



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ И ГОРЕНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННОМ ЗАМНУТОМ КАНАЛЕ

19.05.2025-23.05.2025

XVII Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

Яковлев С. А., Стаханов В.В. Безгоднов Е. В., Тараканов А. А., Пасюков С. Д., Никифоров М. В.,
Попов И.А.

Введение и актуальность

Водородно-воздушная смесь одна из наиболее легко воспламеняемых горючих смесей с самым большим энерговыделением на единицу массы [1].

Утечка водорода с его стратификацией в помещении или сооружении – одна из вероятных аварийных ситуаций.

В случае струйного истечения водорода вблизи земли, в начальный момент времени может образоваться смесь с «отрицательным» градиентом концентрации.

Прогнозирование развития аварийных ситуаций в больших масштабах объектов ВЭ возможно только с помощью валидированных численных моделей и кодов.



[1] – Термогазодинамика горения и взрыва водорода. Б.Е. Гельфанд [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. – 584 с..

[2] – URL:<https://rg.ru/2020/09/19/reg-cfo/pod-tuloj-proizoshel-vzryv-na-himkombinate-azot.html> (дата обращения 06.02.2024)

Цель и задачи работы

Цель

Получение экспериментальных данных по стратификации и диффузии водорода в воздухе в вертикально ориентированной установке БМ-К, а также горению стратифицированных водородно-воздушных смесей для валидации численных методик.

Задачи

- Провести экспериментальные исследования по заполнению объема установки водородом;
- Получить экспериментальные данные по пространственно-временному распределению водорода при заполнении канала;
- Провести экспериментальные исследования по горению стратифицированных водородно-воздушных смесей с $\bar{C} = 20$ и 30 % водорода;
- Получить экспериментальные данные по распространению пламени стратифицированных водородно-воздушных составов.

Зарубежные установки



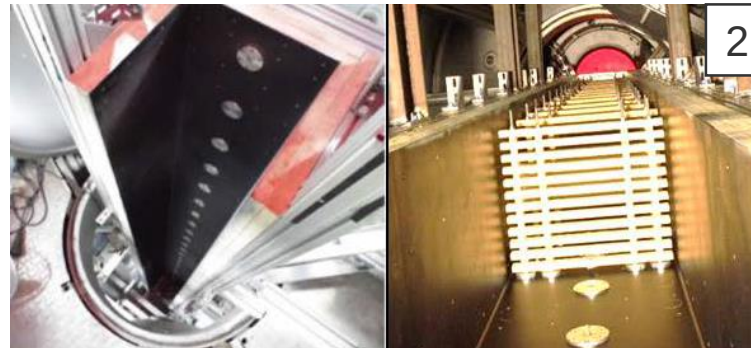
1

Поиск критических условий ускорения пламени и распространения детонации в **полуоткрытом вертикально ориентированном канале с градиентными смесями.**



3

Экспериментальное исследование влияния **градиента концентрации на горение** водородно-воздушных смесей и **валидация численных методик.**



2

Экспериментальное исследование влияния **градиента объемной доли H_2 и BR** на механизмы распространения пламени

[1] - A. Bleyer, N. Chaumeix, C. Pailard, et al. Experimental and numerical study of flame propagation with Hydrogen Gradient in vertical facility: ENACCEF, 8th ISHPMIE, September (2010).

[2] - Friedrich A., Grune J., Sempert K. e.a. Hydrogen combustion experiments in a vertical semi-confined channel. Hydrogen Energy (2018)

[3] - L.R. Boeck, Deflagration-to-Detonation Transition and Detonation Propagation in H_2 -Air Mixtures with Transverse Concentration Gradients. – Technische Universität München Institut für Energietechnik (2015).

Экспериментальная установка

Установка представляет собой замкнутый канал квадратного сечения $0,6 \times 0,6$ м² длиной 12 м. Предназначена для эксплуатации в горизонтальном и вертикальном положении. Предусмотрены иллюминаторы для видеосъемки.

Средства измерения

- **Кондуктометрические датчики** объемной доли водорода с относительной погрешностью 0,5-5,0 % (в экспериментах без инициирования горения);
- **Тензометрические датчики** избыточного давления с относительной погрешностью измерений $\pm 6\%$;
- **Оптические датчики** для фиксирования времени прихода фронта пламени;
- **Высокоскоростные камеры** с помощью которых фиксировалось время прихода фронта пламени.





Программа экспериментов

Было проведено **четыре эксперимента по заполнению** установки водородом и **девять экспериментов с горением** водородно-воздушной смеси.

Регламент экспериментов

- 01** Воздух откачивается из установки до значений давления P_0 ;
- 02** Водород подается с суммарным расходом 10 л/с до давления P_1 ;
- 03** Смесь выдерживается в течение времени t_d после начала подачи водорода, а затем, если это необходимо, поджигается.

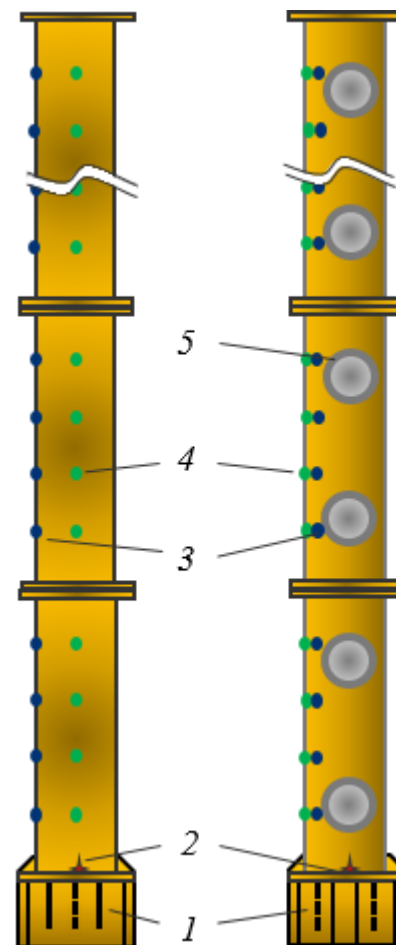
№	P_0 , кПа	P_1 , кПа	$\bar{C}$, %	t_d , с	γ	ΔP , кПа	u_{max} , м/с
1	79,9±0,2	101,0±0,3	20,9±0,3	900	—	—	—
2	80,0±0,2	100,8±0,3	20,7±0,3	900	—	—	—
3	70,0±0,2	101,6±0,3	31,3±0,3	900	—	—	—
4	70,0±0,2	101,7±0,3	31,4±0,3	900	—	—	—
5	80,0±0,2	100,6±0,3	20,5	170	1,5	521±13	286
6	79,8±0,2	101,7±0,3	21,5	170	1,5	540±13	318
7	80,0±0,2	101,9±0,3	21,5	170	1,5	538±13	280
8	80,0±0,2	101,5±0,3	21,2	100	2,0	669±13	489
9	80,0±0,2	101,3±0,3	21,0	100	2,0	449±13	282
10	80,1±0,2	101,8±0,3	21,3	100	2,0	521±13	313
11	70,0±0,2	102,5±0,3	31,7	150	1,5	660±13	182
12	70,0±0,2	102,2±0,3	31,5	150	1,5	547±13	172
13	70,0±0,2	100,9±0,3	30,6	150	1,5	550±13	169

Особенности проведения экспериментов

Во время экспериментов:

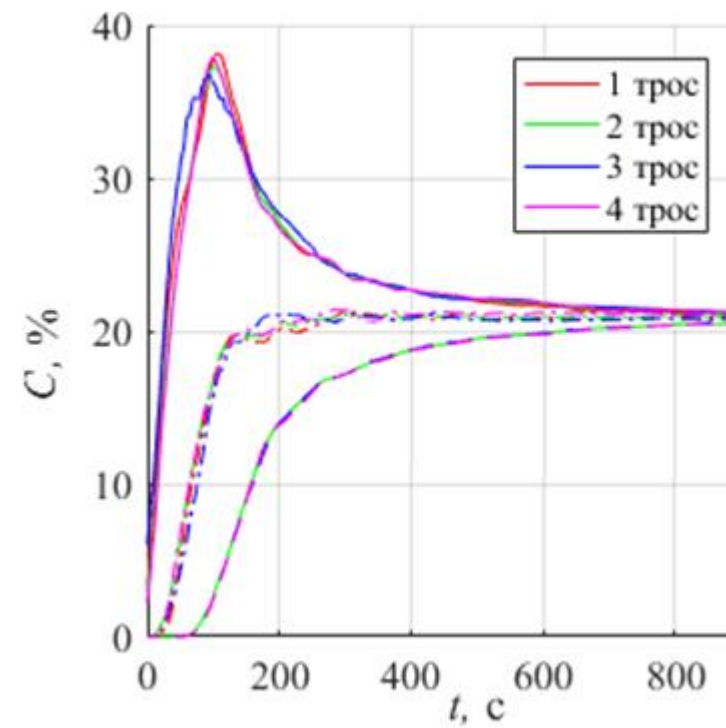
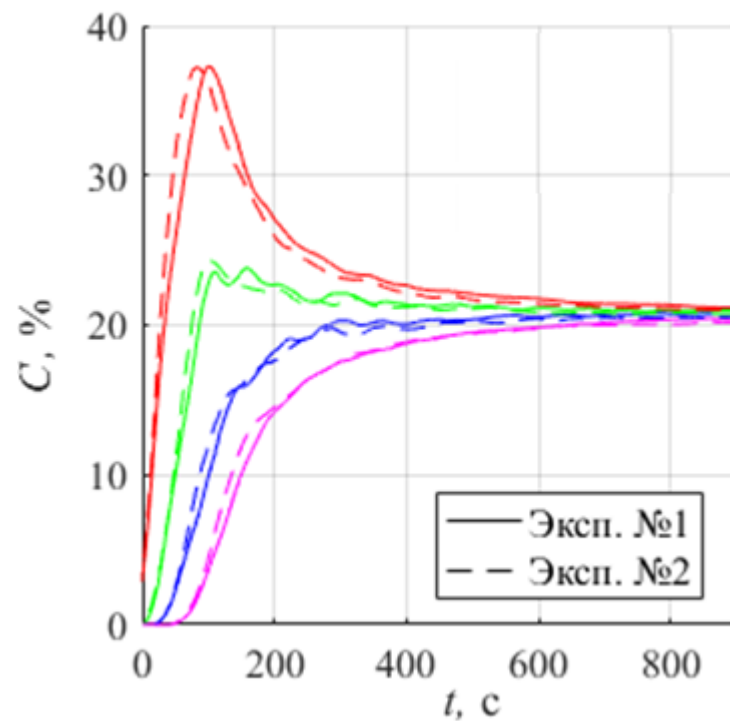
- Установка ориентирована **вертикально**;
- В объеме установки **отсутствуют перегородки**;
- **Распределение водорода по высоте канала** в экспериментах с инициированием горения принимается **по результатам экспериментов без инициирования горения**;
- Градиентные смеси характеризуются **степенью неоднородности**:

$$\gamma = \frac{C_{MAX}}{\bar{C}}.$$



- 1 – входы для подачи смеси;
2 – точка поджига;
3 – оптические датчики;
4 – тензометрические датчики давления;
5 – иллюминаторы.

Результаты экспериментов (без инициирования горения)



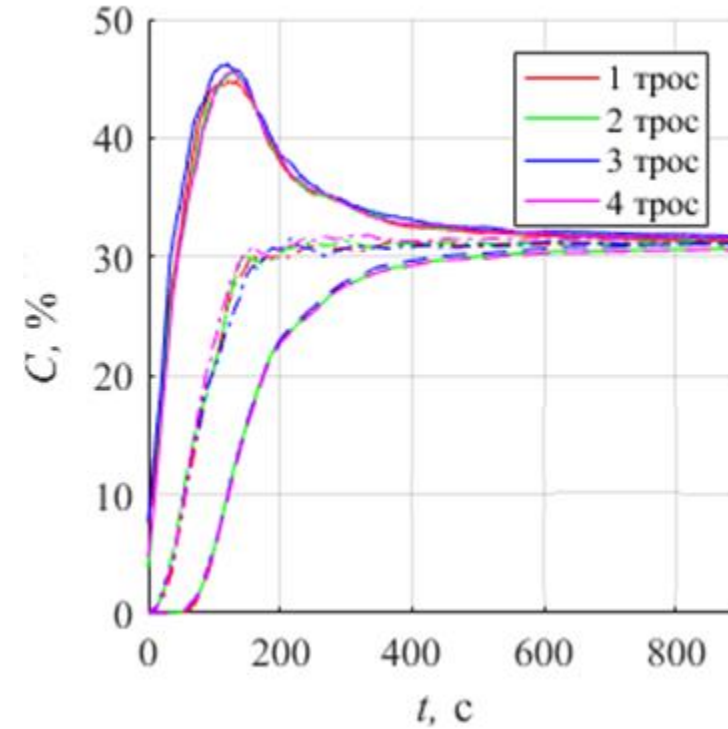
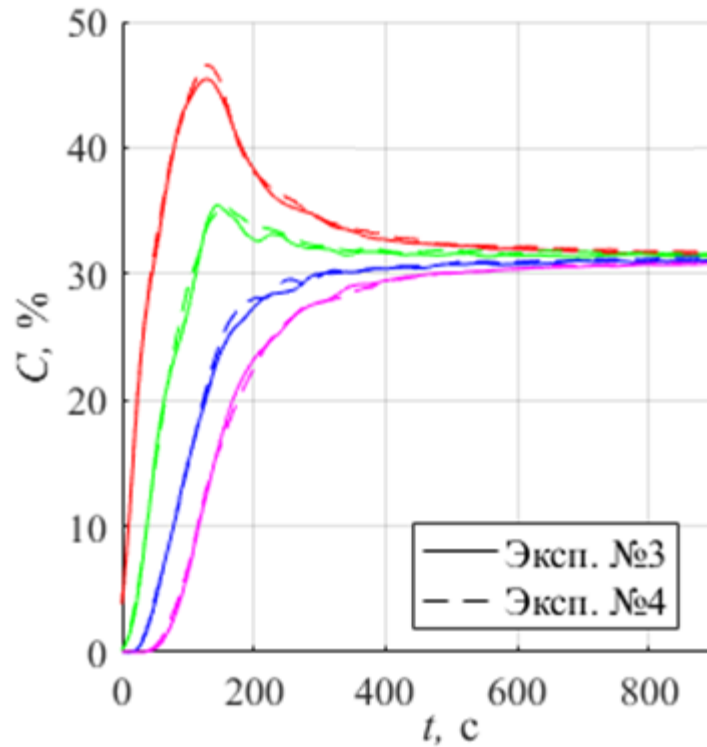
Между экспериментами в начальный момент времени присутствует несогласованность результатов, что связано со струйными течениями и завихрениями при подаче водорода.

После окончания подачи между экспериментами со схожими начальными условиями наблюдается хорошая согласованность результатов.

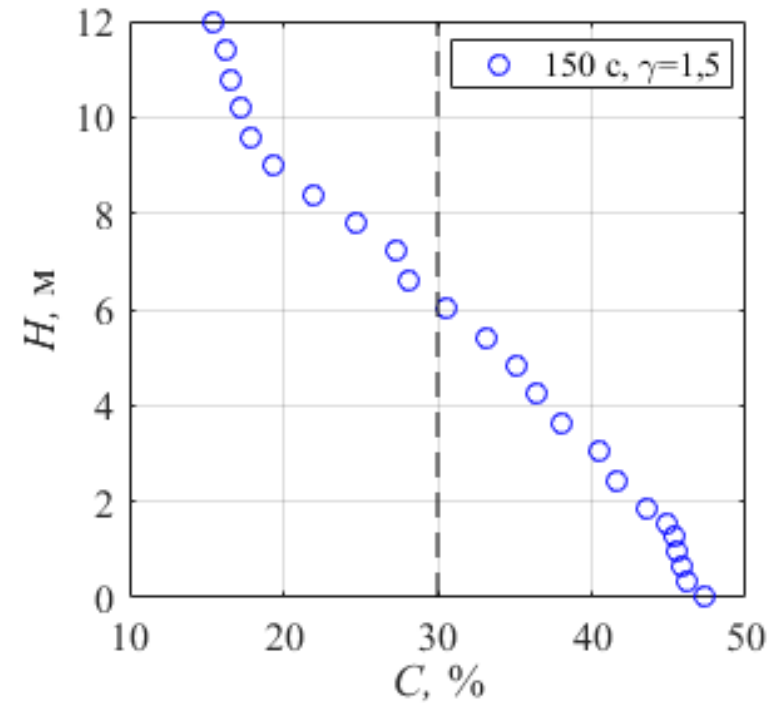
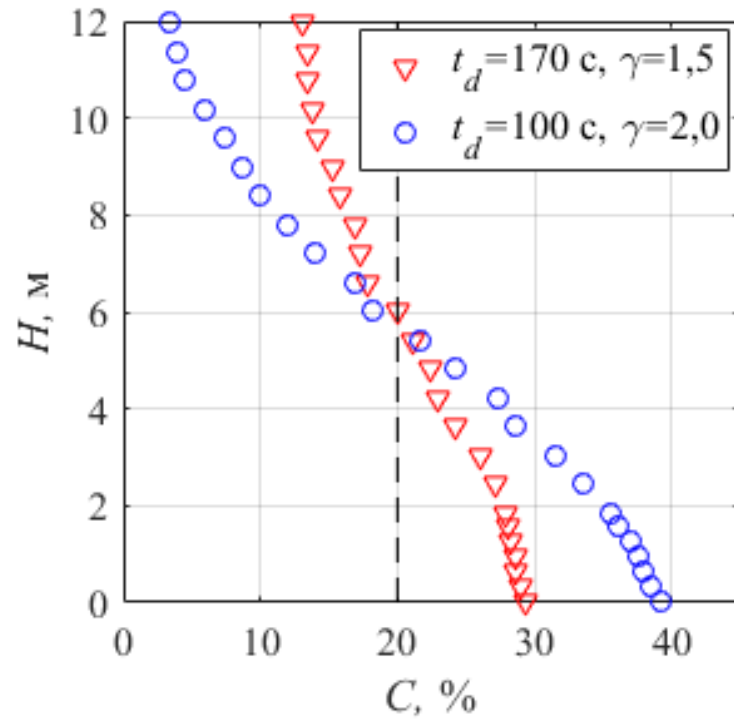
Результаты экспериментов (без инициирования горения)



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

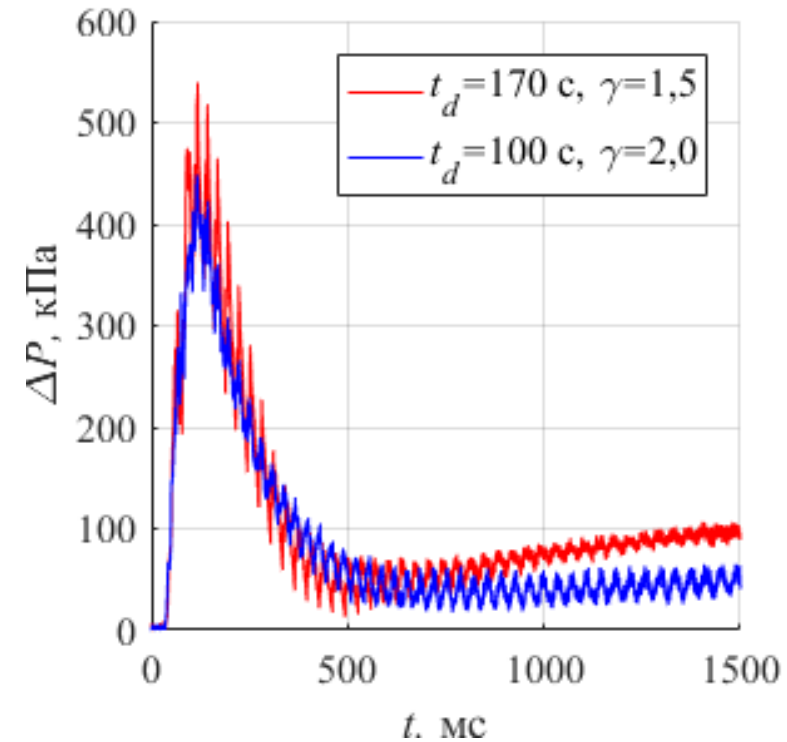
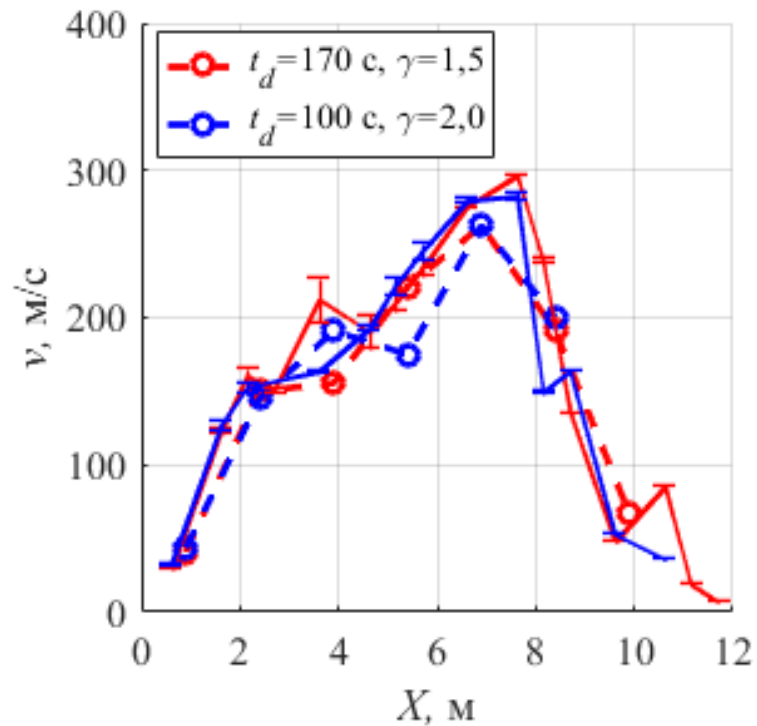


Результаты экспериментов (без инициирования горения)



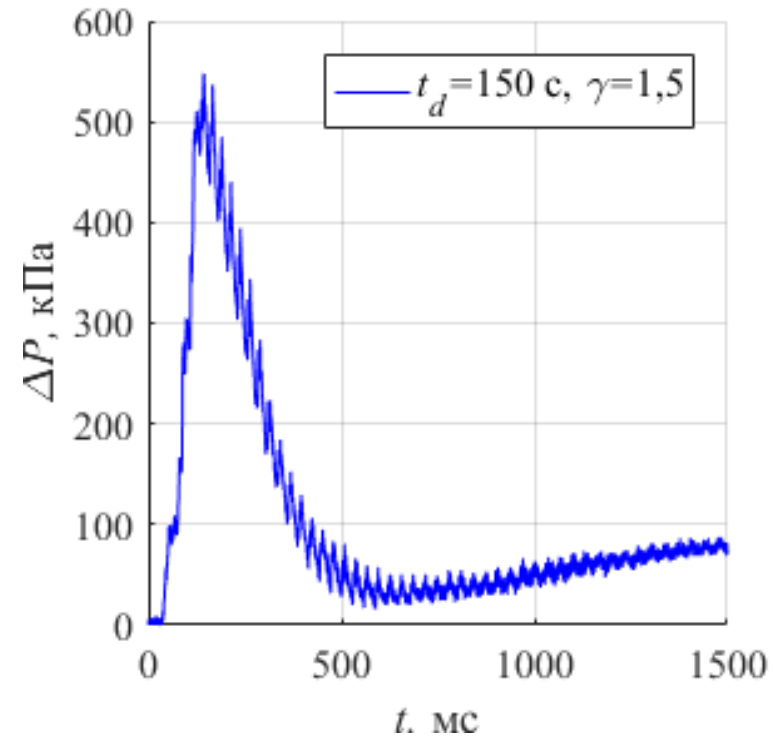
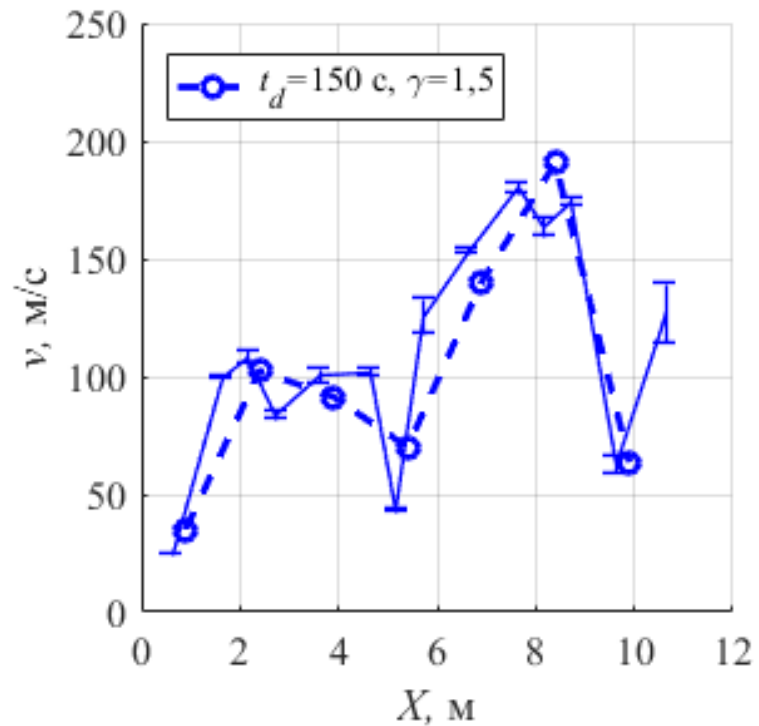
На рисунках представлено распределение объемной доли водорода по высоте канала на моменты поджига.

Результаты экспериментов



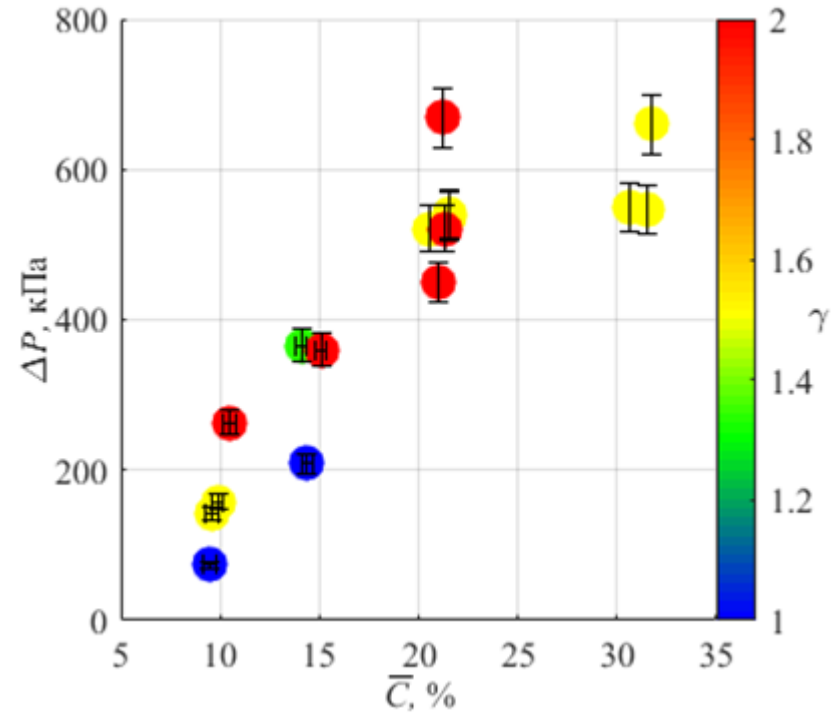
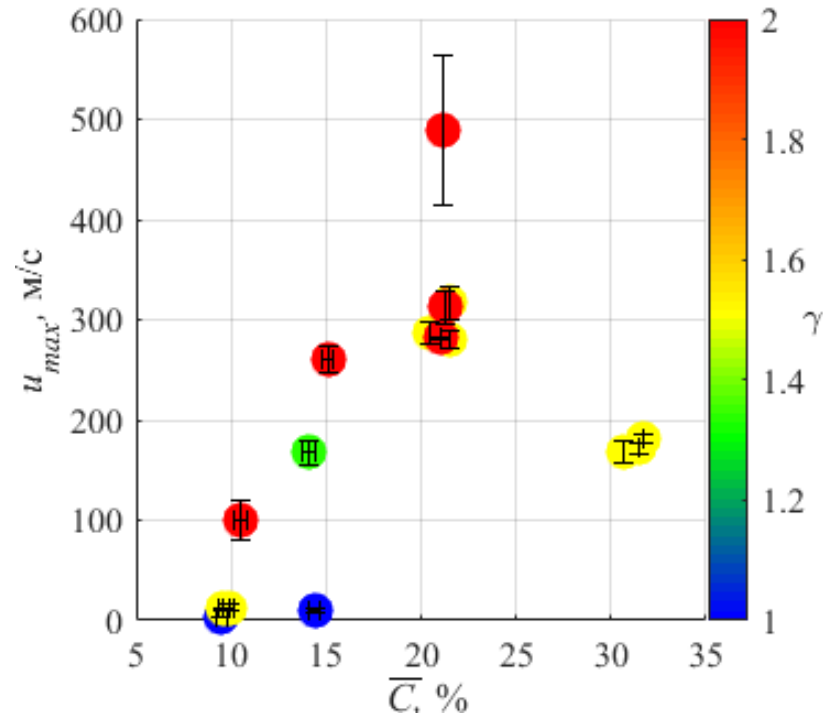
На рисунках представлены зависимость скорости фронта пламени вдоль канала и зависимость избыточного давления вблизи конца канала в экспериментах с $\bar{C} = 20$ %.

Результаты экспериментов



На рисунках представлены зависимость скорости фронта пламени вдоль канала и зависимость избыточного давления вблизи конца канала в экспериментах с $\bar{C} = 30$ %.

Результаты экспериментов



На рисунках представлены зависимости максимальной скорости фронта пламени и пикового перепада давления от средней объемной доли водорода в смеси.

Видно, что в смесях со средним содержанием водорода близким к стехиометрическому наличие градиента концентрации способствует уменьшению максимальной скорости фронта пламени в сравнении с равномерно перемешанной смесью.

Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования стратификации и диффузии водорода в воздухе, а также горения стратифицированных водородно-воздушных смесей в вертикально ориентированном канале.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что:

01

В бедных ВВС (средняя объемная доля водорода менее 20 %) при фиксированной средней объемной доле с ростом степени неоднородности смеси скорость фронта пламени и перепады давления возрастают;

02

В смеси со средним содержанием водорода близким к стехиометрическому наличие градиента концентрации способствует уменьшению максимальной скорости фронта пламени в сравнении с равномерно перемешанной смесью.

Спасибо за внимание!

Яковлев Савва Андреевич

yakovlevsa@vniitf.ru

19.05.2025-23.05.2025