

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЁХМЕРНОЙ КАРТИНЫ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО ФРОНТА ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

Студент 204М группы Ельянов Артём

Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Научный руководитель: Знаменская Ирина Александровна

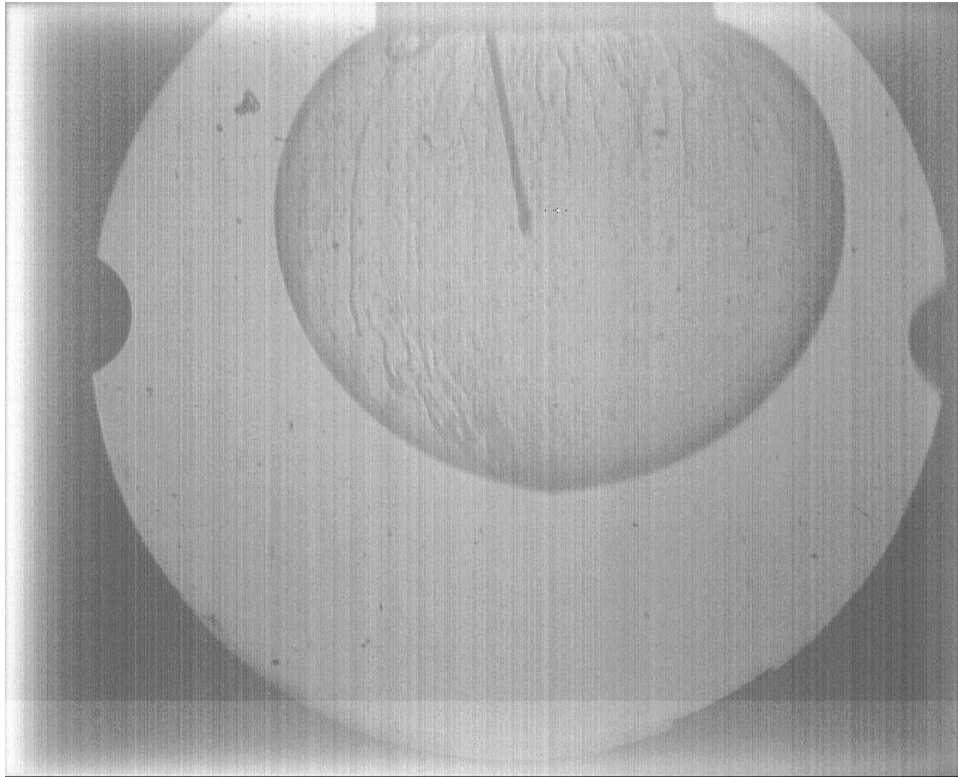
Научный консультант: Голуб Виктор Владимирович

Москва  
2020



# Неустойчивость фронта пламени

Гладкий фронт богатого пламени



Скорость видеосъемки: 1000 к/с

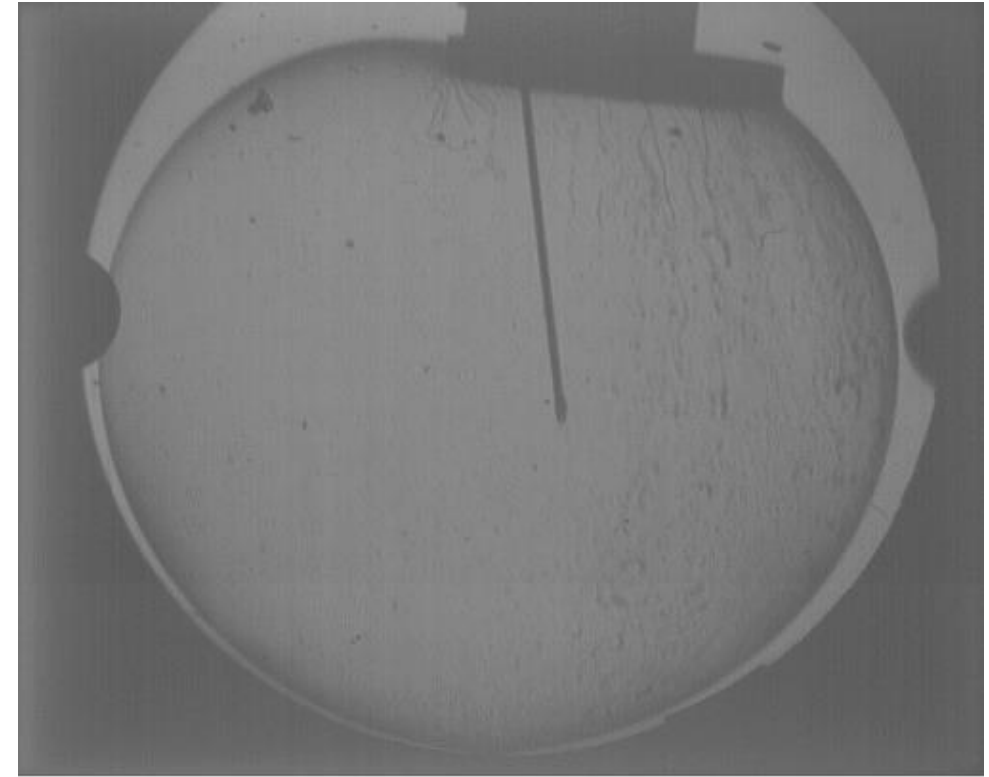
20%  $H_2$  + 80% *Air*

Число Льюиса:

$$Le = \frac{\chi}{D}$$

% $H_2$	$Le$
10	0,33
15	0,36
20	0,38
32	1,17
При н.у.	

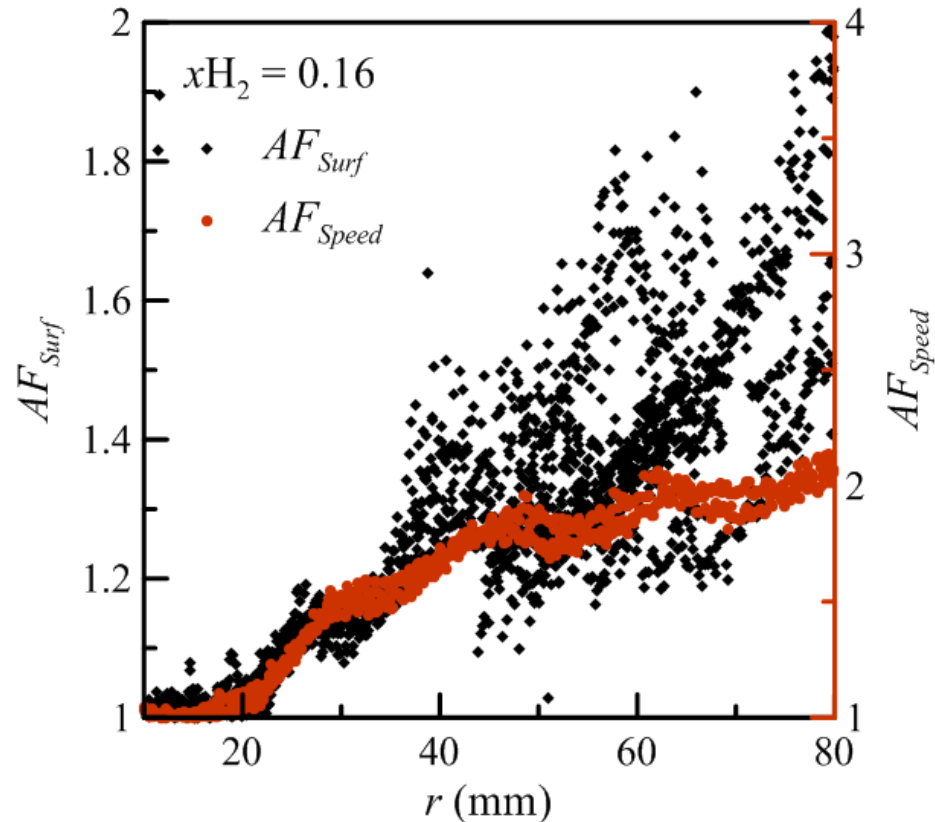
Складчатый фронт бедного пламени



Скорость видеосъемки: 500 к/с

10%  $H_2$  + 90% *Air*

# Проблема



J. Goulier, K. N'Guessan, M. Idir, N. Chaumeix, Tomographic visualization of thermo-diffusive instabilities of lean hydrogen/air mixtures, Proceedings of 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2017, p. 1036.

**Коэффициент складчатости  $\Xi$**  – surface amplification factor (J. Goulier), wrinkling factor (M. Kuznetsov), folding factor (L. Kagan, G.Sivashinsky) – отношение площади складчатого неустойчивого пламени к площади сферы с аналогичным средним радиусом.

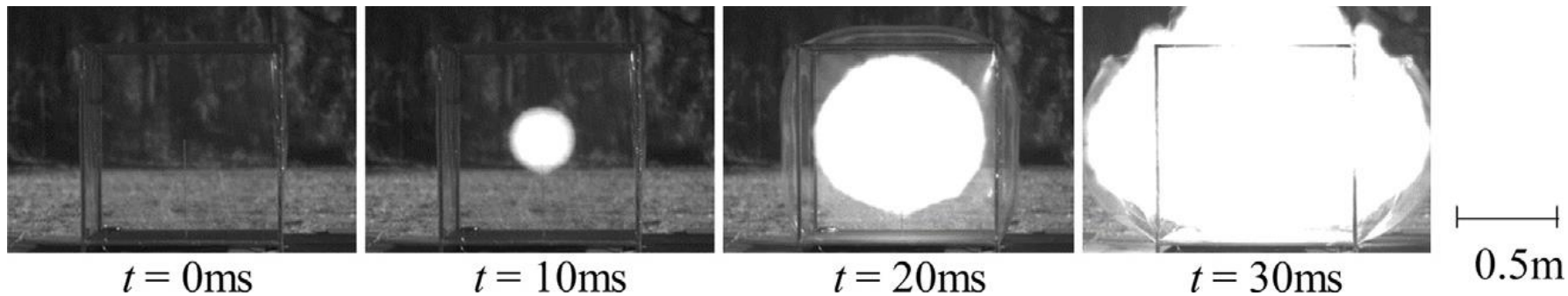


# Сравнение экспериментальных данных



- Отсутствие информации
- о структуре фронта
  - о параметрах съемки

M. Groethe, E. Merilo, J. Colton, S. Chiba, Y. Sato, H. Iwabuchi, Largescale hydrogen deflagrations and detonations, International Journal of Hydrogen Energy (2007)



W. Kim, T. Mogi, R. Dobashi, Flame acceleration in unconfined hydrogen/air deflagrations by using infrared photography, Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2013)



# Мотивация

- Недостаток экспериментов по исследованию бедных водородно-воздушных пламён.
- Отсутствие простых методов исследования 3D фронта пламени.
- Важность знания скорости распространения бедных водородно-воздушных пламён для оценки рисков разрушений, вызванных газовыми взрывами.

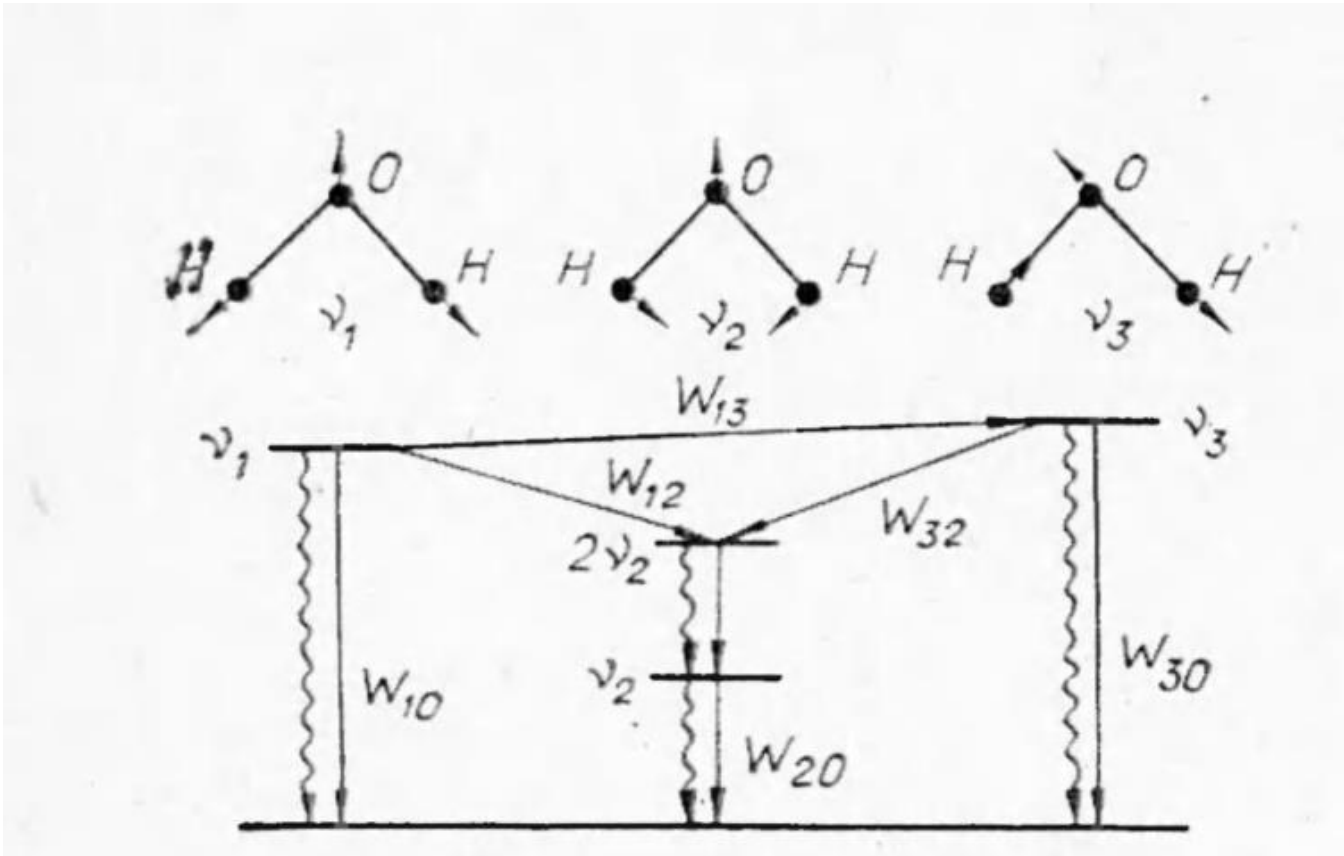


# Цель

- Создать новый метод визуализации пламени на основе инфракрасной термографии;
- Определить его границы применимости и точность пространственных измерений;
- Рассчитать с использованием данного метода коэффициент складчатости;
- Определить скорость распространения 15% водородно-воздушного пламени;



# Инфракрасное излучение пламени



А. К. Ребров, С. Ф. Чекмарев, Н. М. Чернявина,  
Колебательная релаксация и излучение H<sub>2</sub>O при ударном  
нагреве смеси газов низкой плотности, Журнал прикладной  
механики и технической физики (1982) 338-342.

Молекула воды имеет 3  
основные частоты,  
соответствующие  
типам колебаний:  
симметричному -  $\nu_1$ ,  
деформационному -  $\nu_2$ ,  
асимметричному -  $\nu_3$ .

Переход между  
первыми  
симметричными и  
несимметричными  
уровнями 001  $\rightarrow$  000 и  
100  $\rightarrow$  000  
характеризуются  
излучением с длиной  
волны около 2,7 мкм.



# Инфракрасное излучение пламени

Число колебательных переходов с испусканием фотонов с длиной волны 2.7 мкм пропорционально заселенности соответствующих уровней (А.К. Ребров) :

$$\frac{dn_{H_2O l}}{dt} = \frac{1}{\tau_{la}} (n_{H_2O l}^e - n_{H_2O l})$$

$n_{H_2O l}$  – концентрация молекул воды с колебательным уровнем  $l$ ,

$\tau_{la}$  – постоянная колебательных релаксаций,

$n_{H_2O l}^e$  – равновесная концентрация молекул воды с уровнем  $l$ , определяемая распределением Больцмана.

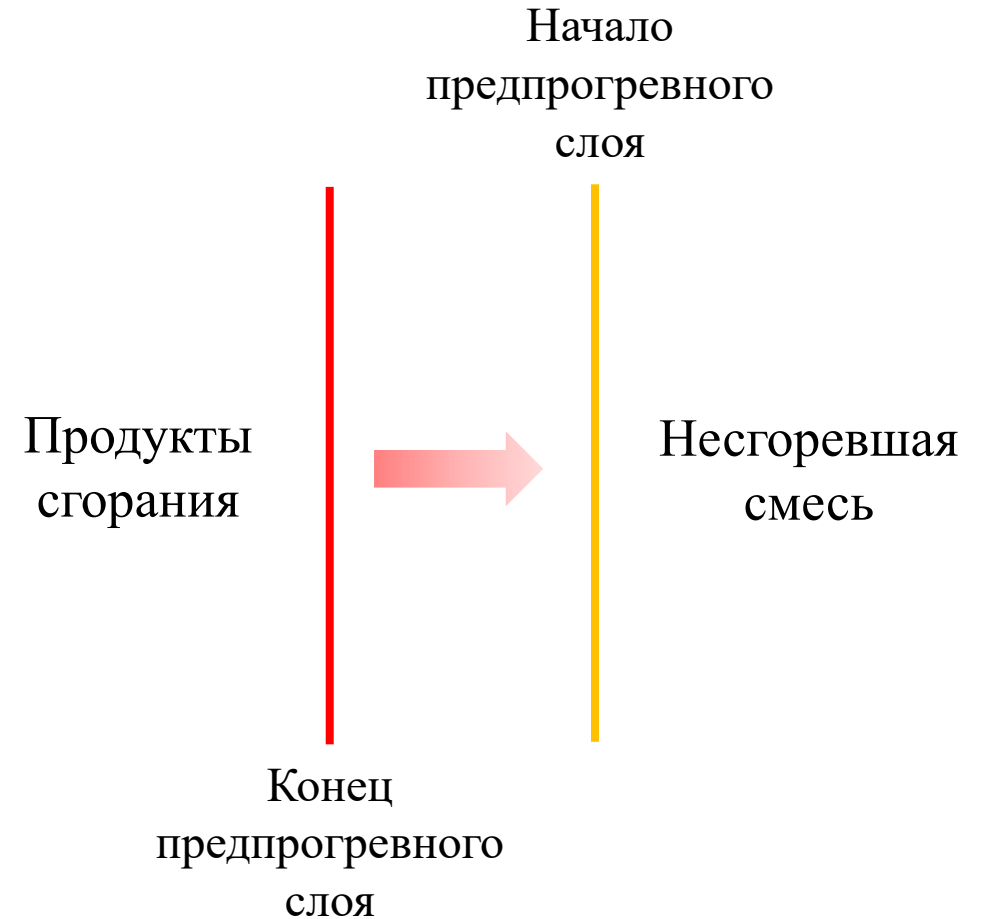
Интенсивность излучения каждого из переходов:

$$I_{lu} = C_l n_{H_2O} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_l k_B T_u}\right) \frac{W_{l \rightarrow 000} n_{lu}}{1 + \tau_{la} W_{l \rightarrow 000} n_{lu}}$$

$T_u$  – начальная температура смеси,

$W_l$  – константа скорости дезактивации,

$C_l$  – константа, связывающая частоту дезактивации и интенсивность излучения





# Инфракрасное излучение пламени

$$\frac{I_{luc}}{I_{lu}} = \left( \frac{eT_u}{(e-1)T_u + T_b} \right)^2 \exp\left( \frac{hc(T_b - T_u)}{e\lambda_l k_B T_b T_u} \right) \times$$

$$\times \frac{(e-1)T_u + T_b(1 + \tau_{la} W_{l \rightarrow 000} n_u)}{((e(1 + \tau_{la} W_{l \rightarrow 000} n_u) - 1)T_u + T_b)} \approx 10^5$$

$I_{luc}$  - интенсивность излучения на «холодном» слое.  
На «холодной» границе прогреваемого слоя пламени несгоревшая смесь остается неизменной,

$$\frac{I_{luh}}{I_{lu}} = \left( \frac{T_u}{T_b} \right)^2 \exp\left( \frac{hc(T_b - T_u)}{\lambda_l k_B T_b T_u} \right) \frac{(1 + \tau_{la} W_{l \rightarrow 000} n_u)}{\left( 1 + \tau_{la} W_{l \rightarrow 000} n_u \frac{T_u}{T_b} \right)} \approx 10^6$$

$I_{luh}$  - интенсивность излучения на «горячем» слое.  
На «горячей» границе нагревательного слоя пламени несгоревшая смесь остается неизменной, а температура равна  $T_b$

$$\frac{I_{lup}}{I_{lu}} = \frac{T_u}{T_b} \frac{n_{H_2O b}^{1453}}{n_{H_2O u}^{293}} \exp\left( \frac{hc(T_b - T_u)}{\lambda_l k_B T_b T_u} \right) \frac{T_b(1 + \tau_{la} W_{l \rightarrow 000} n_u)}{(T_b + \tau_{la} T_u W_{l \rightarrow 000} n_u)} \approx 10^9$$

$I_{lup}$  - интенсивность излучения в продуктах сгорания.

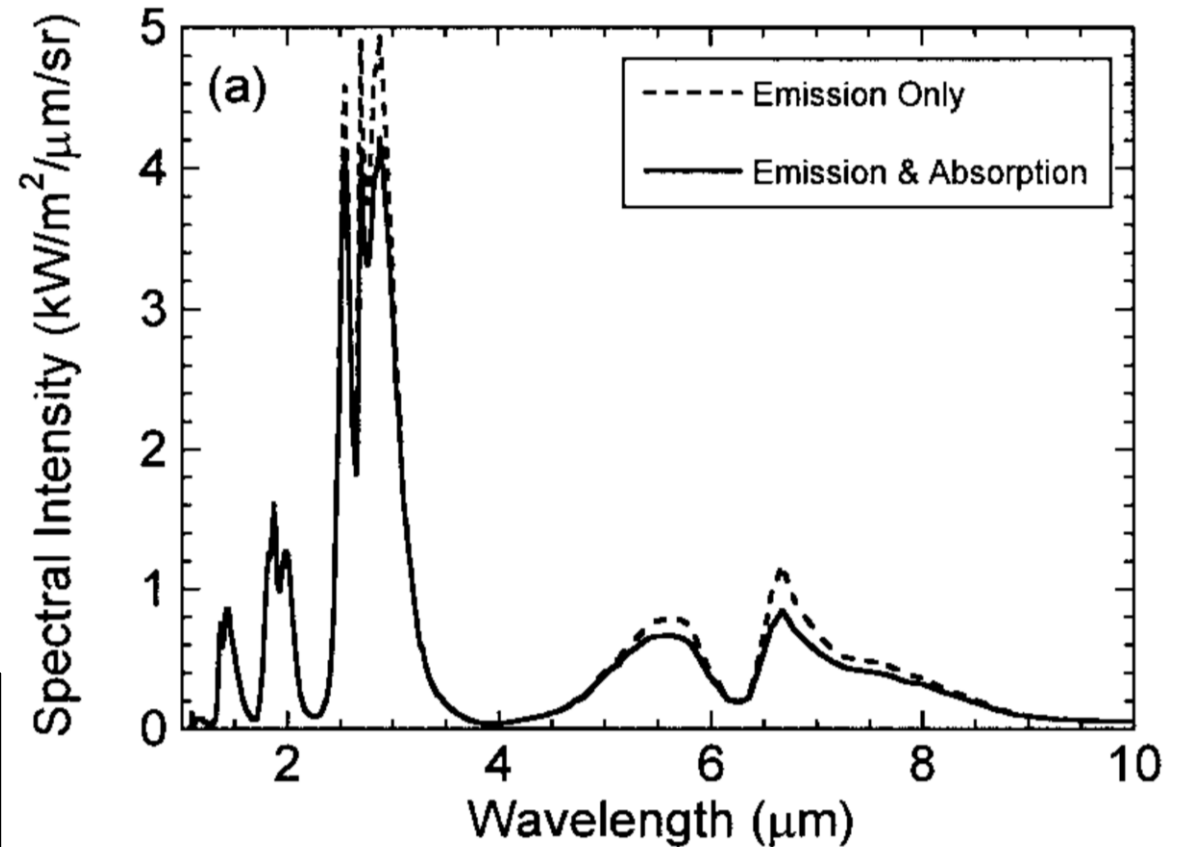
Интенсивность излучения продуктов сгорания 15% водородно-воздушной смеси превышает интенсивность излучения горючей смеси в экспериментальных условиях на 3 порядка и более.

# Инфракрасное излучение пламени

Состав 15% смеси на 1 атм:  
0,85 атм сухого воздуха, из них  
0,67 атм азота,  
0,18 атм кислорода,  
1% аргона, добавляемого к азоту в  
качестве инертного газа,  
0,15 атм водорода,  
 $3,8 \times 10^{-3}$  атм водяного пара.

Предполагается, что инфракрасное излучение происходит по всему объему облака пламени. Видеозапись в ИК-диапазоне с длиной волны 2,7 позволяет регистрировать пространственное положение облака продуктов сгорания.

Спектральная интенсивность излучения продуктов горения водорода.

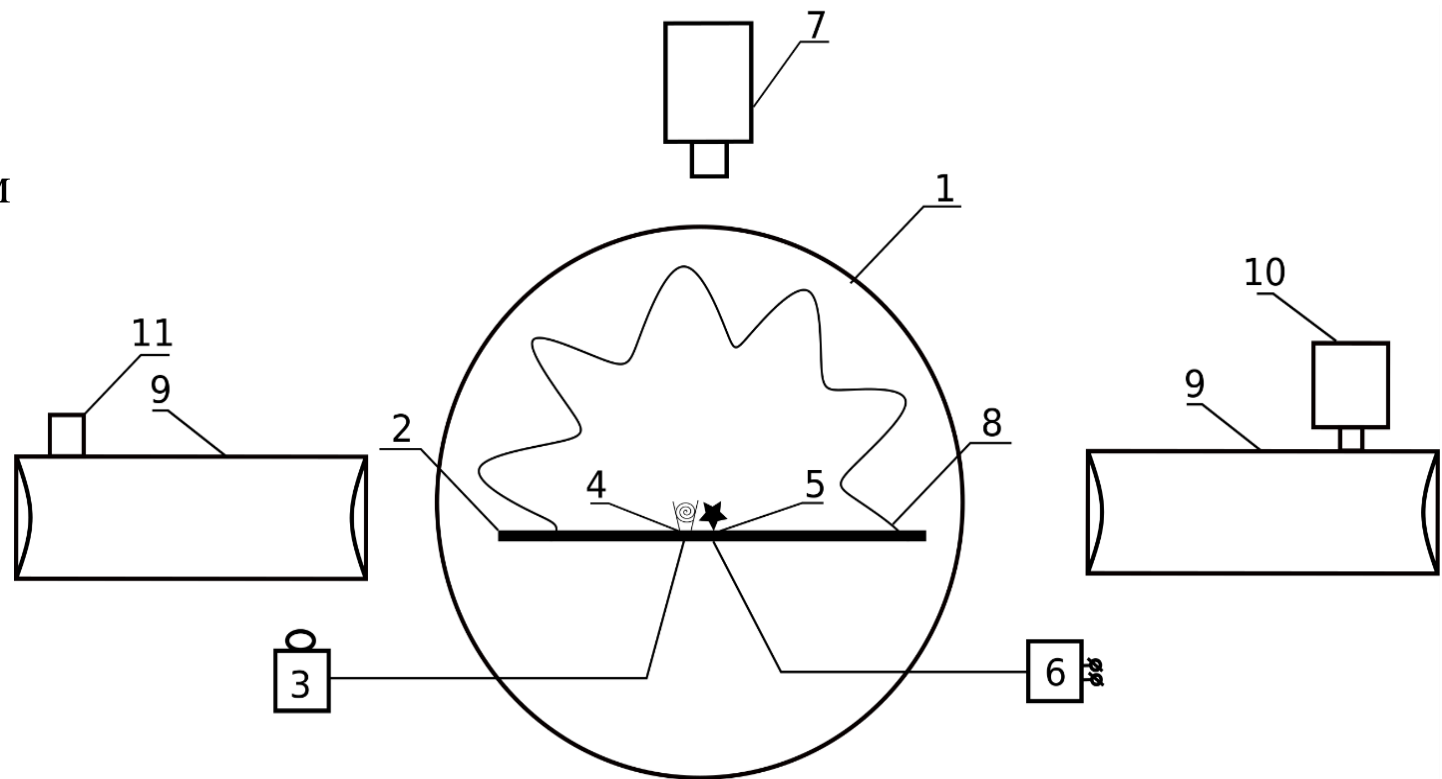


J. H. Frank, R. S. Barlow, C. Lundquist, Radiation and nitric oxide formation in turbulent non-premixed jet flames, Proceedings of the combustion institute, volume 28, (2000) pp. 447–454



# Экспериментальная установка

1. латексная оболочка
2. плексигласовая пластина диаметром 20 см
3. источник импульсного высокого напряжения
4. иглы с разрядным промежутком
5. плексигласовая трубка
6. баллона с предварительно созданной смесью
7. инфракрасная камера
8. фронт пламени
9. теневой прибор ИАБ-451
10. высокоскоростная камера
11. источник света



Параметры съемки:

Высокоскоростная камера: 300 к/с, экспозиция – 100мкс,

Инфракрасная камера: 300к/с, экспозиция 3, 5 или 10 мкс, диапазон 2 – 5,7 мкм



# Визуализация ИК-термографией

Времена экспозиции

Исходное ИК изображение

«Миликельвины»  
Диапазон: 1020-1060 мК

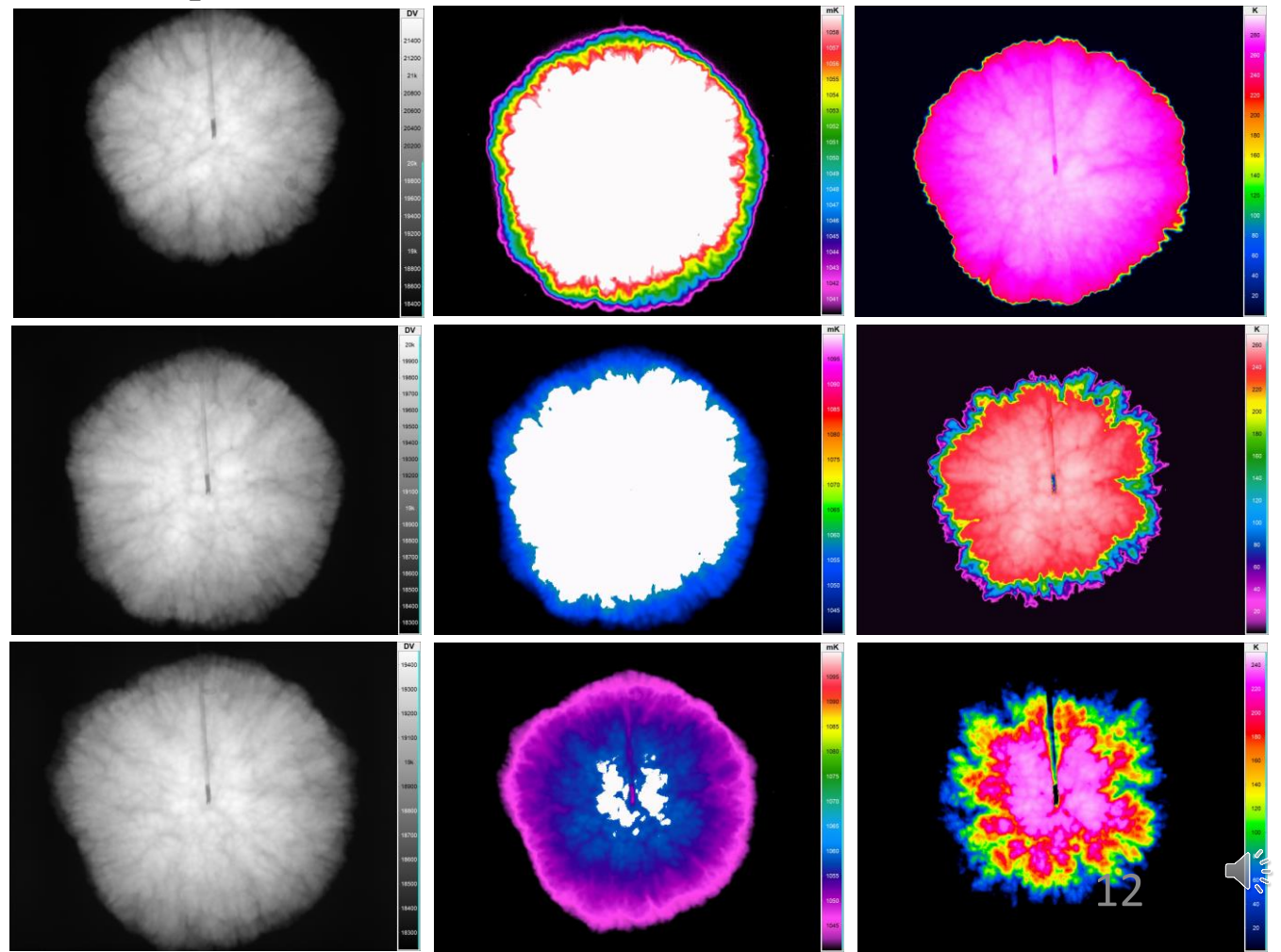
«Кельвины»  
Диапазон: 20-280К

Параметры газовой смеси:  
15% H<sub>2</sub> + 85% Air  
Скорость съемки ИК-камеры:  
300 к/с  
Диапазон: 2-5,7 мкм  
Размер матрицы: 640x512

10 мкс

5 мкс

3 мкс



Температурный диапазон представлен только как способ интерпретации изображений.

# Обработка ИК-изображений

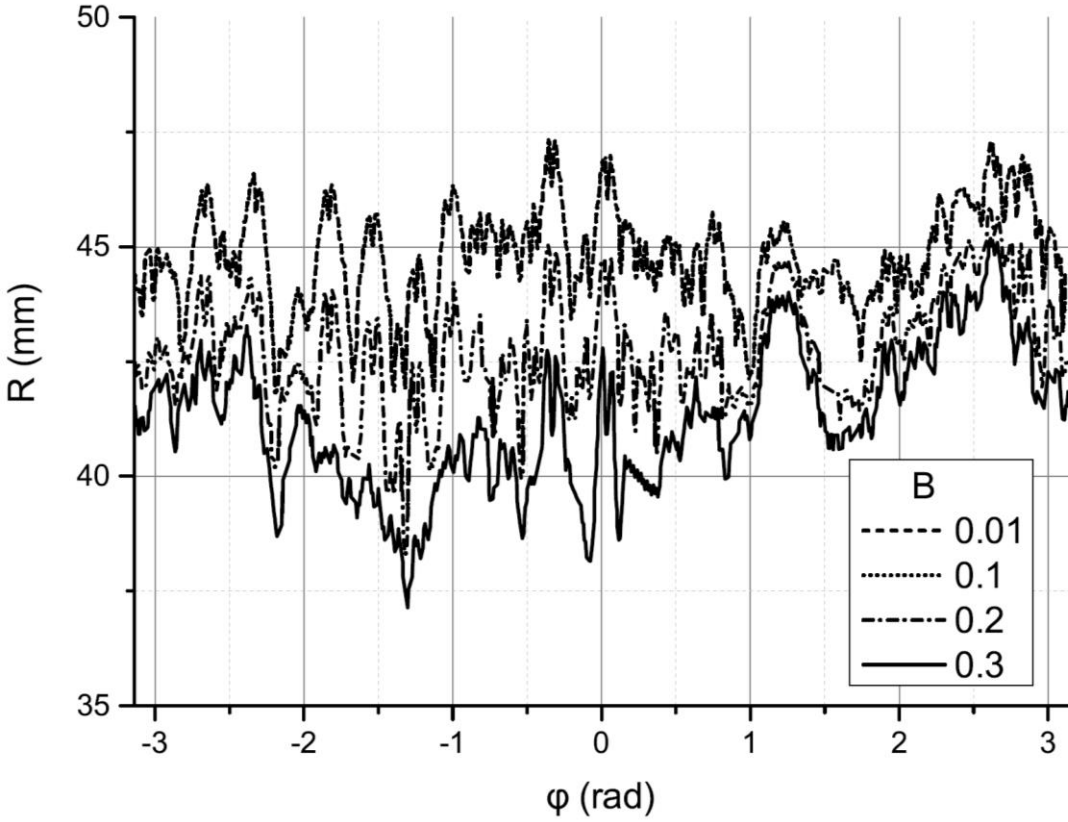


График угловой развертки фронта пламени при разных пороговых значениях бинаризации 0.01, 0,1, 0,2 и 0,3

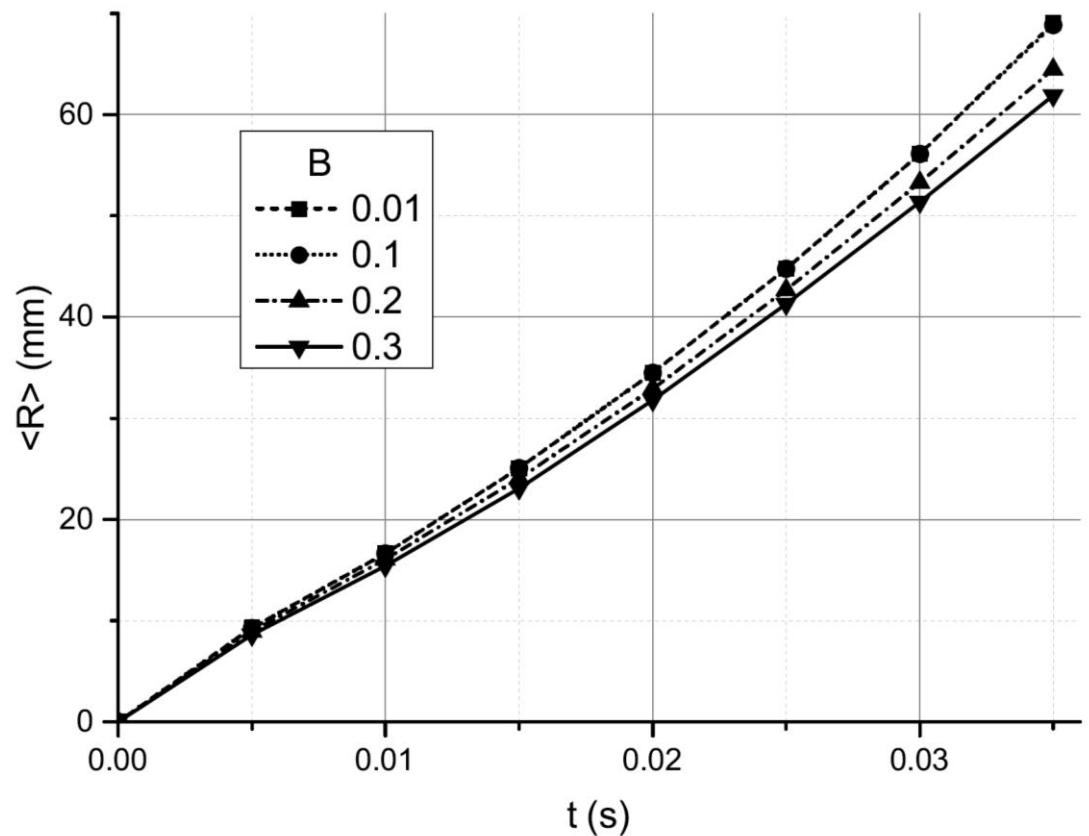


График зависимости среднего радиуса фронта пламени от времени при различных пороговых коэффициентах бинаризации 0.01, 0,1, 0,2 и 0,3

При значениях в диапазоне  $B = 0.01 \dots 0.1$  выделяемые фронты совпадают.



# Результаты экспериментов

Инфракрасные изображения

Теневые изображения

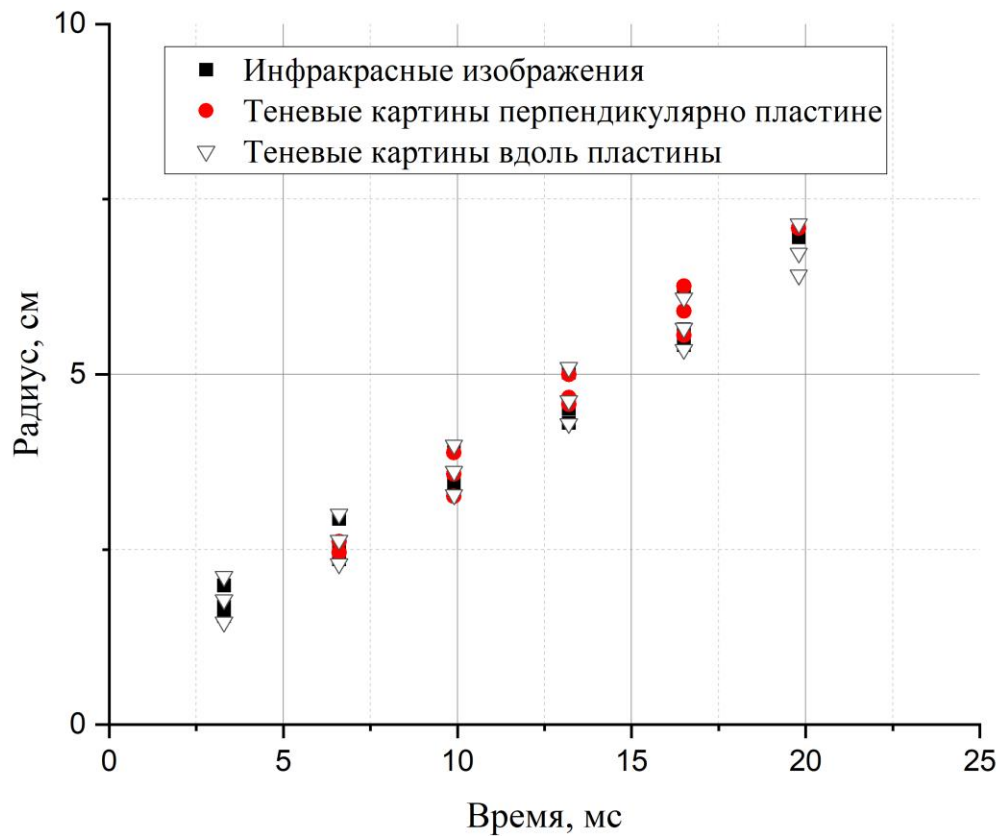
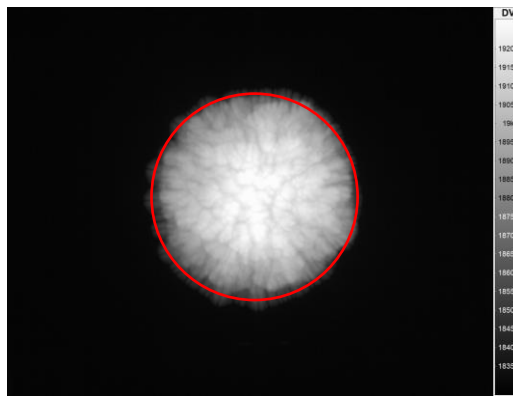


График радиусов фронта пламени на ик изображениях и теневых картинах.  
Погрешность в пределах размера точки.

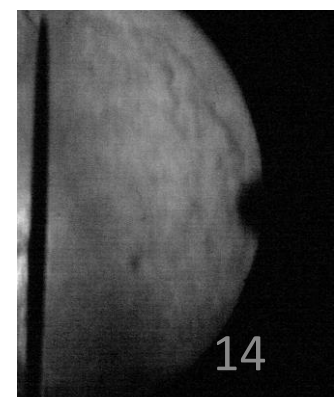
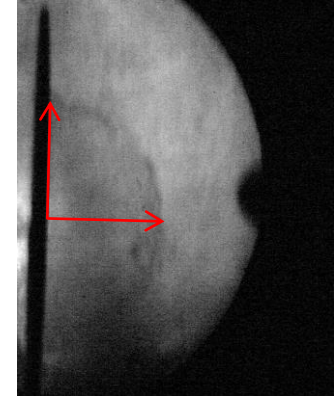
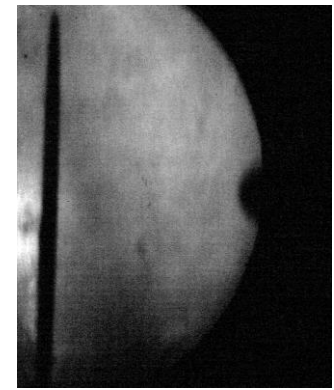
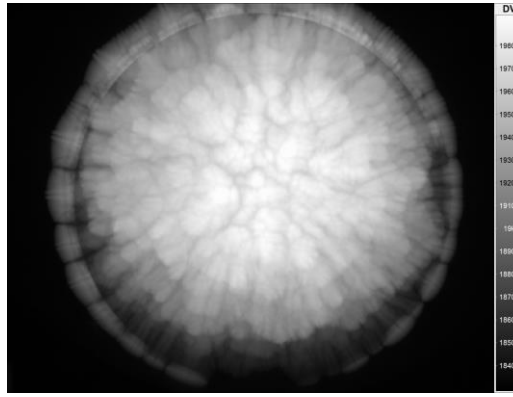
9,9 мс



19,8 мс



29,7 мс



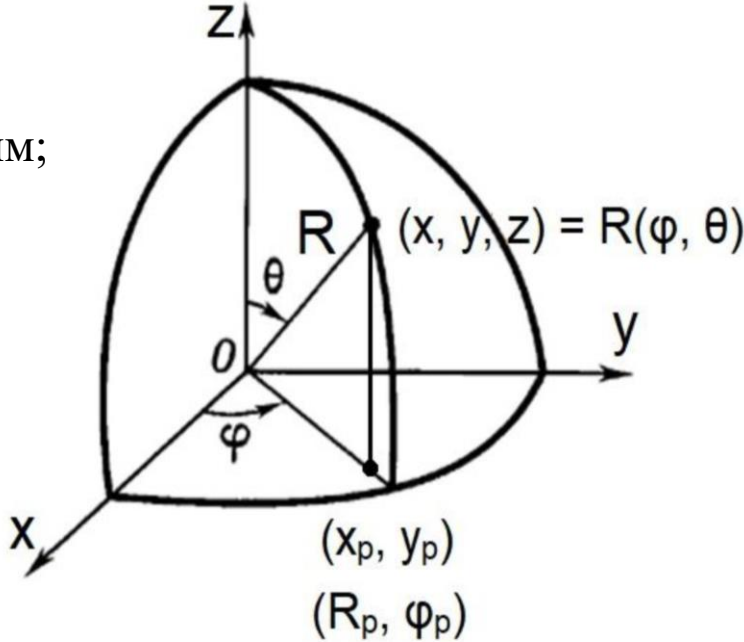
# Реконструкция трехмерного изображения

## Основные предположения

- 1) Температура и излучательная способность продуктов сгорания внутри облака изменяются незначительно;
- 2) Пламя является глобально полусферическим;
- 3) Камера находится достаточно далеко от объекта;
- 4) Выпуклости на фронте пламени являются гладкими и направлены от центра облака продуктов горения;
- 5) Облако продуктов горения представляет собой простой связанный объем.

$$R = \langle R \rangle + \text{Re} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \exp(in\varphi) + b_n \exp(in\theta)) \right]$$

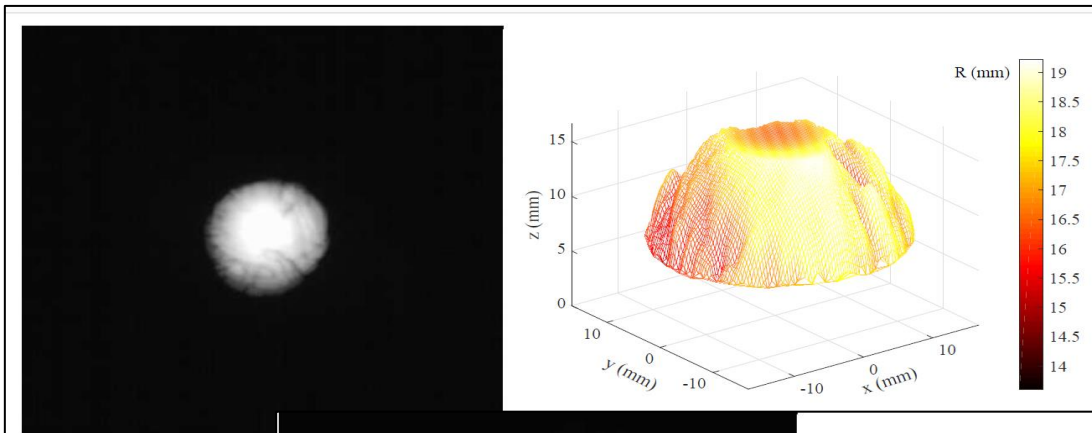
Функция границы фронта пламени



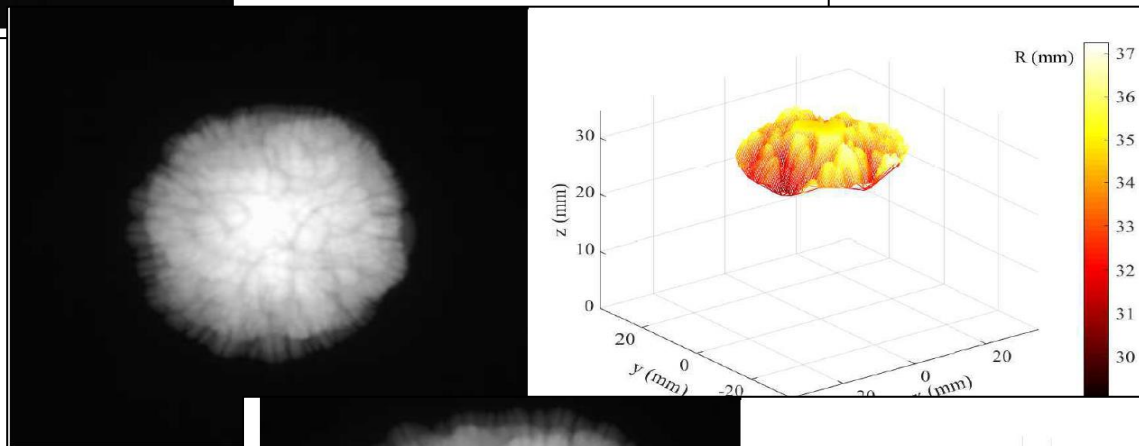
$$\begin{cases} \varphi = \varphi_p = \arctan\left(\frac{y_p}{x_p}\right) \\ R_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \\ \theta = \arctan\left(\frac{\lambda_e}{2\pi b_e}\right) \\ R(\varphi, \theta) = \sqrt{R_p^2 + z_{max}^2(x_p, y_p)} \end{cases}$$

Система уравнений для построения трехмерной картины

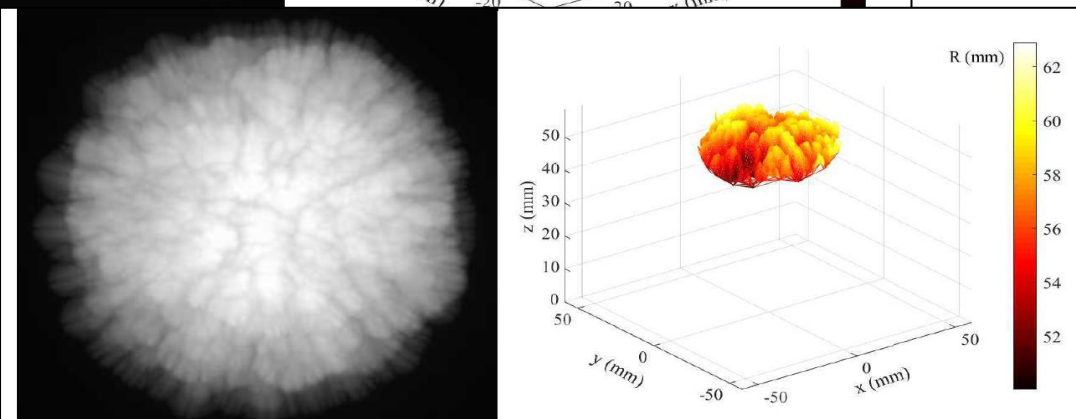
# Трёхмерные изображения фронта



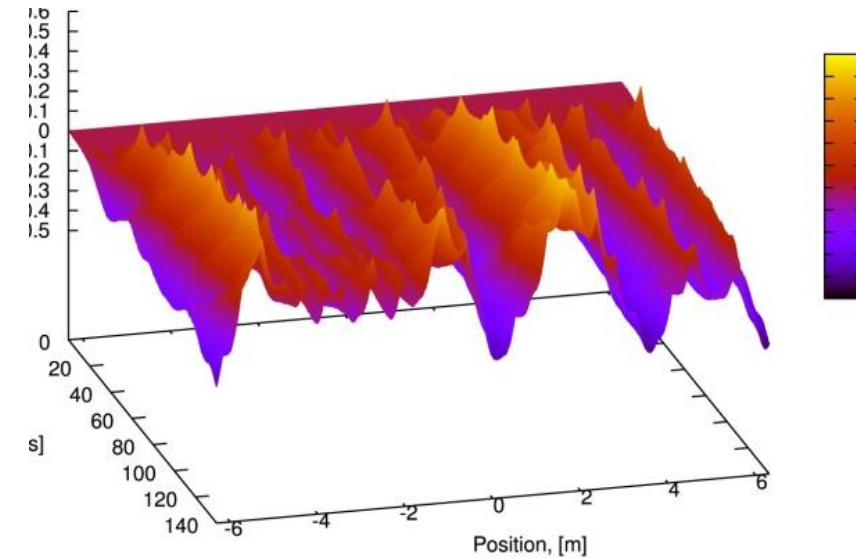
10 мс



20 мс



30 мс



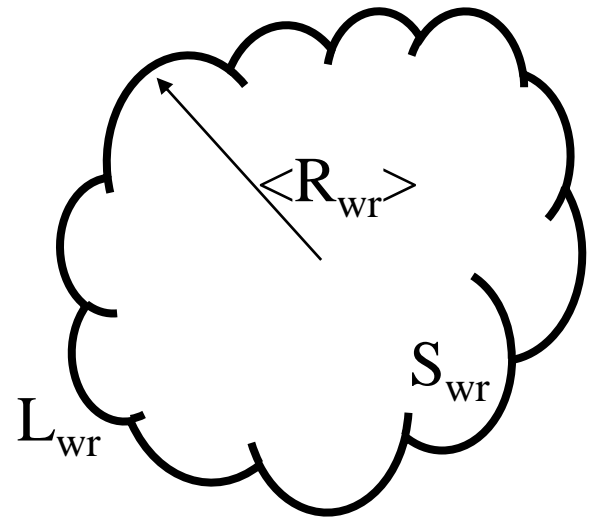
M. Kuznetsov, N. Chaumeix, J. Yanez, S. Tengah.  
Flame folding and wrinkling factor for 2D and 3D  
hydrogen-air flames, Joint meeting the German and  
Italian sections of the combustion institute (2018)





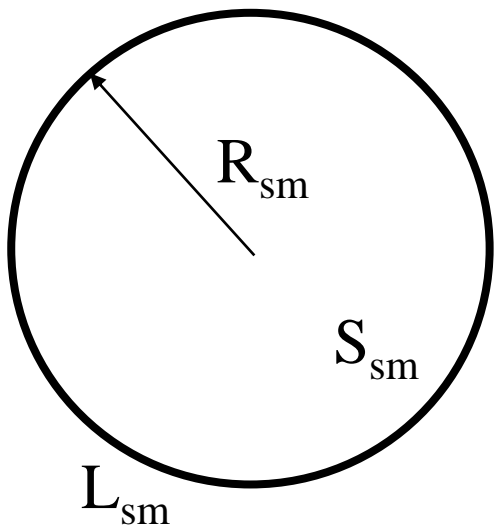
# Коэффициент складчатости

Wrinkled



$$\langle R_{wr} \rangle = R_{sm}$$

Smooth



$$E_{2D} = \frac{L_{wr}}{L_{sm}} \quad [1]$$

$$E_{3D} = \frac{S_{wr}}{S_{sm}}$$

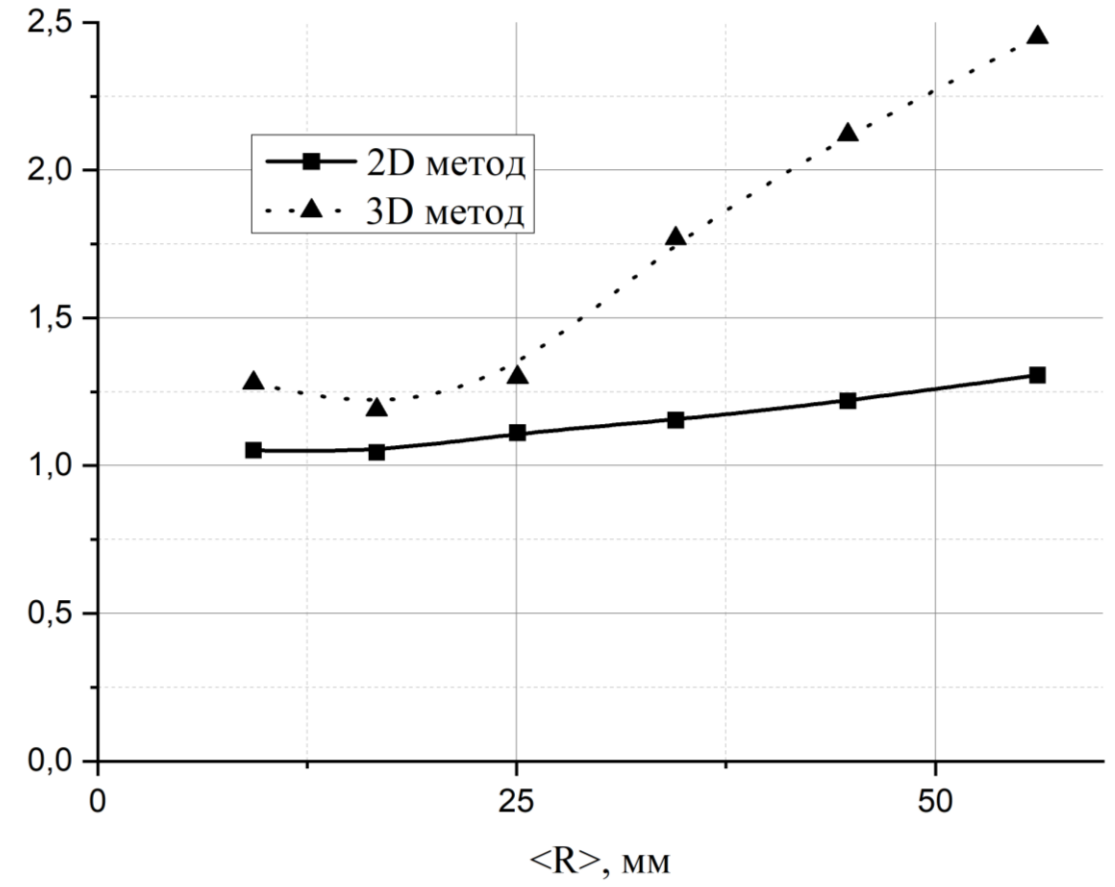


График зависимости коэффициента складчатости от радиуса фронта пламени. Водородно-воздушная смесь с 15% содержанием водорода.



# Скорость пламени

$$v_f = S_b^0 \Xi(\Theta - 1) + S_b,$$

V. Golub, A. Elyanov, A. Korobov, A. Mikushkin, V. Petukhov, V. Volodin, Influence of heat absorption on hydrogen-air flame instability, Experimental Thermal and Fluid Science 109 (2019).

Значения видимой скорости, рассчитанные с использованием коэффициента складчатости, полученного на реконструированных трехмерных поверхностях, больше экспериментальных.

Общепринятая методика расчета скорости основана на предположении о постоянной нормальной скорости фронта пламени.

Это справедливо для пламени малой кривизны, но в случае сильно изогнутого пламени нормальная скорость пламени зависит от стретч-фактора Карловица  $K$  и длины Маркштейна  $L_M$  горючей смеси.

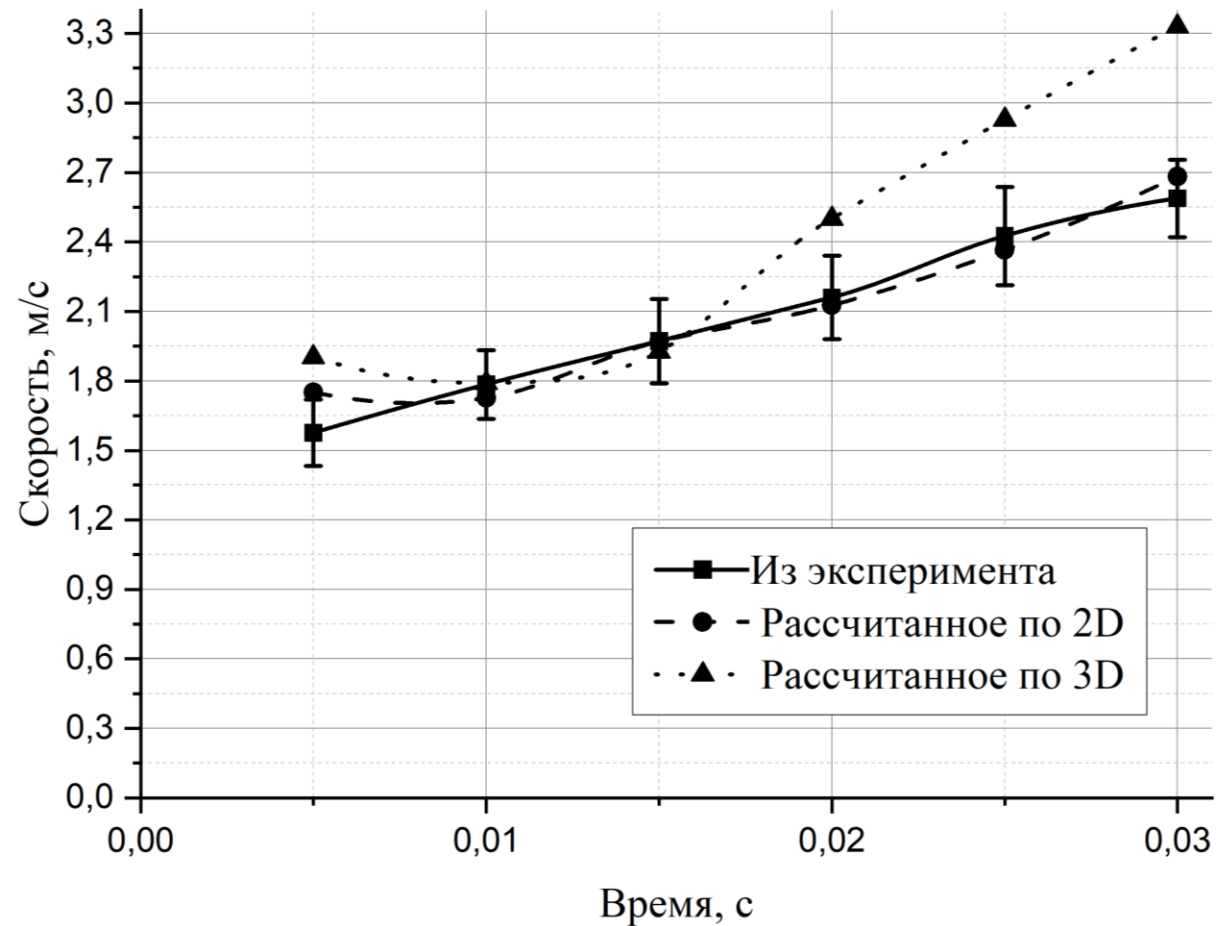


График скорости распространения фронта пламени в различные моменты времени



# Результаты и выводы

- В смеси из 15% водорода и 85% воздуха впервые получена серия мгновенных последовательных термографических изображений расширяющегося полусферического пламени в диапазоне 2 – 5,7 мкм. Измерены пространственно-временные параметры границы пламени, полученные теневым и термографическим методом.
- Разработан метод реконструкции трехмерной поверхности фронта пламени по его двумерному изображению и определены условия его применимости. Построены картины трехмерных поверхностей фронта пламени. Из построенных трехмерных поверхностей и из 2D-ИК изображений получены значения коэффициента складчатости.
- Проведено сравнение значений скорости фронта пламени, рассчитанных по коэффициенту складчатости, экспериментальными значениями. Показано, что скорость пламени, рассчитанная с использованием полученного трехмерного коэффициента складчатости поверхности, превышает измеренную; когда радиус пламени превышает 30 мм, скорость пламени, рассчитанная по трехмерному коэффициенту складчатости, превышает скорость, полученную из зависимости среднего радиуса от времени на величину до 30%.



# Публикации

- 3D surface of an unstable hydrogen-air flame, Grigory Bivol, Andrey Gavrikov, Victor Golub, Artem Elyanov, Vladislav Volodin, *Experimental Thermal and Fluid Science* – направлена в печать
- 1. **Influence of heat absorption on hydrogen-air flame instability, Golub Victor, Elyanov Artem, Korobov Andrei, Mikushkin Anton, Petukhov Vyatcheslav, Volodin Vladislav** в журнале *Experimental Thermal and Fluid Science*, том 109, с. 109845 – журнал Q1
- 2. Lean spherical hydrogen–air flames at 4 orders of magnitude in size and ignition energy, Elyanov A.E., Golub V.V., Korobov A.E., Mikushkin A.Yu, Petukhov V.A., Volodin V.V. в журнале *Journal of Physics: Conference Series*, том 1147, с. 012047 – журнал Scopus
- 3. Conditions for the development of Rayleigh-Taylor instability on the spherical flame front, Elyanov A., Golub V., Volodin V. в журнале *Journal of Physics: Conference Series*, том 1129, с. 012011 – журнал Scopus
- 4. Влияние объема водородно-воздушной газовой смеси, типа и энергии инициирования на распространение сферического фронта пламени, Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е., Коробов А.Е., Микушкин А.Ю., Петухов В.А. в журнале *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*, № 83 - журнал WOS

