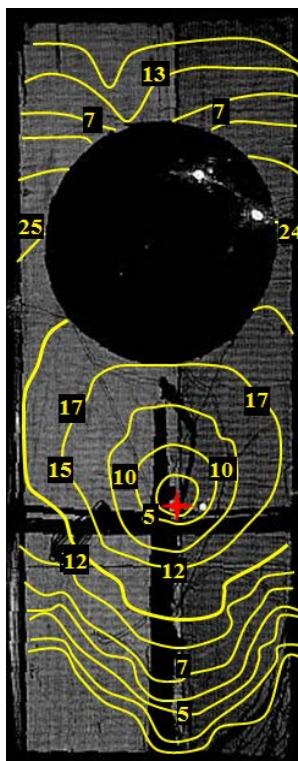
1. Стратификация (шлейфовое заполнение) – перетекание ВПГС через проемы в смежные помещения, слабые струи
2. Перемешивание над источником газов, но общая стратификация по помещению
3. Полное перемешивание – мощная струя



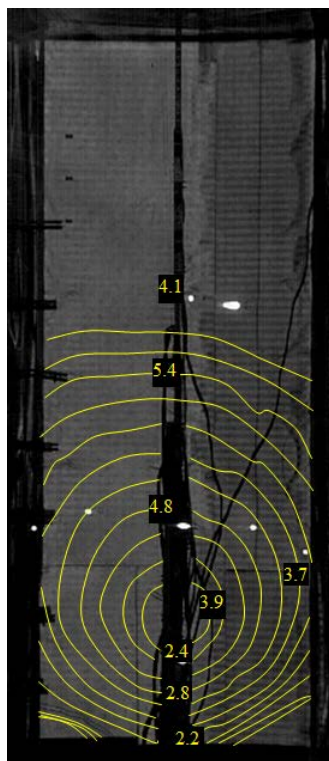
Работы [2,3]

Распространение пламени

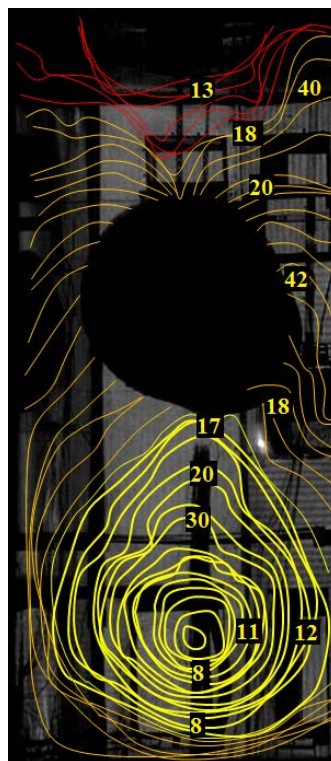
Положение фронтов горения и значения скоростей видимого фронта пламени (м/с)



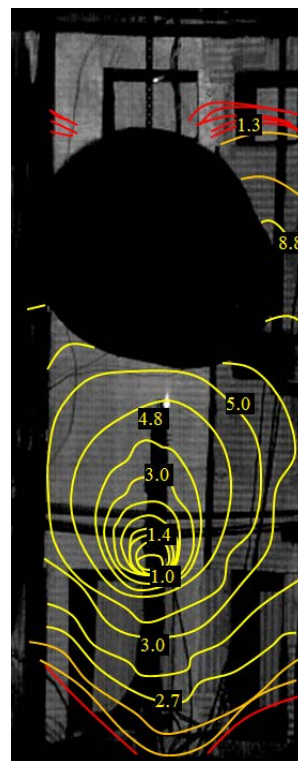
а) – БМ-Л1-5(2),
шаг по времени
7,1 мс



б) – БМ-Л3-2(2),
шаг по времени 10 мс



в) – БМ-Л5-2(2),
шаг по времени 1,5 мс



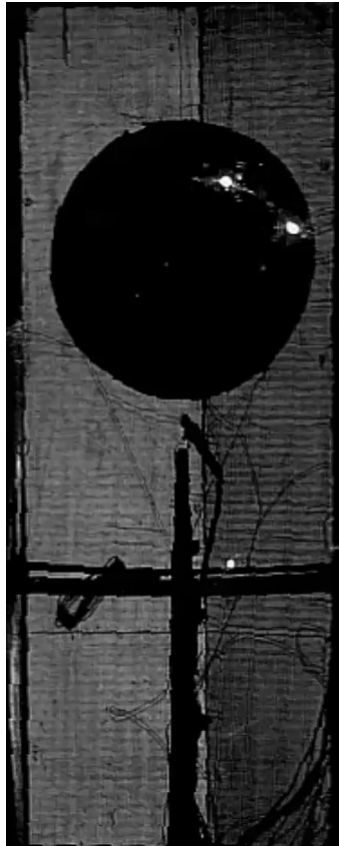
г) – БМ-Л5-3(2),
шаг по времени
19,2 мс

Параметры искры:

- энергия искры
50 мДж;
- искровой
промежуток
 $\approx 1,0$ мм;
- длительность
искры
1,5 мс.

Распространение пламени

Снижение скорости распространения пламени за счет большей доли водяного пара



БМ-Л1-5

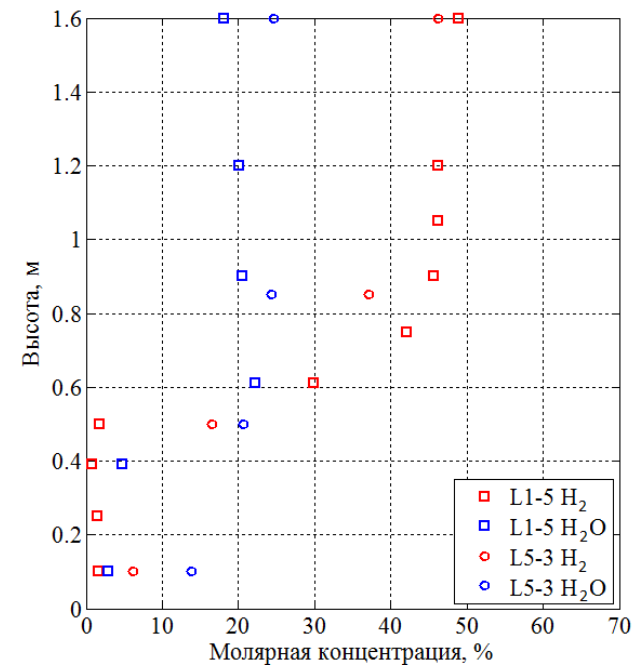


БМ-Л5-3

Средняя скорость пламени

$$\bar{V}_{\text{БМ-Л1-5}} \approx 3 \cdot \bar{V}_{\text{БМ-Л5-3}}$$

при $\varphi_{\text{БМ-Л1-5}} < \varphi_{\text{БМ-Л5-3}}$



Учет геометрических особенностей помещений ЗО



Турбулизация струи при ее переходе в соседнее помещение через узкий проем

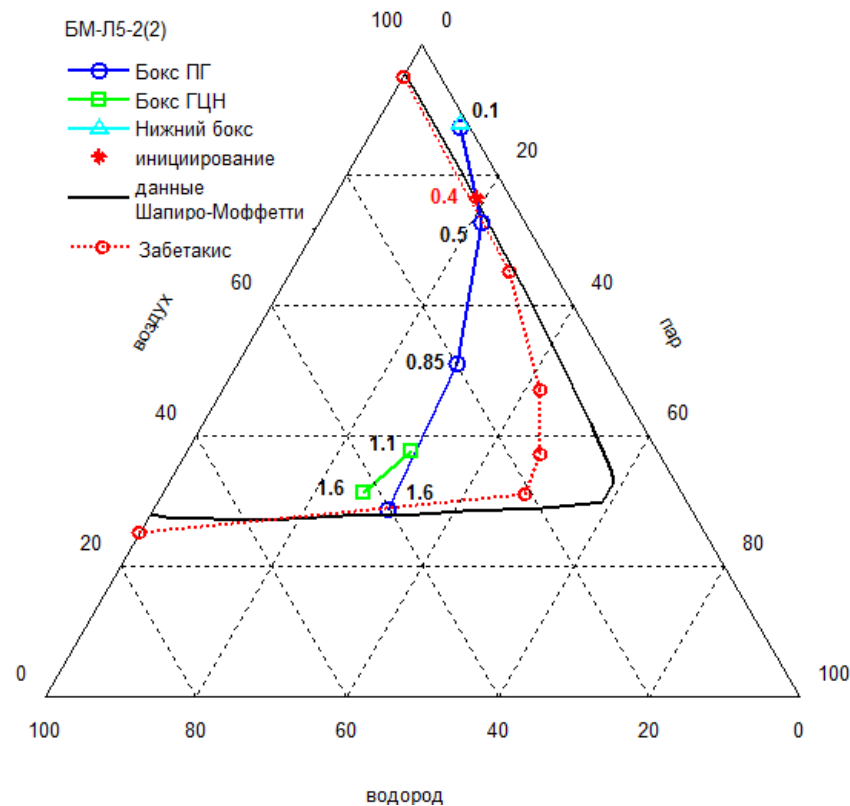
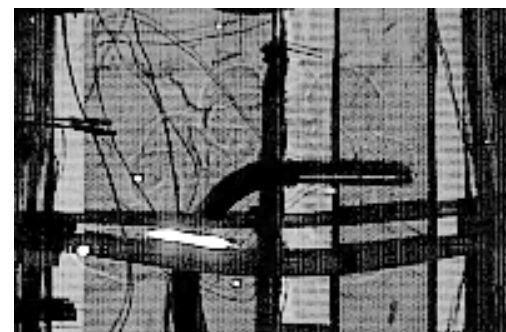
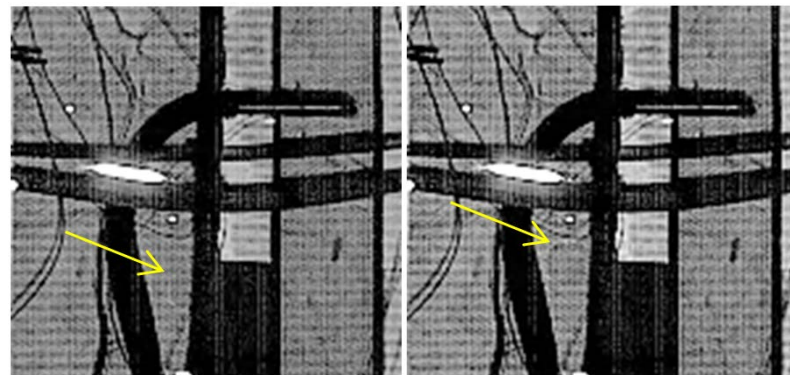
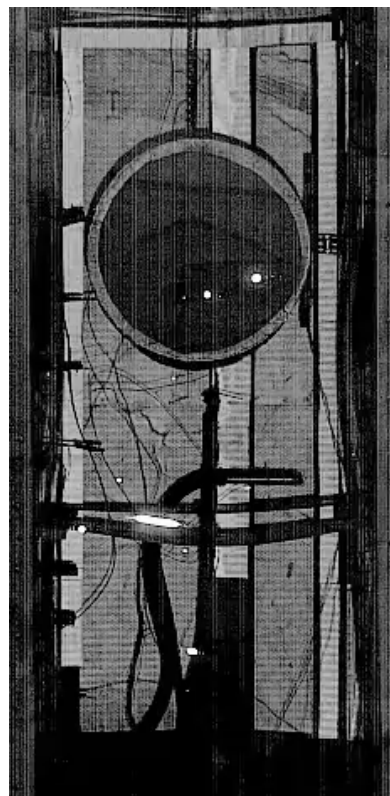
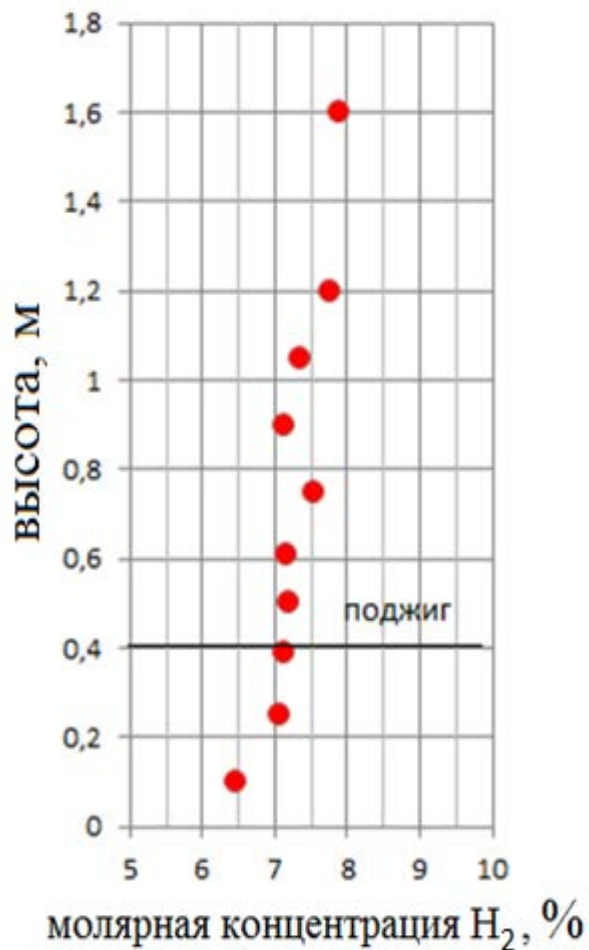


Диаграмма Шапиро-Моффетти, на которую нанесены зависимости, соответствующие распределению состава ВПГС по высоте (указана цифрами в метрах)

Состав 7-8 % водорода без пара

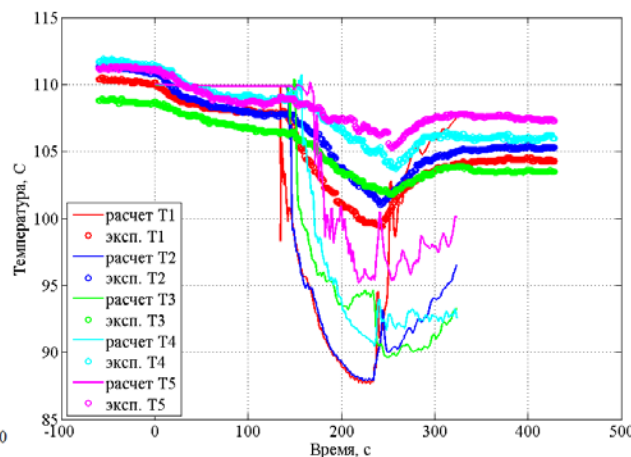
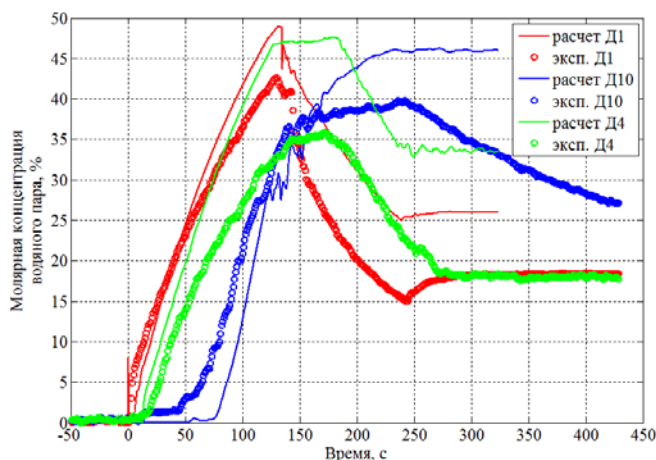


Посттестовые расчеты

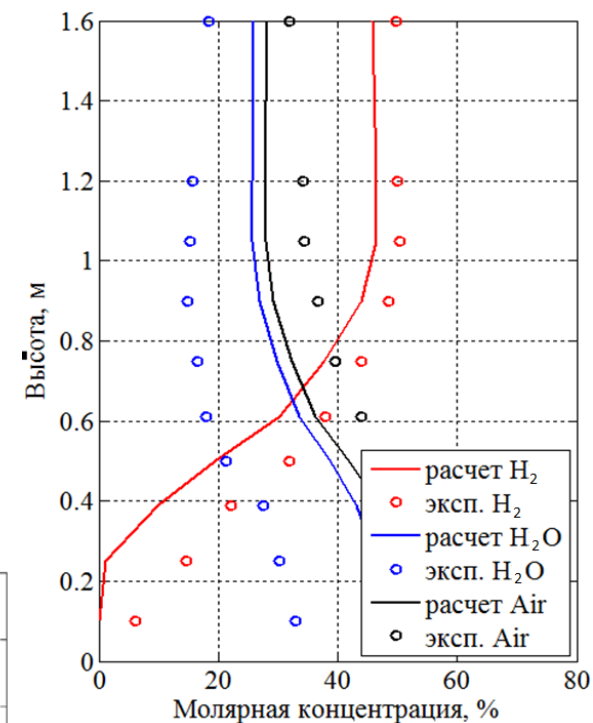


CFD-методика

- 3-D
- k-ε модель турбулентности
- ≈ 2 млн ячеек
- Минимальный размер ячейки ≈ 1 мм
- Средний размер ячейки ≈ 20 мм
- Условие 3-е рода на стенках
- Учет излучения



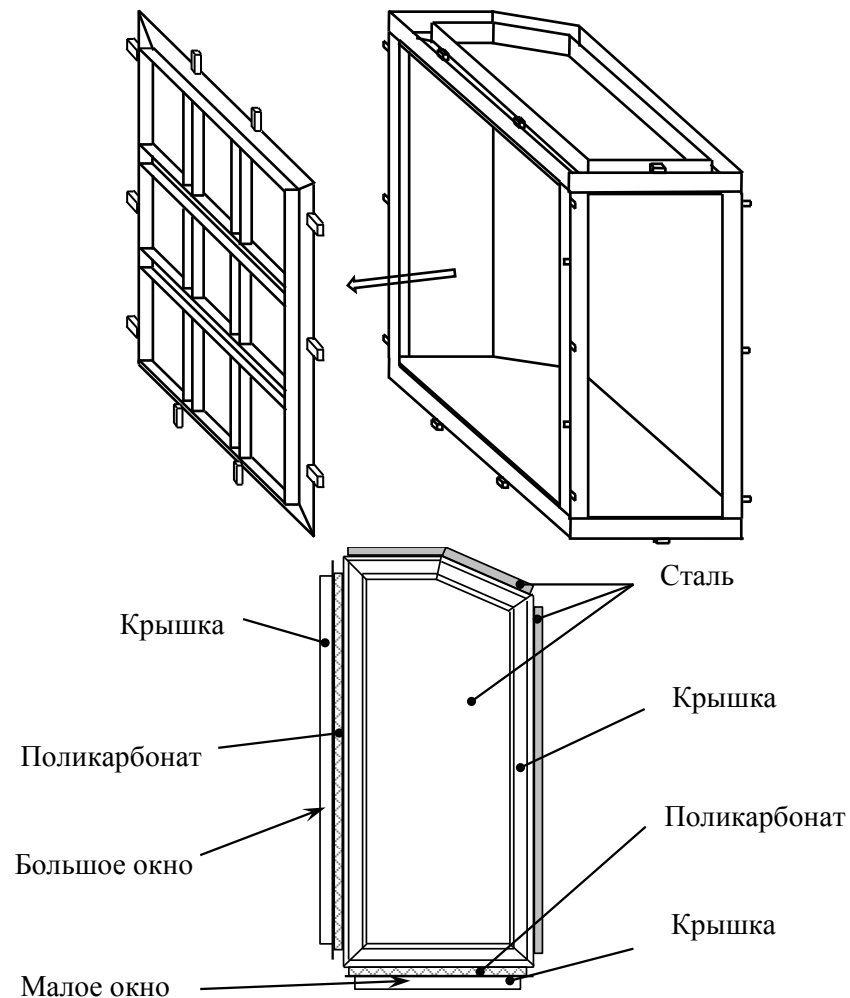
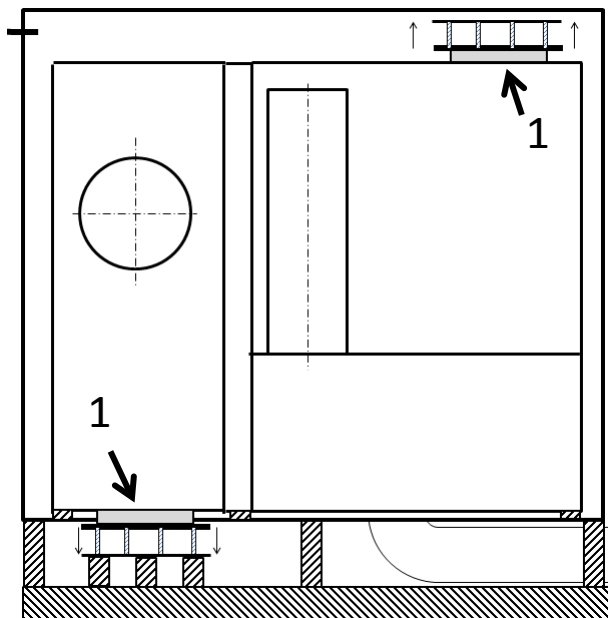
Точки – эксперимент; линии – расчет



Распределения молярных концентраций газов по высоте установки

БМ-ЛУ (усовершенствованный)

- сварная конструкция;
- лист поликарбоната свободно расширяется в пазах при нагреве;
- ребра жесткости;
- клапаны разгрузки (поз. 1)



Направления для будущих работ



1. Продолжение экспериментальных работ по вопросам ВБ:
 - Образование стратифицированных слоев;
 - Влияние размеров и расположения проемов между помещениями;
 - Вопросы масштабирования;
 - Получение данных для валидации кодов.
2. Испытания рекомбинаторов:
 - Производительность;
 - Диапазон беспламенной работы рекомбинатора;
 - Воспламенение смеси рекомбинатором.
3. Отработка конструктивных решений в целях проверки отсутствия возможного квазидетонационного режима горения.
4. Вопросы протекания процессов горения смесей с иным составом газов (помимо водорода).

Заключение



1. Представлена поликарбонатная установка, предназначенная для проведения экспериментов по исследованию распространения газов по прототипам помещений с последующим воспламенением и получением данных о распространении фронта горения. Показаны особые преимущества установки.
2. Продемонстрированы возможности РФЯЦ-ВНИИТФ в проведении данного класса экспериментов, показаны современные методики измерений с вариантами их последующего улучшения.
3. Кратко представлены результаты экспериментальных работ по ВБ, проведенных на установке. Выделены три режима заполнения газами, показаны особенности распространения фронтов пламени. Получены данные для валидации кодов.
4. Представлена конструкция поликарбонатной установки с усиленной прочностью и герметичностью.
5. Отмечены пути для будущих работ на поликарбонатной установке.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

1. Yu. A. Kucherenko, A.V. Pavlenko, O.E. Shestachenko, S.I. Balabin, A.P. Pylaev, and A.A. Tyaktev, Measurement of spectral characteristics of the turbulent mixing zone, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 51, No. 3, pp. 299-307, 2010.
2. Denisenko V.P., Kirillov I.A., Korobtsev S.V., Nikolaev I.I., Hydrogen-air explosive envelope behavior in confined space at different leak velocities, 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Palais des Congrès Ajaccio - FRANCE, 16-18 September 2009, paper 194.
3. G.R. Hunt, P. Cooper, P.F. Linden, Thermal stratification produced by plumes and jets in enclosed spaces, Building and Environment, 36 (2001), pp.871-882.