

# О НЕЭМПРИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МЕДЛЕННЫХ ПЛАМЕН В ВОДОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

**Кириллов И.А.**



*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,  
Москва, 123192, площадь Курчатова, 1*

Представлено на XVI международной конференции  
**«Забабахинские Научные Чтения 2023»**  
ФГУП «ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина»»  
г. Снежинск  
31 мая 2023

smaller indicates a mixture regarded as non-inflammable, the greater as inflammable. Conversely for the upper limit, the greater figure indicates a non-inflammable mixture, the smaller an inflammable mixture.

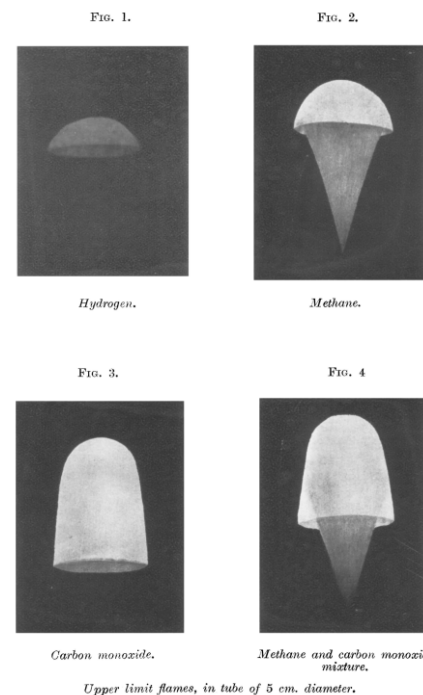
TABLE I.

*Hydrogen-Air Mixtures.*

|   | Lower limit<br>(per cent.<br>hydrogen). | Upper limit<br>(per cent.<br>hydrogen). |
|---|---|---|
| Wagner ( <i>Bayerisches Industrie und Gewerbeblatt</i> , 1876, 8, 186) .....      | 7.7—8.3                                 | 50—60                                   |
| Mallard and Le Chatelier ( <i>Annales des Mines</i> , 1883, [viii], 4, 347) ..... | 6                                       | 80                                      |
| Broockmann ( <i>J. Gasbeleuchtung</i> , 1889, 32, 189)                            | 7                                       | 75                                      |

nas attempted to discover why his results differ from earlier values, because each was preoccupied with the problem of comparing the dilution-limits of different mixtures in a chosen apparatus. It seems, too, that no observer has had the whole of the previous results before him, so that he has often been unaware of a large disagreement. Much better understanding of the problem involved might have been reached had the old observations of Humboldt and Gay Lussac not been overlooked. Perhaps, therefore, it is not useless to quote from their paper, as follows:

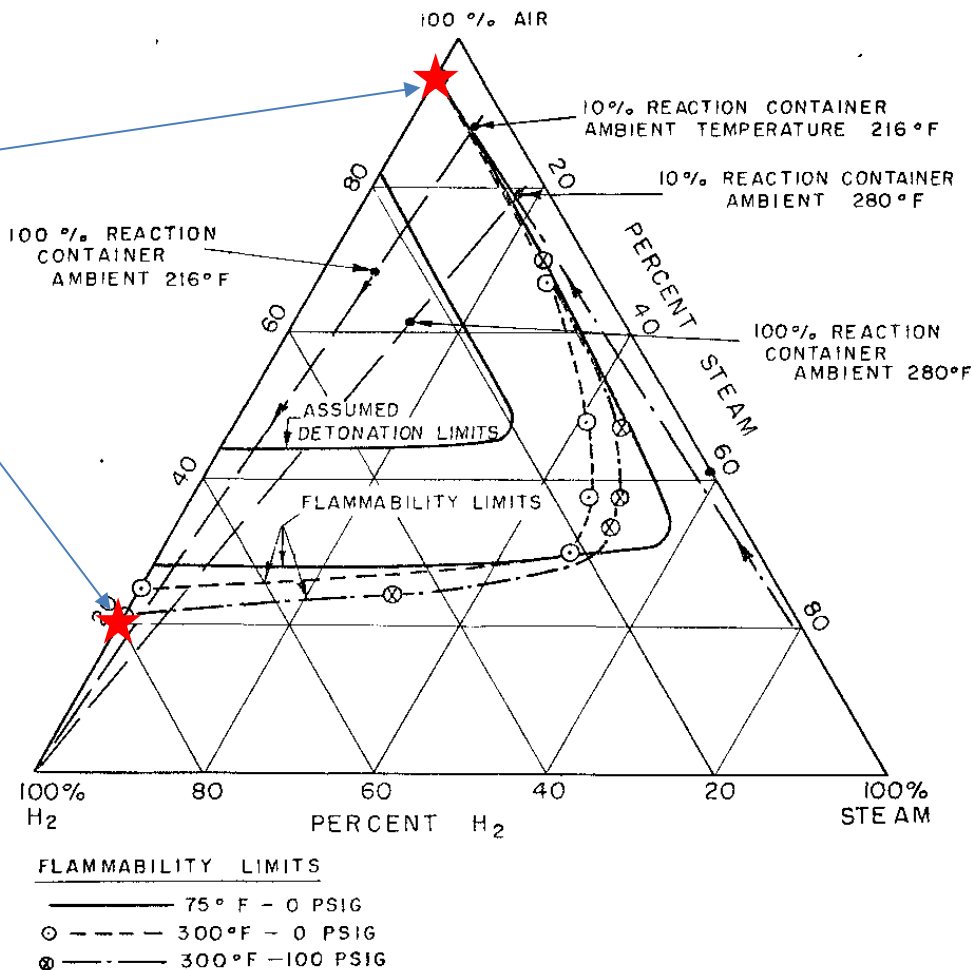
“Not only are there such proportions of hydrogen and oxygen, or of their mixture with nitrogen, or even with any other gas, that it is impossible to ignite them by means of the electric spark; but there are others with which, the inflammation having been





# Водородная безопасность: представление о режимах горения в 1950-ых: дефлаграционные и детонационные пламена

Coward, 1914



Shapiro-Moffette, 1957

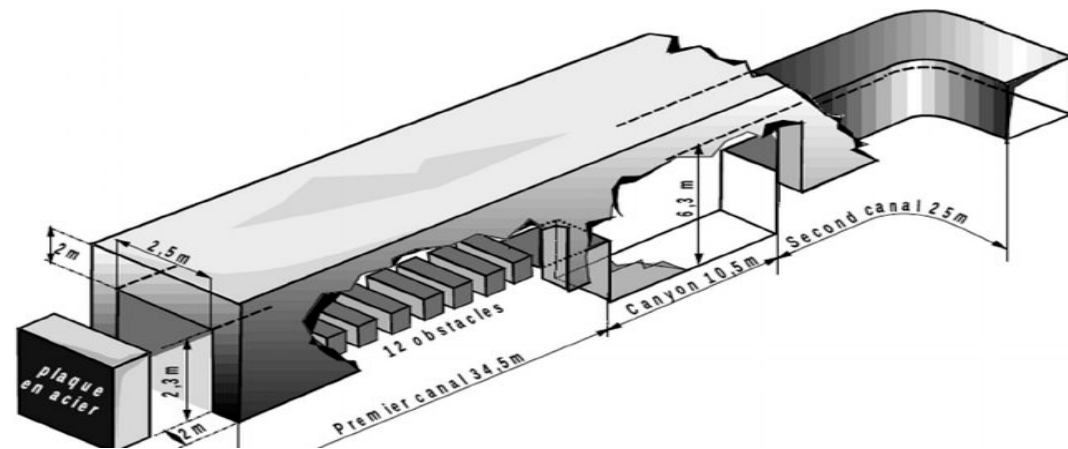


# Водородная безопасность: расширение знаний после аварии на АЭС ТМІ-2 : Крупномасштабные эксперименты в США и СССР (1980-1990 г.г.)

Лаборатория Сандия



Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова

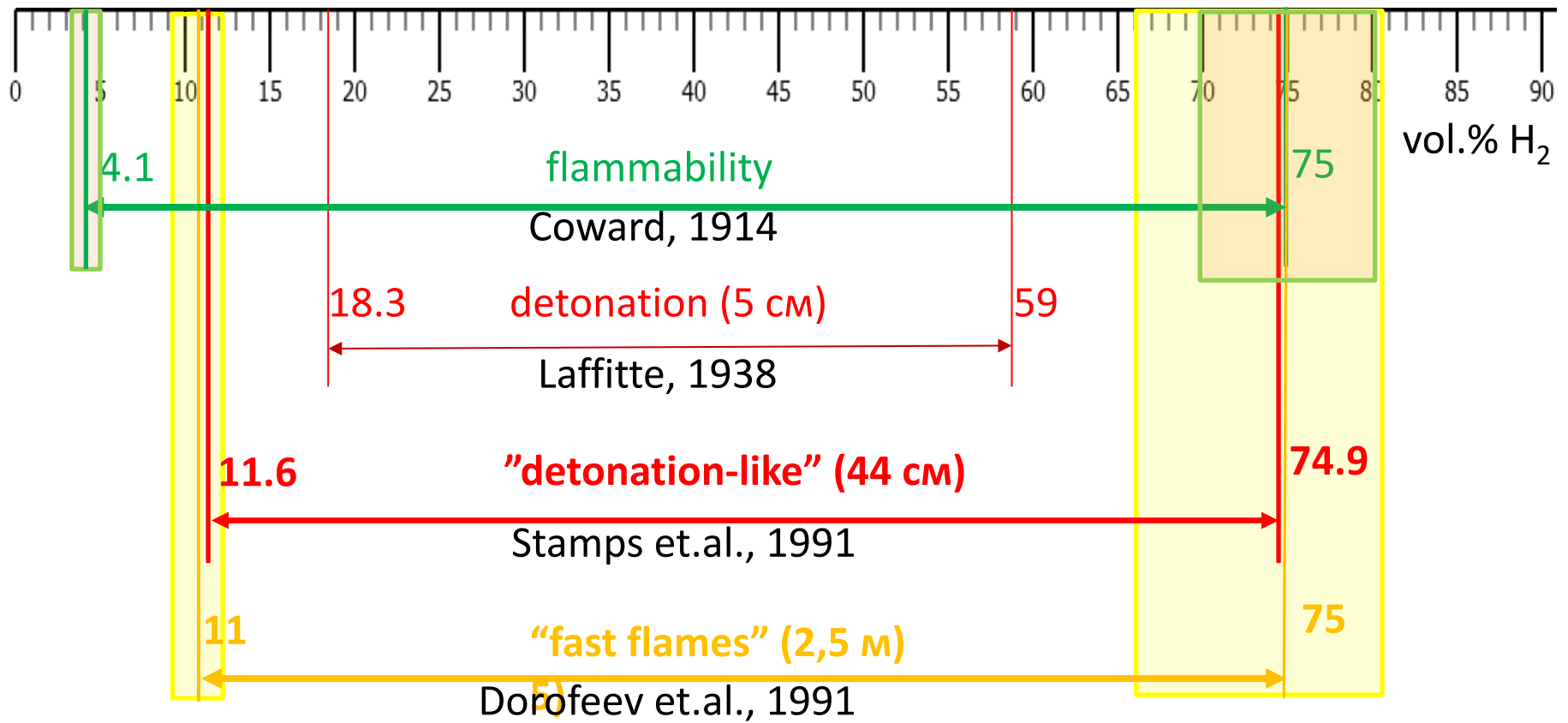


1. Принципиальное отличие газовых взрывов от взрывов КВВ – возможность «мягкого» инициирования детонации путем ускорения пламен (Flame Acceleration) и перехода горения в детонацию (Deflagration-to-Detonation-Transition)
2. Разрушительное действие «быстрых пламен» аналогично действию детонационных пламен
2. Эффекты масштаба -
  - зависимость концентрационных и
  - геометрических пределов пределовот характерного размера полуограниченного или замкнутого пространства



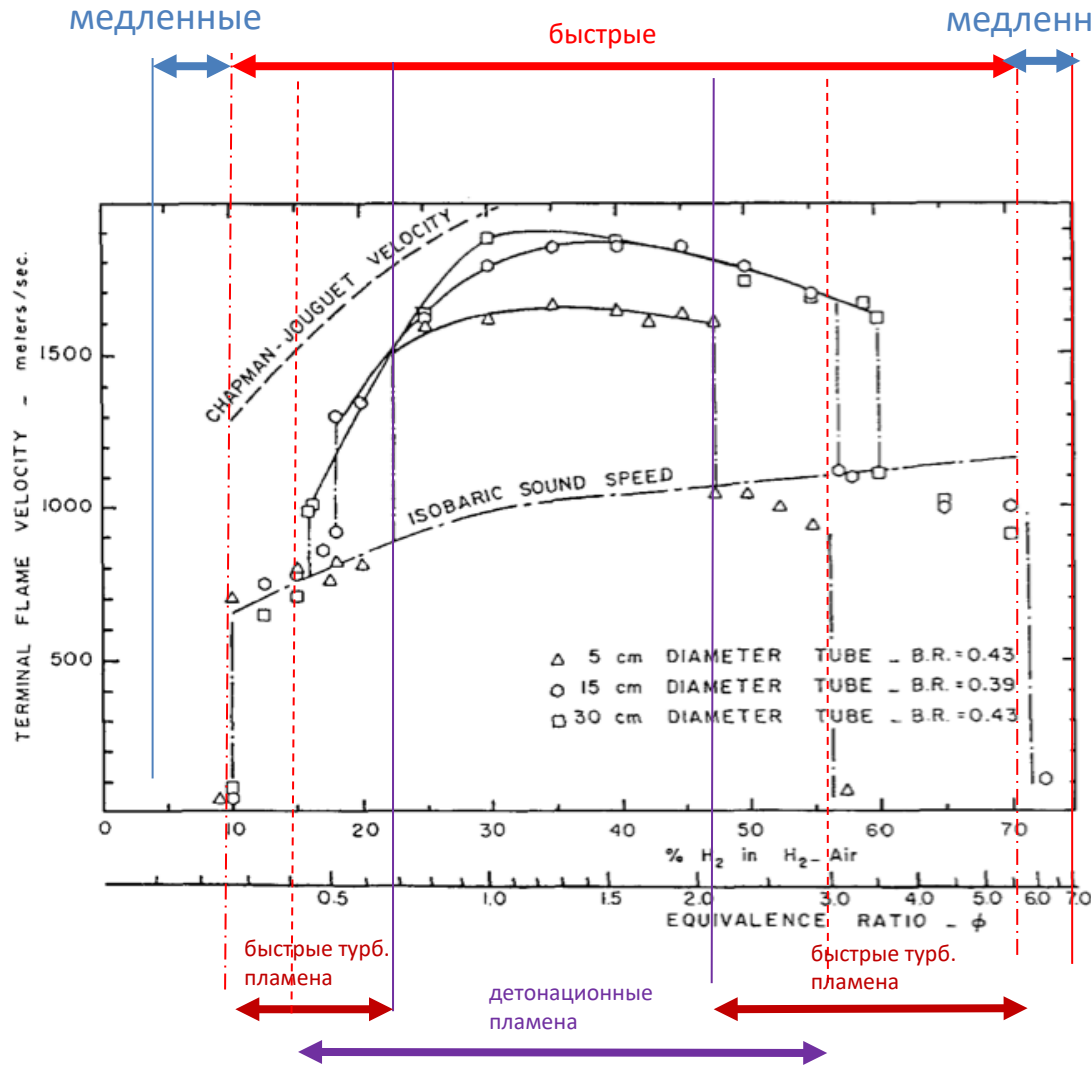


# Водородная безопасность: представление о режимах горения в 1990-ых

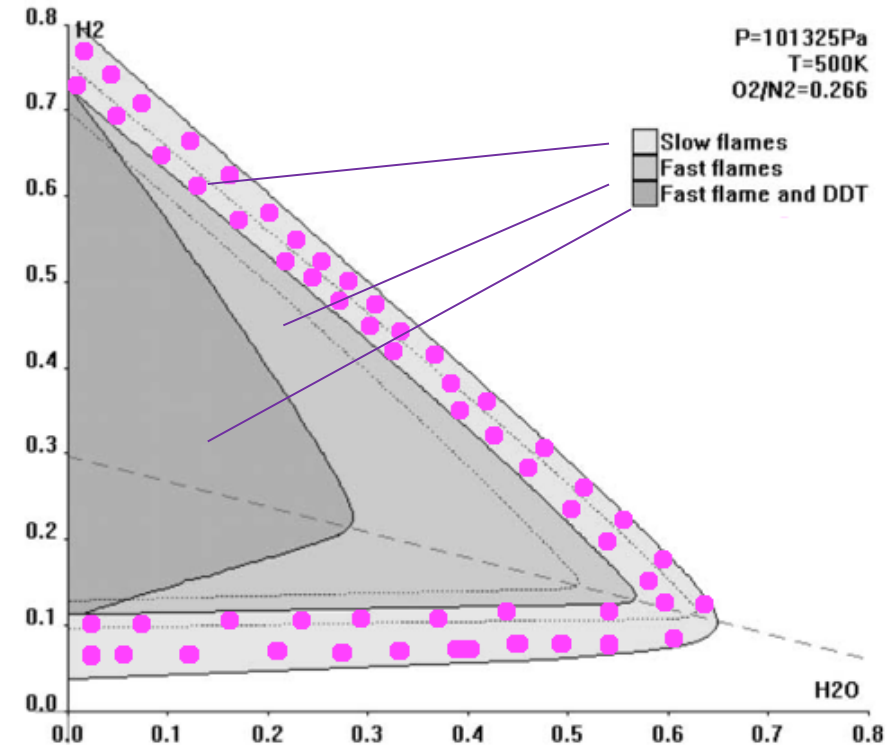




# Водородная безопасность: представление о концентрационных пределах «медленных» и «быстрых» пламен в 1990-ых



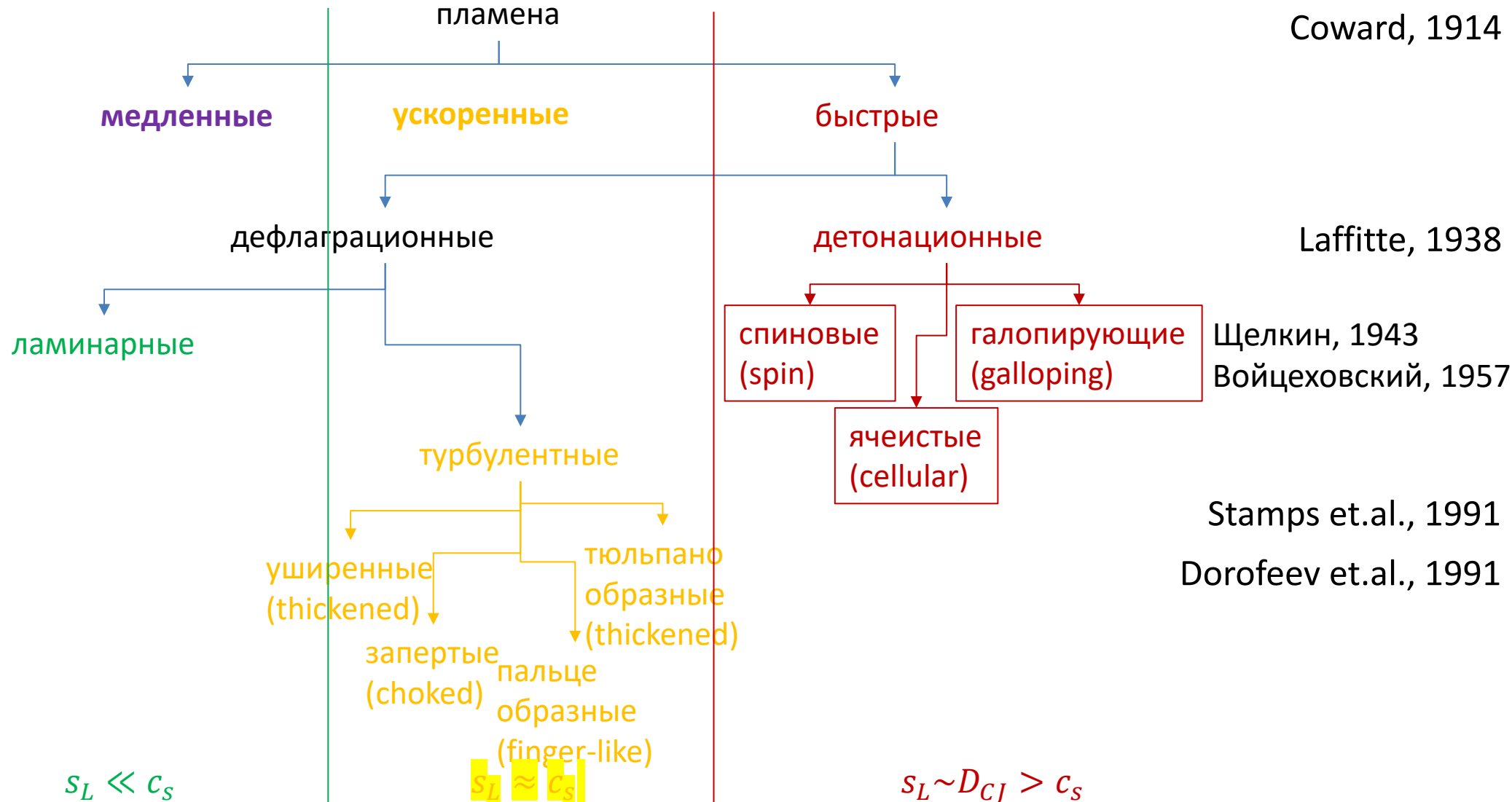
Peraldi, Knystautus, Lee 1986



Dorofeev et.al., 2001



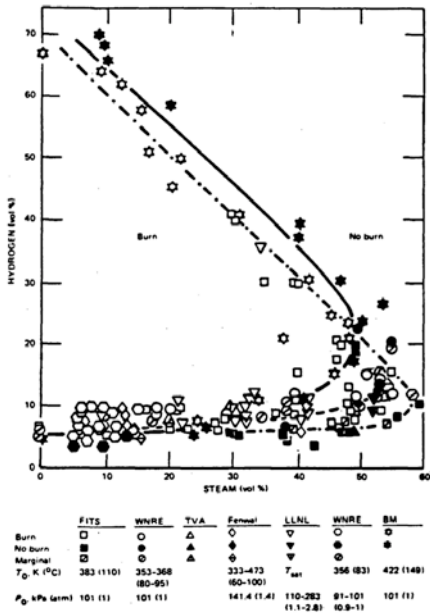
# Эмпирическая классификация пламен в перемешанных водородо-воздушных смесях



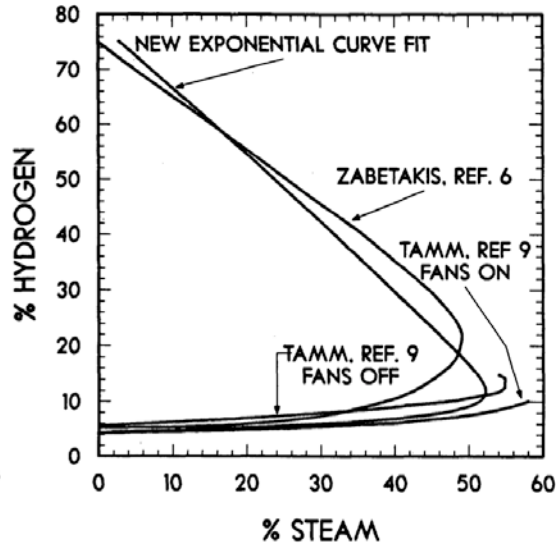
Единственный критерий сравнения – соотношение скорости фронта пламени и скорости звука в продуктах горения



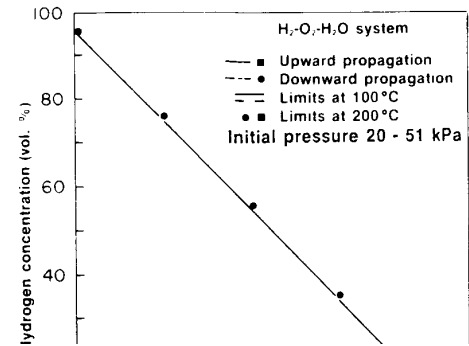
# Проблема (практическая): неопределенность в значении концентрации паров воды, при которой полностью флегматизируется распространение восходящих и нисходящих пламен



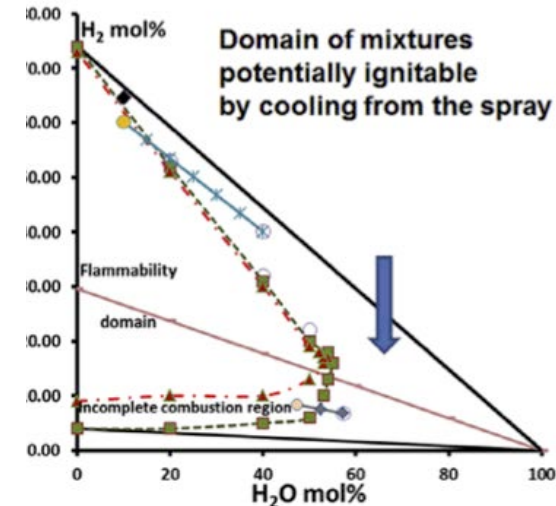
Marshall et al. 1986



Stamps et al. 1991



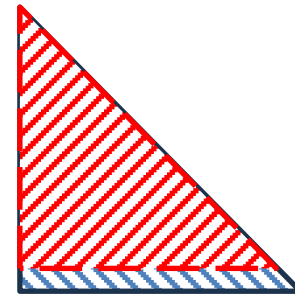
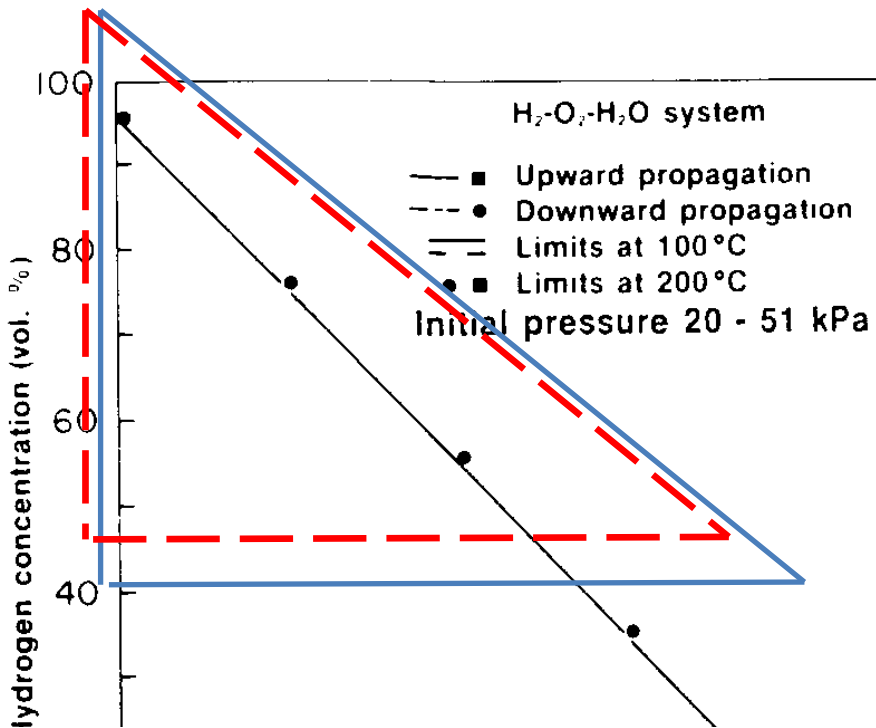
Kumar 1985



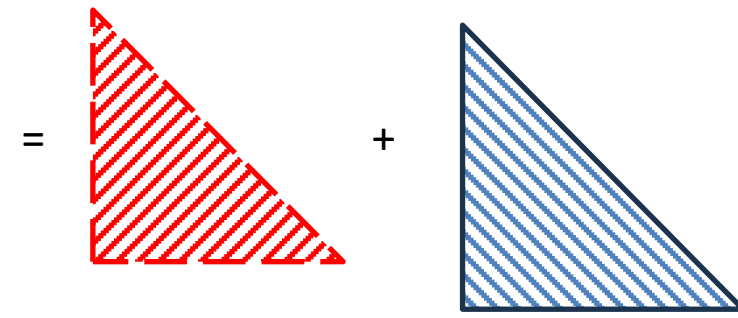
Cheikhvat H. et al. 2015



# Проблема (научная): ограниченность понимания типов и характеристик «медленных» пламен, способных распространяться внутри концентрационных пределов воспламенения



эмпирическая точка зрения:  
«медленные» пламена  
нисходящие      восходящие



эмпирическая точка зрения:  
«медленные» пламена  
нисходящие      восходящие

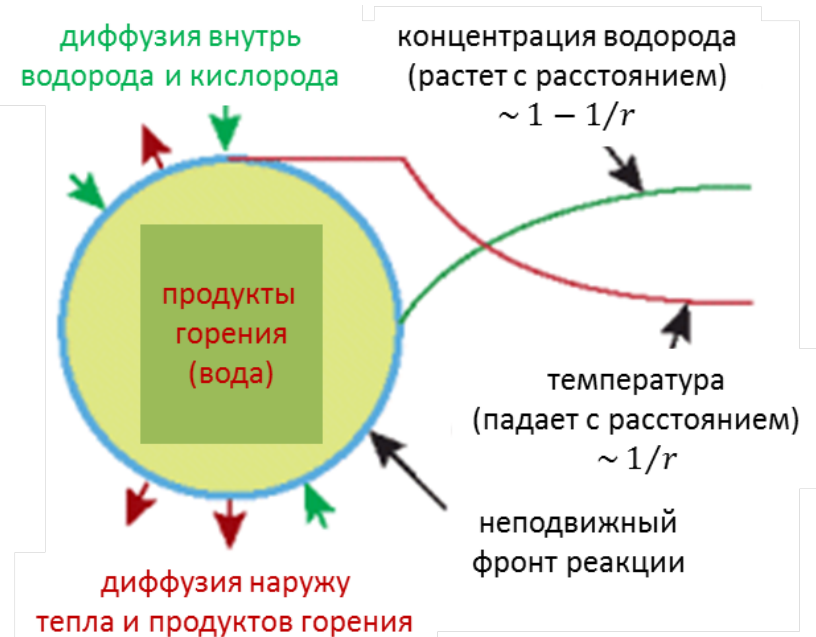
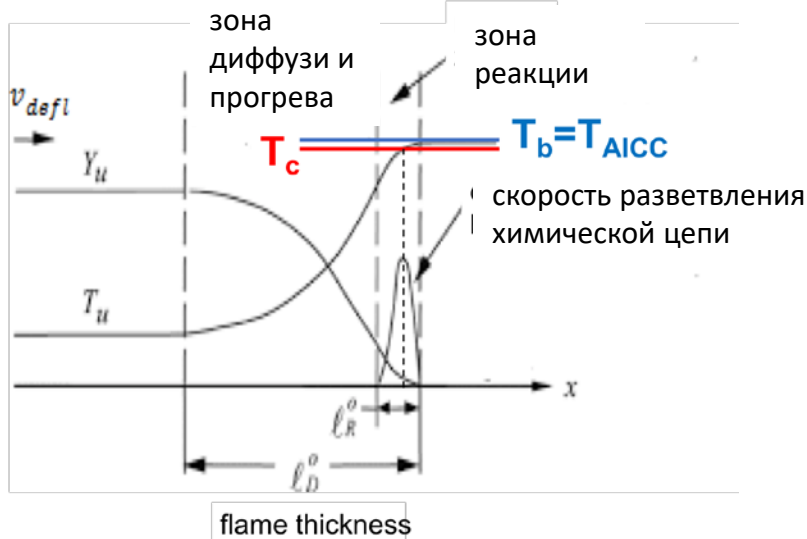


# Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

## Гипотеза 1: Две основополагающих (порождающих) модели для перемешанных водородо-воздушных пламен (два генотипа)

модель Зельдовича-Франк-Каменецкого для самораспространяющихся, локально плоских дефлаграционных пламен  
1938

модель Зельдовича для стационарных сферических пламен  
1944





## Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

**Гипотеза 2:** Концентрационные пределы для шаровых пламен определяются двумя типами неустойчивостей к 1) асимметричным и 2) сферически симметричным

возмущениям

sumed to be large ( $\theta \rightarrow \infty$ ). The product  $\theta(T_b - T_*) \rightarrow \infty$  as  $r_*/R_z \rightarrow \infty$  and the solution is not uniformly valid, an issue that is of interest to us (see below).

Figure 2 shows important stability boundaries predicted by analysis when  $Le < 1$ ,  $(1 - Le) \gg 1/\theta$ . The entire lower branch is unstable to one-dimensional (spherically symmetric) disturbances, and so is non-physical. That part of the upper branch for which  $r_*/R_z > e^{5/2}$  is unstable to three-dimensional disturbances. Theory predicts the formation of unsteady prolate spheroids in the neighborhood of the lat-

3. саморазветвляющиеся ШП

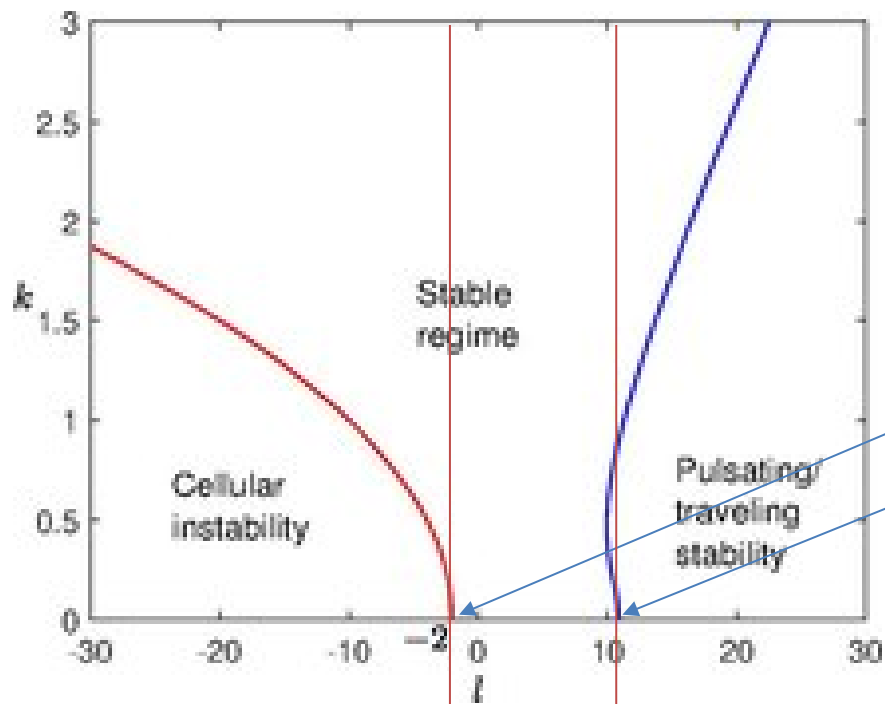
2. самоподдерживающиеся ШП («холодные гиганты»)

1. самозатухающие ШП («горячие карлики»)



## Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

**Гипотеза 3:** Концентрационные пределы для плоских дефлаграционных пламен определяются двумя типами диффузионно-тепловой неустойчивости при изменении числа Льюиса ( $Le$ ) и числа Зельдовича ( $Ze$ ) смеси



- 1) бифуркация Тьюринга (переход к ячеистым пламенам) и
- 2) бифуркация Хопфа (переход к пульсирующим пламенам)

$$l \equiv \frac{Le - 1}{Ze}$$

$$Ze = \frac{E_a}{RT_b} \frac{T_b - T_u}{T_b}$$

1. ячеистые дефлаграционные пламена

2. гладкие (несморщенные) дефлаграционные пламена

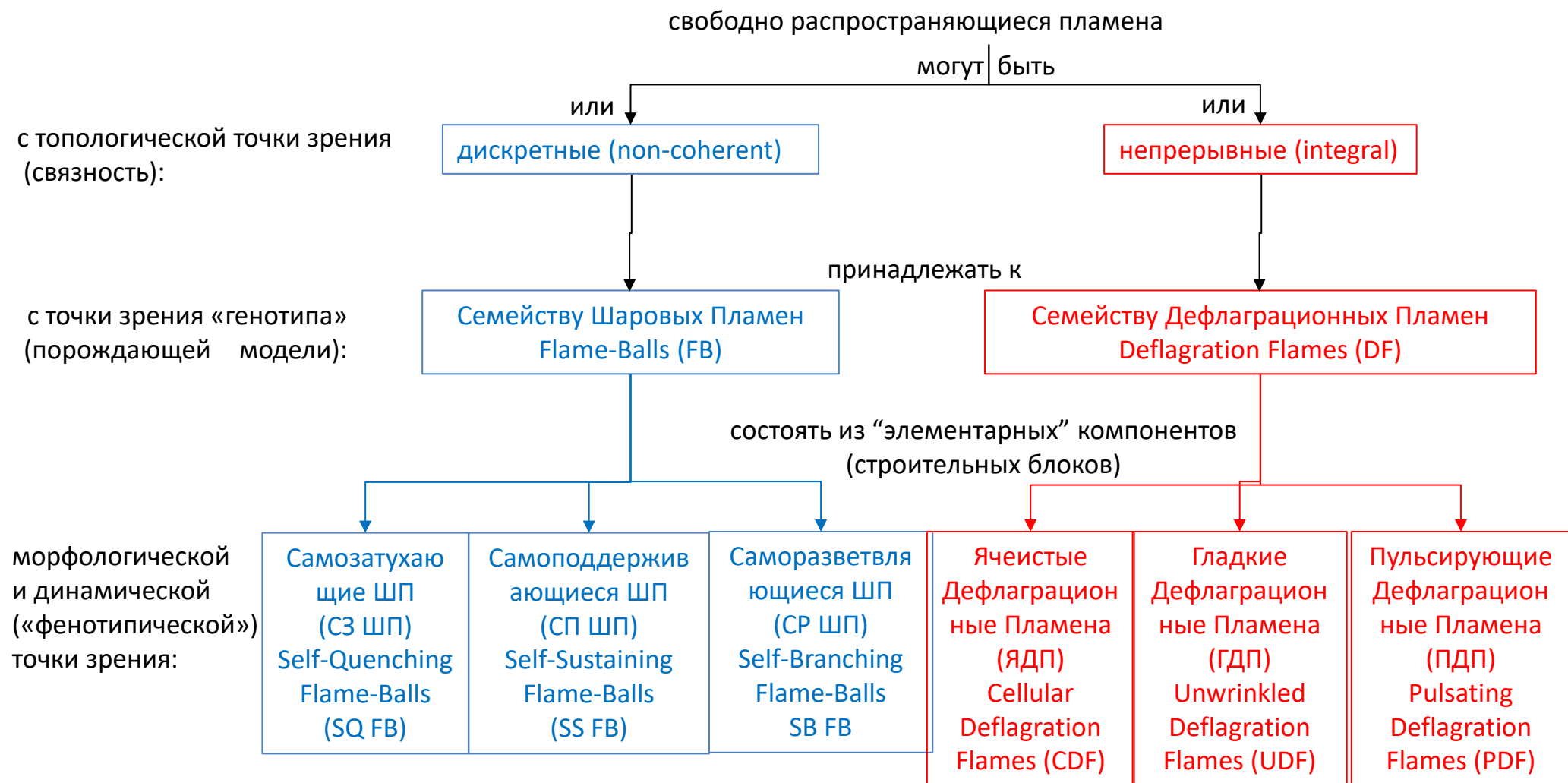
3. пульсирующие дефлаграционные пламена





# Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

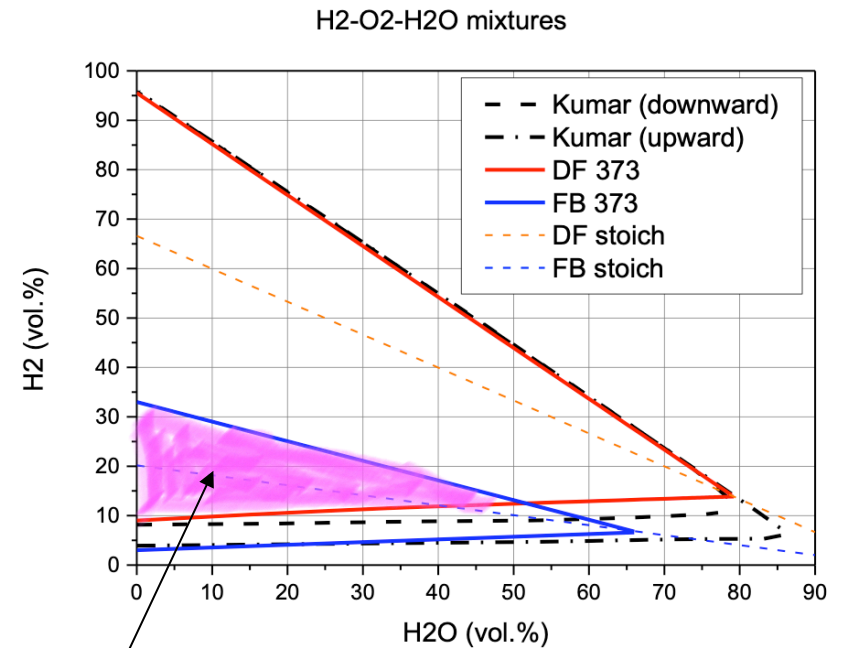
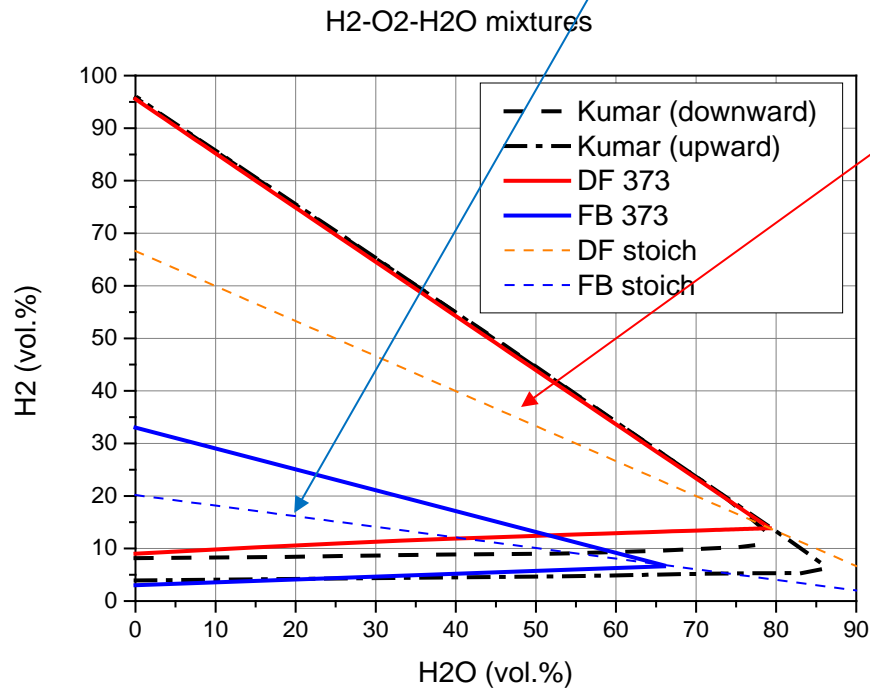
**Гипотеза 4:** Внутри концентрационных пределов воспламенения водородных смесей существует **два семейства** и **шесть фенотипов** медленных пламен





# Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

**Гипотеза 5:** Концентрационные пределы плоских дефлаграционных пламен и сферических шаровых пламен можно оценить в рамках кинетико-термодинамической модели

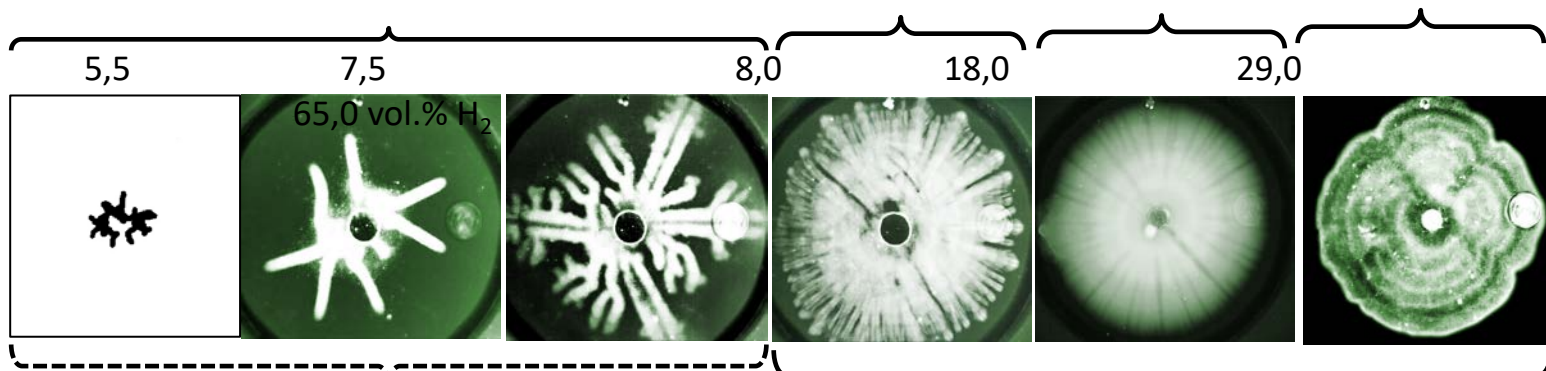


Что происходит в области пересечения ?



# Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

Экспериментальное подтверждение 1: морфология медленных цилиндрически расширяющихся пламен в горизонтальной ячейке Хеле-Шоу (стенд «Канал» НИЦ КИ)



топологический тип:

дискретные (non-coherent) пламена

непрерывные (integral) пламена

структура фронта реакции:

система дискретных Дрейфующих Шаровых Пламен

система дефлаграционных дуг

структурные компоненты фронта:



ячеистые

гладкие

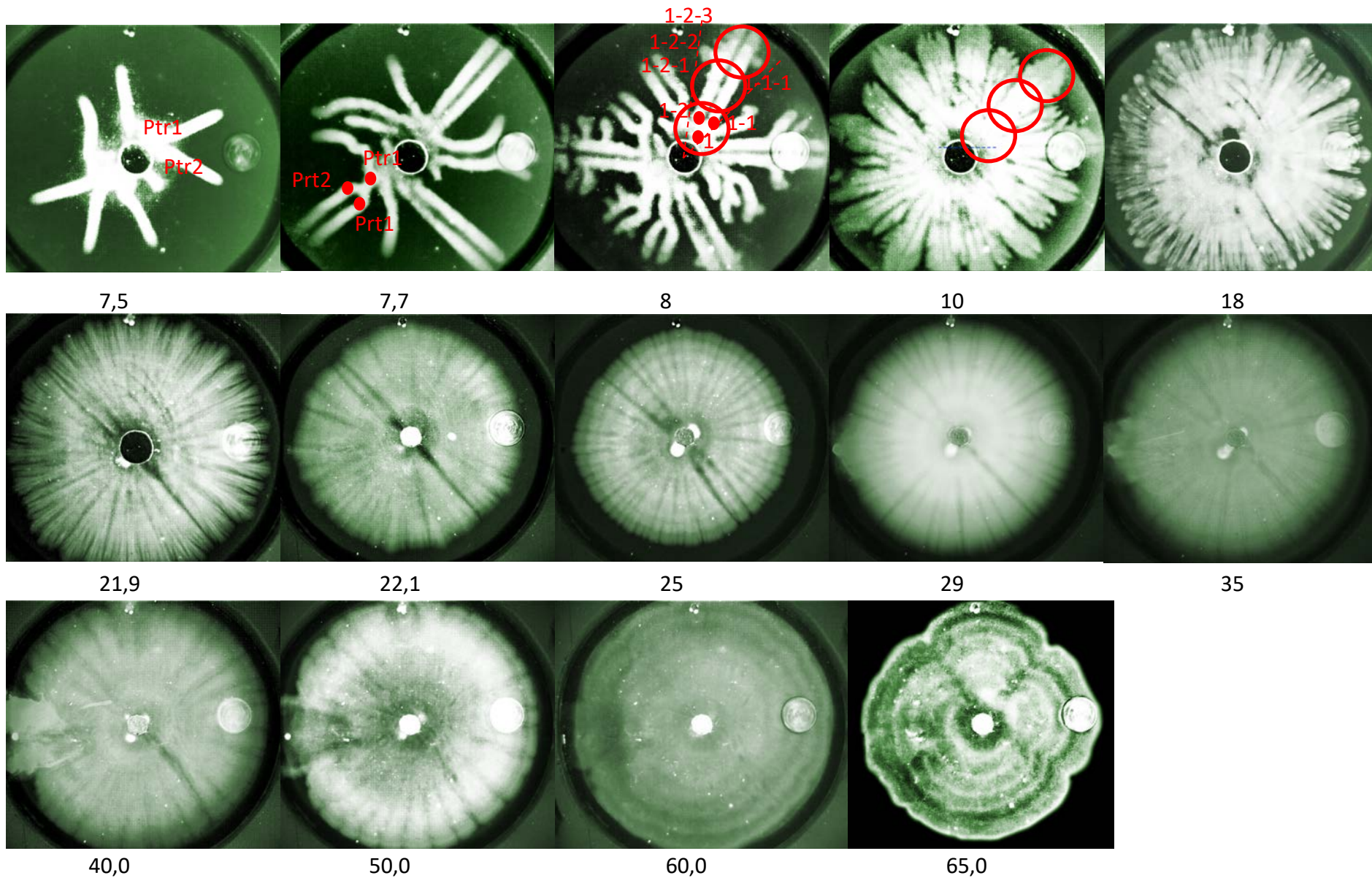
пульсирующие

Дефлаграционные Пламена



# Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

Экспериментальный факт 1: Онтогенез медленных цилиндрически расширяющихся пламен в горизонтальной ячейке Хеле-Шоу (стенд «Канал» НИЦ КИ)







# Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

Экспериментальный факт 2: Ячеистые пламена – как система сильно взаимодействующих Дрейфующих Саморазветвляющихся Шаровых Пламен

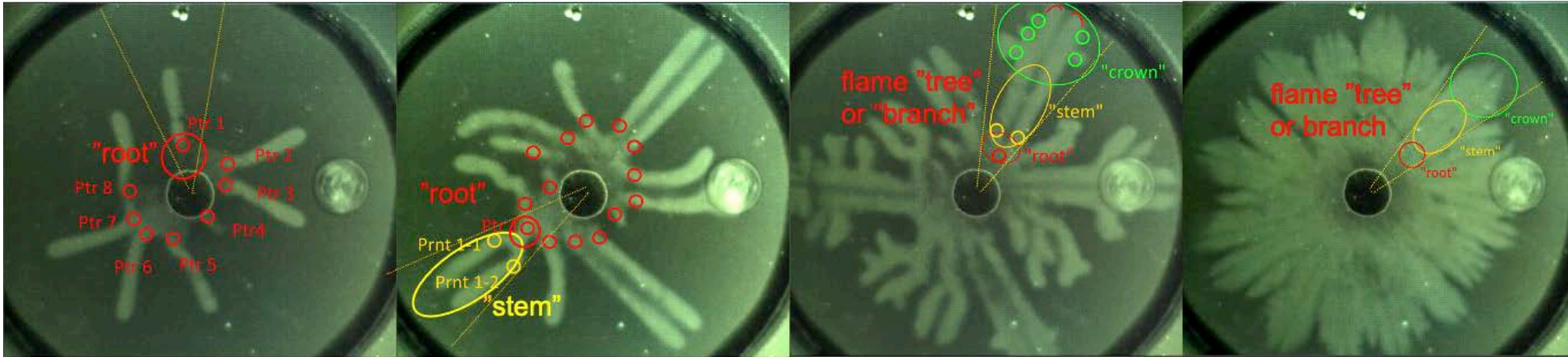
7,5

7,7

8,0

10,0

vol.% H<sub>2</sub>

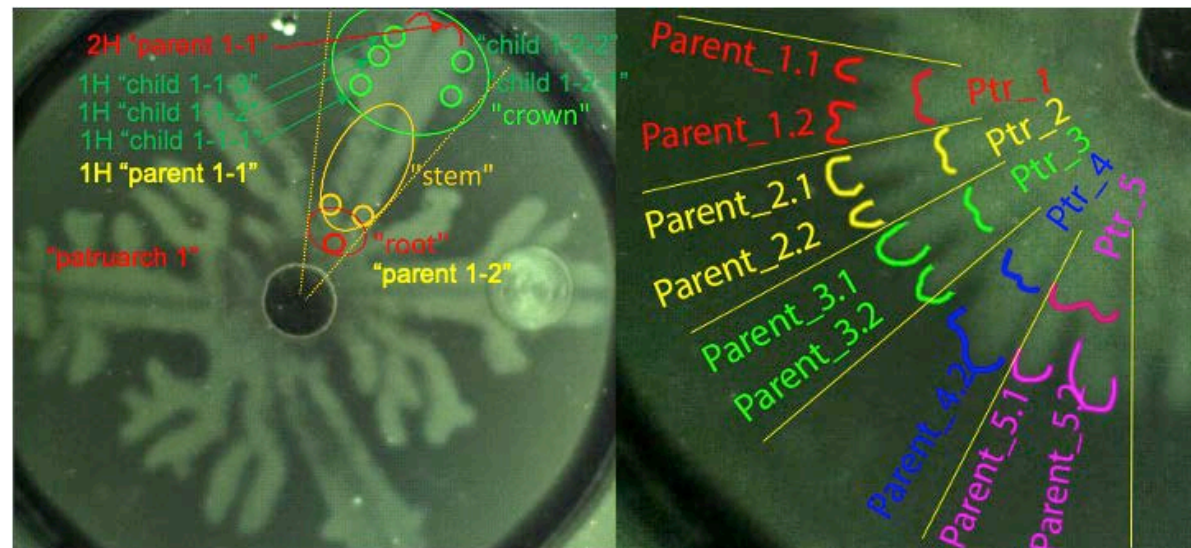


a)

b)

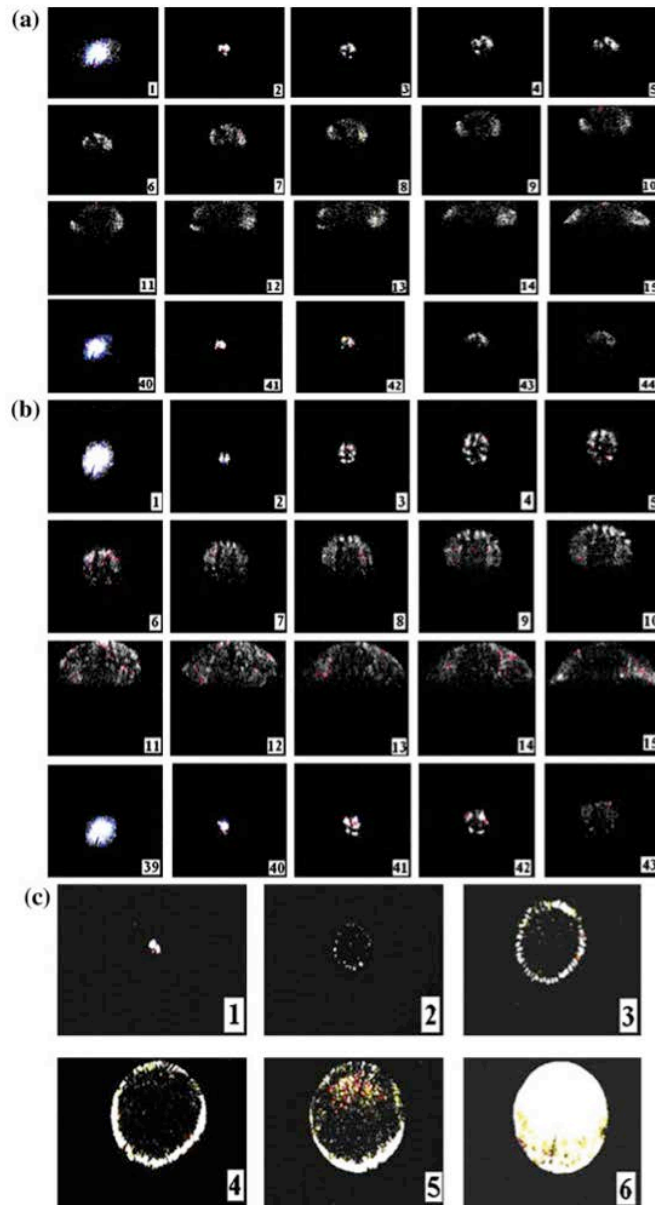
c)

d)





**Теоретическая (неэмпирическая) классификация** пламен:  
Экспериментальное подтверждение 2: визуализация медленных сферически расширяющихся ультра-бедных пламен в поле силы тяжести



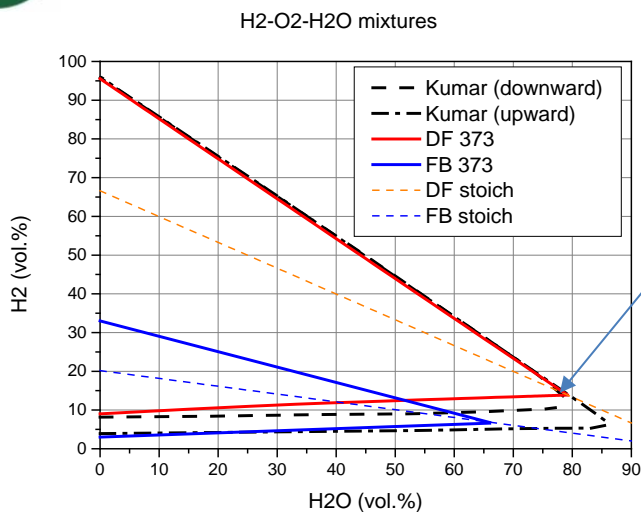
- a) 4%  $\text{CCl}_4$ +7,5%  $\text{H}_2$ + 88,5% air
- b) 4%  $\text{CCl}_4$ +8,0%  $\text{H}_2$ + 88,0% air,
- c) 4%  $\text{CCl}_4$ +11,0%  $\text{H}_2$ + 85,0% air

Rubtsov, N.M., The Modes of Gaseous Combustion,  
Springer, 2016, 309 p



# Теоретическая (неэмпирическая) классификация пламен:

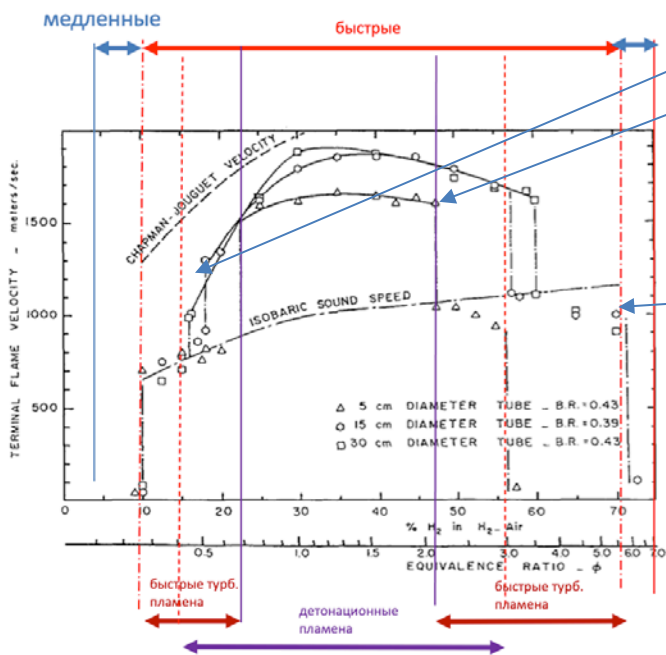
Требования к дополнительным экспериментам (эмпирическим и/или численным)



1. Образцовое измерение концентрационных пределов флегматизации Дефлаграционных Пламен в стехиометрических смесях «водород-кислород-водяной пар» для прямой оценки значения коэффициента Шаперона (эффективности третьего тела) для реакции  $H+O_2+M \rightarrow HO_2 + M$

2. Экспериментальное исследование зависимости концентрационных пределов для переходов –  
1) ячеистых-в-гладкие пламена и  
2) гладких-в-пульсирующие пламена

3. Экспериментальное исследование верхнего концентрационного предела ускорения пламен, распространяющихся вверх в богатых водородо-воздушных смесях



Peraldi, Knystautus, Lee 1986



## ВЫВОДЫ:

1. Предложена неэмпирическая классификация медленных водородных пламен, которая, в первую очередь, учитывает топологические и морфологические характеристики пламен и, как следствие, динамику (скорость, ускорение) фронта реакции.
2. На основе анализа неустойчивостей шаровых пламен и плоских дефлаграционных пламен выдвинута гипотеза о том, что внутри концентрационных пределов воспламенения водородных смесей возможно существование только шести фенотипов пламен.
3. Описаны прямые экспериментальные доказательства существования шести морфотипов медленных водородных пламен в горизонтальной ячейке Хеле-Шоу.
4. Описаны прямые экспериментальные свидетельства в пользу представления о ячеистых пламенах – как системы сильно взаимодействующих дрейфующих шаровых пламен.
5. Предложены дополнительные эксперименты (физические или вычислительные), предназначенные для уточнения предложенной неэмпирической классификации медленных пламен и ее расширение на быстрые пламена.