

# Моделирование неустойчивостей водородного пламени и перехода к турбулентному горению

3HY 2025

Котова Ольга Георгиевна, Глазырин И.В., Михайлов Н.А., Титова А.М., Юсупов Ю.Ф.

## Режимы горения





Ronney P.D., Near-limit flame structures at low Lewis number, Combust. Flame, 1990, V 82(1), pp.1-14.url.org/10.1016/0010-2180(90)90074-2.

\*\* Denisenko V.P., Kirillov I.A., Kingsep S.S., et al Critical morphological phenomena during ultra-lean hydrogen-air combustion in closed horizontal Hele-Shaw cell, NRC "Kurchatov Institute", 2020.

## Ламинарное пламя

в 1938 г. задача решена Я.Б. Зельдовичем и Д.А. Франк-Каменецким



ФЯЦ-ВНИИТФ

плоский ламинарный фронт неустойчив ∀λ относительно **неустойчивости Ландау-Дарье -**ГД неустойчивости, связанной с тепловым расширением продуктов горения







для типичных параметров BBC:

σ=8, n=1, Le=1,  $\chi(T_n)$ =6·10<sup>-4</sup>м<sup>2</sup>/c, β=10,  $\tau_r$ =10<sup>-6</sup>c

Зельдович Я.Б., Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика, 1984, М., Наука СССР.

**3**/10

#### Моделирование развития ЛД-ДТ неустойчивостей РФЯЦ-ВНИИТФ ATOM d = 150 mm стекло 11 11 11 11 BBC h = 5 мм 75 металл искра 3D Le≈0.3 Распределение массовой доли паров воды на крышке ячейки Хеле-Шоу Le~1 Le>1



4/10

\* Denisenko V.P., Kirillov I.A., Kingsep S.S., et al Critical morphological phenomena during ultra-lean hydrogen-air combustion in closed horizontal Hele-Shaw cell, NRC "Kurchatov Institute", 2020.

### Моделирование развития ДТ-неустойчивости

5.0%



Распределение массовой доли ОН в круге r=16 мм, время  $10 \rightarrow 200$  мс

8.0%



Распределение массовой доли ОН в круге r=64 мм, время 10  $\,{\rightarrow}\,$  170 мс



### Моделирование развития ДТ-неустойчивости 3D







4% H<sub>2</sub> 15 с, d ~ 10-18 мм

7% H<sub>2</sub> 1.2 с, d ~ 85 мм

t = 0.30





изоповерхность Ү<sub>ОН</sub>=10<sup>-4</sup>

0.40

0.35

 $8\%~\text{H}_{2}$  ,  $0.2 \rightarrow 0.8~\text{c},~\text{R}$  = 256 mm

Распределение массовой доли паров воды на плоскостях симметрии

### Турбулентное пламя в каналах с препятствиями РФЯЦ-ВНИИТФ



Borghi R. In: Bruno C. Casci C. editors. Recent advances in aerospace science. NY: Plenum Press: 1985. p. 117.

Poinsot T., Veynant D., Candel S. Quenching processes and premixed turbulent combustion diagrams // J Fluid Mech. 1991. Vol. 228. Pp. 561-606.

\*\*\* Shy S.S. Lin W.J. Peng K.Z., High intensity turbulent premixed combustion: general correlations of turbulent burning velocities in a new cruciform burner, Proc Combust Inst, 2000, V.28, pp. 561-8

\*\*\*\* Böck L.R. Deflagration -to-Detonation Transition and Detonation Propagation in H2 - Air Mixtures with Transverse Concentration Gradients. Master Thesis, Technische Universität München Institut für Energieetechnic, 2015.

#### канал L = 6 м BR = 0.6Вертикальный Горизонтальный канал L = 6 м BR = 0.45





A. Veser, W. Breitung and S.B. Dorofeev Run-up distances to supersonic flames in obstacle-laden tubes // J. Phys. IVFrance 12 (2002), pp. 333-340

\*\* G. Ciccarellia, S. Dorofeev Flame acceleration and transition to detonation in ducts // Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008) 499-550

## Вертикальный канал L = 12 м BR = 0.6





8.5 %

4.0



Установление детонации в результате маховского отражения УВ от препятствия. Эксперимент (\*)





Распределение |U|. 10 % H<sub>2</sub>. Моменты времени через 50 мкс



## Заключение



#### ЛАМИНАРНОЕ ПЛАМЯ

- Имитацией горения в условиях невесомости является горение в горизонтально расположенной замкнутой ячейке
  Хеле-Шоу. Устройство позволяет изучать отдельно действие диффузионно-тепловой неустойчивости на
  динамику шарового пламени, а также определять пределы воспламеняемости в условиях микрогравитации
- В расчётах воспроизведены базовые формы двумерного пламени -- лучевое, дендритное и квазиоднородное -- в
  том же диапазоне концентраций, что и в эксперименте. Средняя скорость дрейфа очагов горения и их размер
  близки к экспериментальным значениям.
- ✓ Для получения аналогов трёхмерного пламени требуется существенное увеличение вычислительных ресурсов

### ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЛАМЯ

- ✓ В вертикально ориентированном канале горение ВВС с долей H₂ < 10% носит дискретный характер
- ✓ Удлинение ускоряющего канала привело к увеличению скорости распространения пламени и к смене режима ускорения для BBC с долей H₂ >10%
- ✓ Для выяснения истинной причины возникновения детонации при горении ВВС с низким числом Льюиса требуется системное исследование ускорения на расчётной сетке, обеспечивающей высокое разрешение, а также расчёты с различными моделями турбулентности

#### ПЛАНЫ

Численное исследование детонационных ячеек в смесях вода – водород - воздух

### Неустойчивость Рихмайера-Мешкова. Эксперимент-расчёт



РФЯЦ-ВНИИТФ

<u>А.А. Тяктев</u>, Ю.А. Пискунов, И.Л. Бугаенко, Е.С. Морозов, Н.Б. Аникин Экспериментальное исследование неустойчивости Ритмайера-Мешкова при числе Маха падающей ударной волны М≈5. «XXIII Харитоновские Тематические Научные Чтения» 03 – 07 октября 2022 г., г. Саров

### Неустойчивость Рихмайера-Мешкова. Эксперимент-расчёт



- 1-УВ в тяжелом газе,
- 2-УВ в легком газе,
- 3 –ведущей точки выпуклой поверхности УВ,4 –нижней границы тороидального вихря,
- 5 «ведущей» точки «сферической» волны, отраженной от границы раздела





РФЯЦ-ВНИИТФ