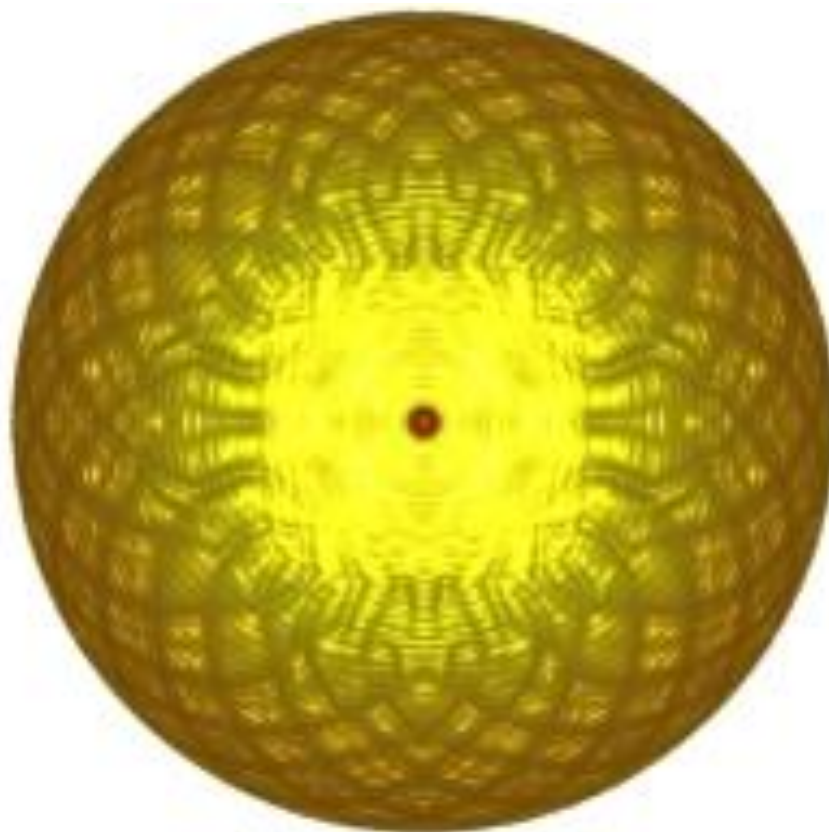




РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Ученый Совет, 21.11.2011

Иванов М.Ф.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ



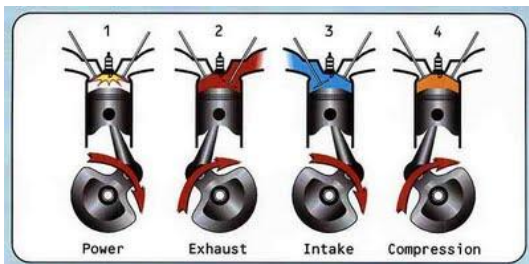
План доклада

- Введение
- Фундаментальные задачи и методы их решения
- Воспламенение горючей смеси
- Ускорение пламени и самоподдерживающийся переход к детонации
- Динамика пламен в ограниченных объемах. Взаимодействие с ударными волнами. Стук. Кумулятивные эффекты
- Развитие детонации
- Заключение

Введение

Сложные гидродинамические явления лежат в основе работы различных технических устройств и технологических процессов.

ЭНЕРГЕТИКА И ДВИГАТЕЛИ
ДОБЫЧА, ТРАНСПОРТ, ХРАНЕНИЕ
ПОЖАРО и ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ



Фундаментальные задачи

- 1. Инициирование волны реакции**
- 2. Нестационарное развитие волны горения**
 - Ускорение пламени и генерация ударных волн
 - Переход горения в детонацию
- 3. Нестационарное развитие детонации**
 - Пересжатая детонация
 - Разрушение детонации
- 4. Взаимодействие ударных волн со стенками объема и фронтом реакции**

История становления физики горения газов

Михельсон В.А., 1890г. – измерение скорости и ускорения пламени

Семенов Н.Н., 1930г. – теория цепных реакций, тепловая теория горения

Франк-Каменецкий Д.А., 1939г. – теория стационарного горения

Щелкин К.И., 1939г. – возникновение детонации в каналах, турбулизаторы

Ландау Л.Д., Darrieus G., 1944г. – гидродинамическая неустойчивость фронта пламени

Зельдович Я.Б., 1947г. – механизм ускорения пламени в канале и формирование детонации

Markstein G.H., 1951г. – диффузионно-тепловая неустойчивость фронта пламени

Саламандра Г.Д., Баженова Т.В., Набоко И.М., 1959г. – генерация пламенем ударных волн и переход в детонацию

Зельдович Я.Б., 1970г. – спонтанная волна реакции

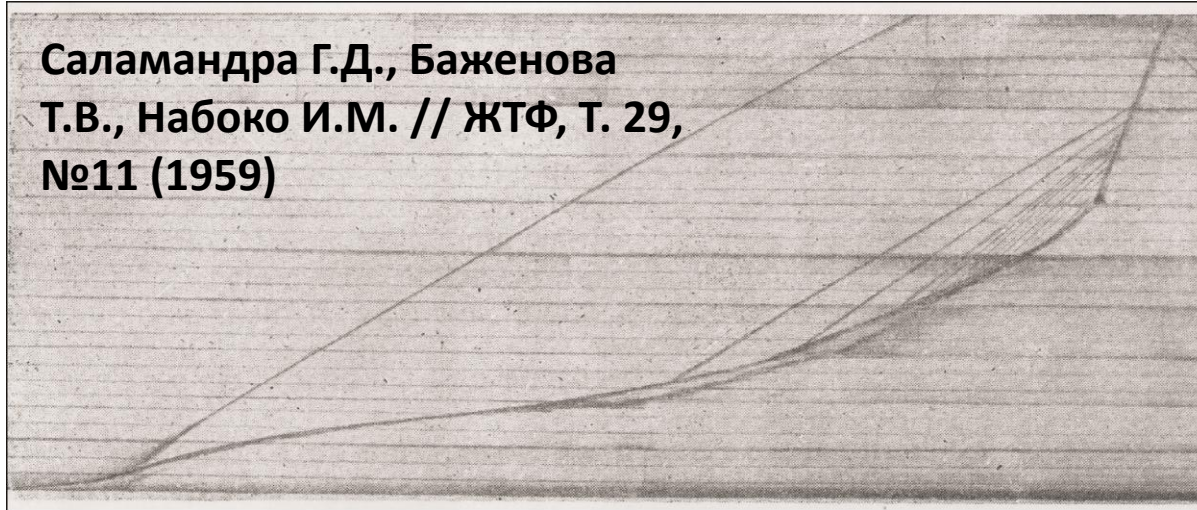
Гостинцев Ю.А., Истратов А.Г. 1988г. – автомодельный режим распространения пламени

Boris J., Oran E., 1980-90гг. – применение высокопроизводительных ЭВМ и разработка кодов для моделирования процессов горения

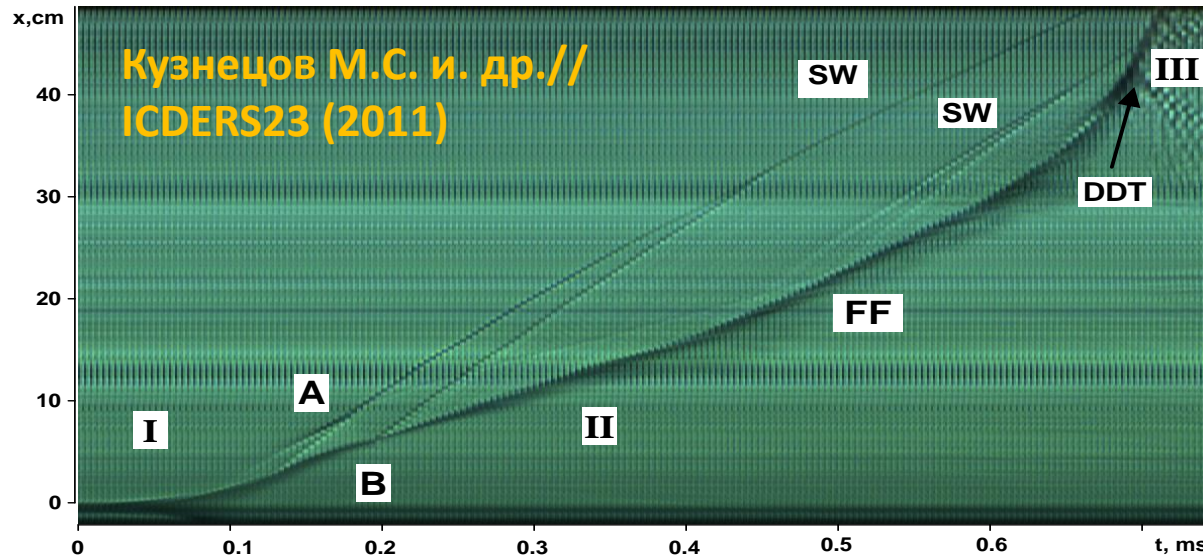
Экспериментальные методики

на примере исследования ПГД в водород-кислородной смеси

Саламандра Г.Д., Баженова
Т.В., Набоко И.М. // ЖТФ, Т. 29,
№11 (1959)



Экспериментальных наблюдений и теоретических оценок в виду естественных ограничений оказывается недостаточно для построения последовательной теории протекания столь сложных явлений как нестационарное горение.



Математическая модель

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad \text{①}$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u \frac{\partial c_i}{\partial x} + v \frac{\partial c_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_i \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) \right] + V_{i chem} \quad \text{②}$$

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad \text{③}$$

$$p = \tilde{R} T n = \left(\sum_i \frac{\tilde{R}}{m_i} c_i \right) \rho T \quad \text{⑤}$$

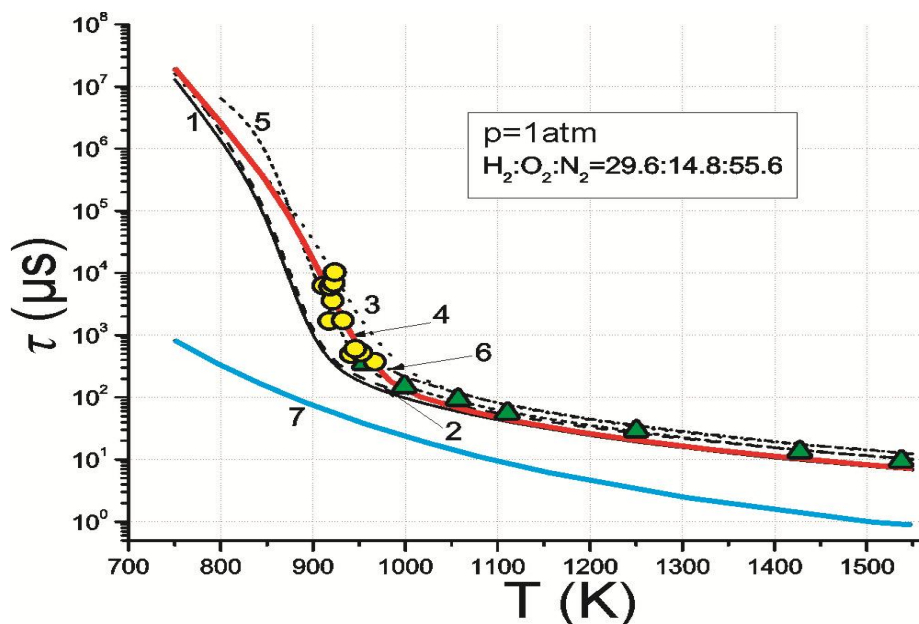
$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial z} \right) &= - \left(\frac{\partial(pu)}{\partial x} + \frac{\partial(pv)}{\partial z} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_{xx} u + \sigma_{xz} v) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_{zx} u + \sigma_{zz} v) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ &+ \sum_k \frac{h_k}{m_k} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_k(T) \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_k(T) \frac{\partial c_k}{\partial z} \right) \right) \end{aligned} \quad \text{④}$$

$$\varepsilon = c_v T + \sum_k h_k c_k \quad \text{⑥}$$

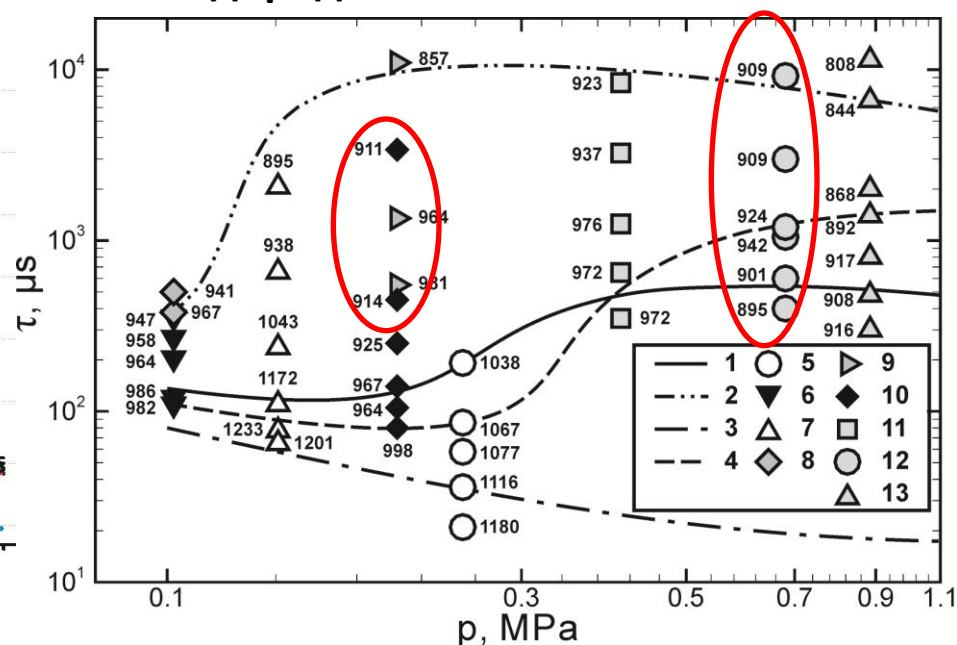
Уравнения состояния и коэффициентов переноса рассчитаны согласно экспериментальным табличным данным.

Особенности математического моделирования

Кинетика окисления водорода

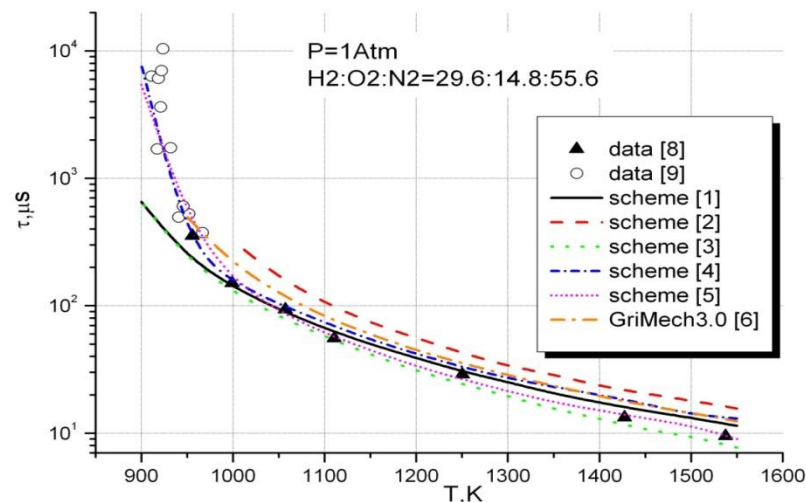
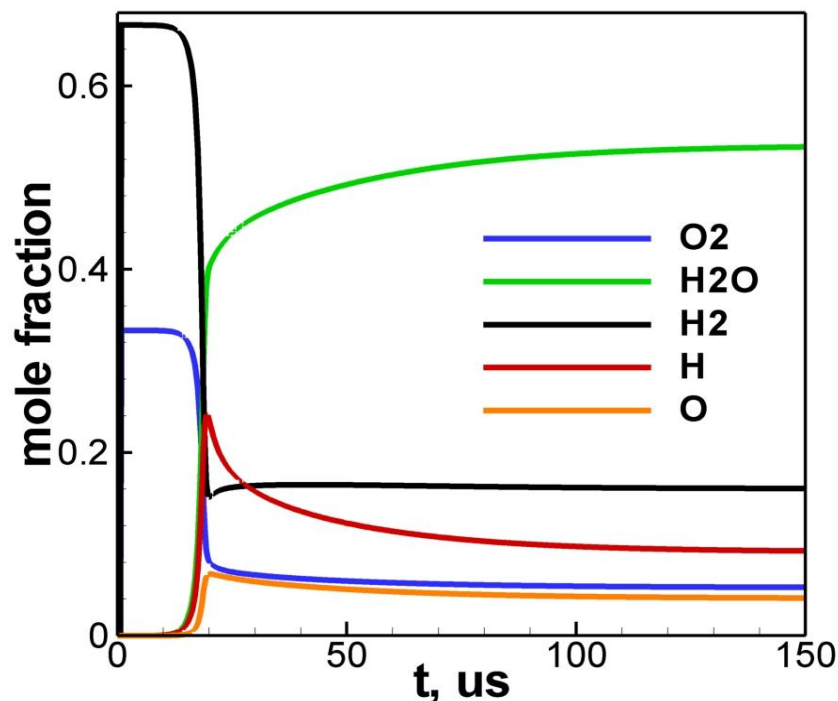
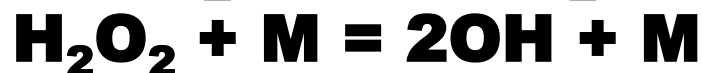
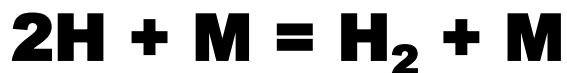


Одноступенчатая модель [7] дает времена индукции на несколько порядков короче реальных времен, воспроизводящихся **детальными кинетическими моделями [1-6]**. Помимо этого ею не воспроизводится сама стадия индукции (рождения и ветвления цепей), реакция всюду экзотермическая.



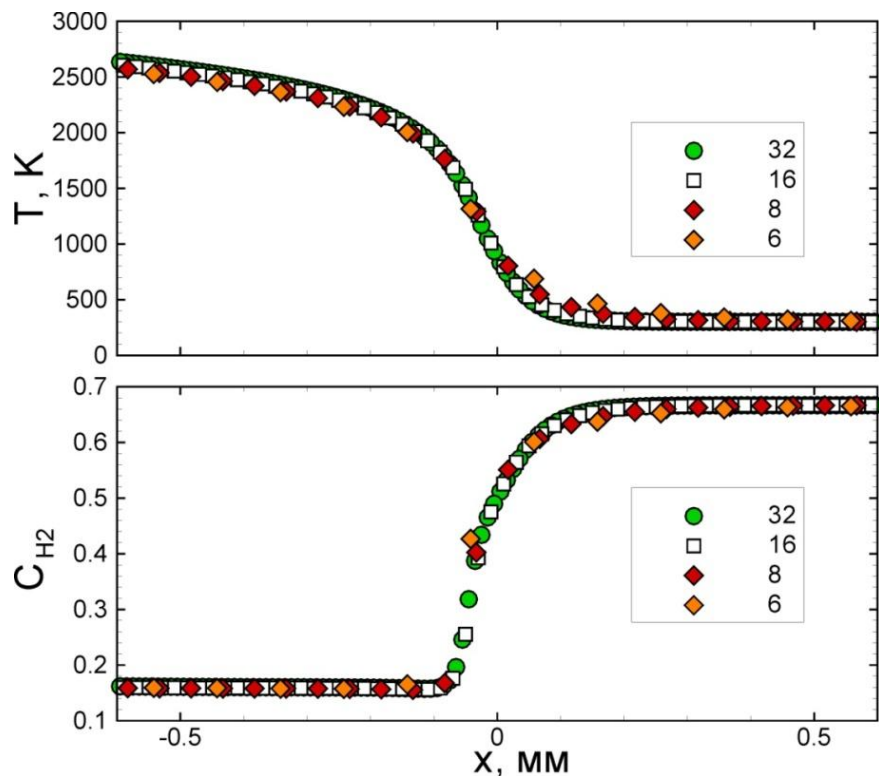
С другой стороны есть определенный разброс в данных по временам индукции, рассчитанных по различным кинетическим схемам. Это определяется значительным разбросом экспериментальных данных в области «низких» температур, обусловленным наличием гидро-динамических возмущений в реальных экспериментах (ударные трубы, машины быстрого сжатия, проточные реакторы)

Редуцированная схема окисления водорода достаточно проста и сохраняет время расчетов. Однако она дает хорошее согласие по термодинамическим и кинетическим параметрам горения [1].



Особенности математического моделирования

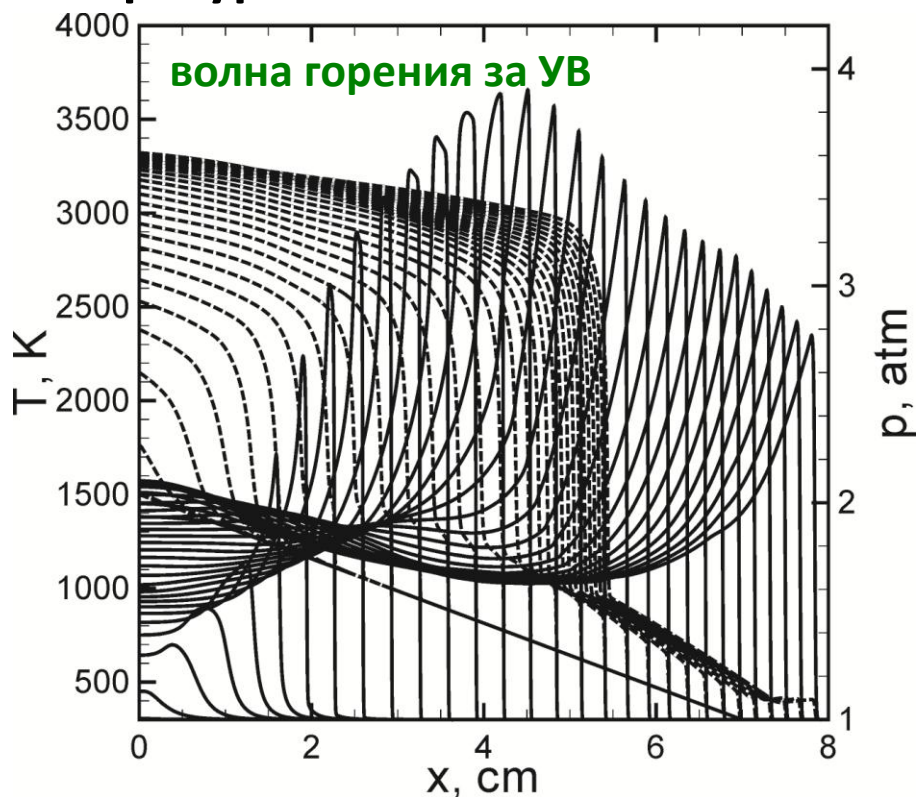
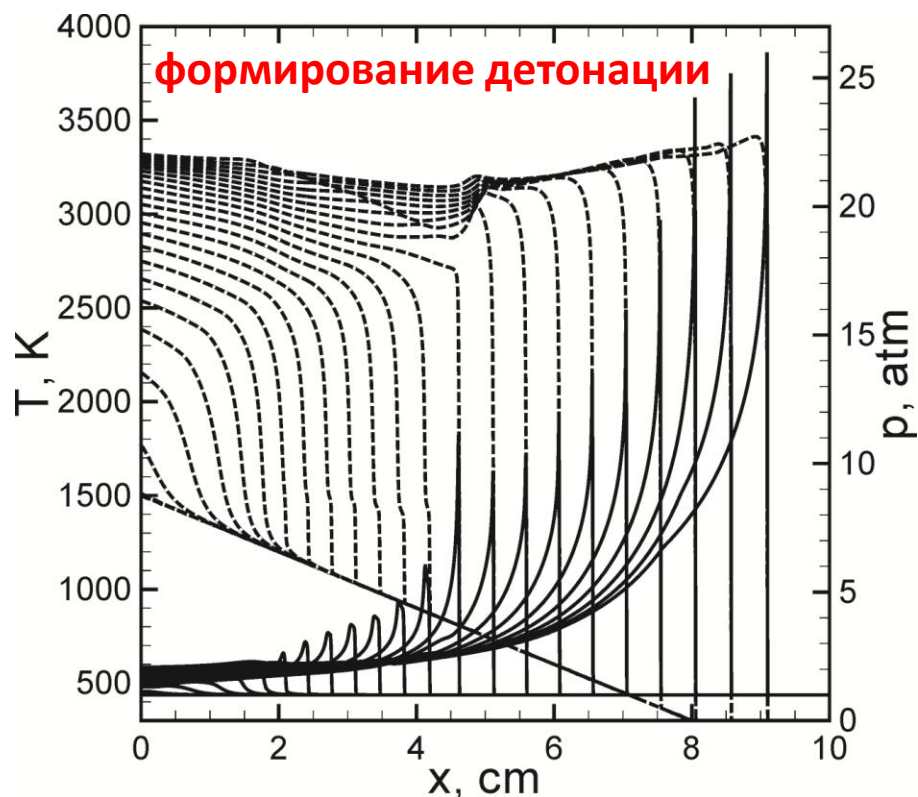
Структура ламинарного пламени



	D_f , м/с	θ	T_b , K	$C(H_2)$	$C(H)$
Эксп. данные	10.0	8.0	3083.0	0.16	0.08
Схема из 9 реакций [Бохон и др.]	9.7	7.8	2998.2	0.14	0.06
Схема из 21 реакции [Бохон и др.]	11.7	7.6	2892.0	0.16	0.07
Схема из 19 реакций [Warnatz]	10.0	7.9	3047.5	0.20	0.03
Схема из 26 реакций [GRI Mech]	13.5	7.7	2914.7	0.21	0.03

Воспламенение

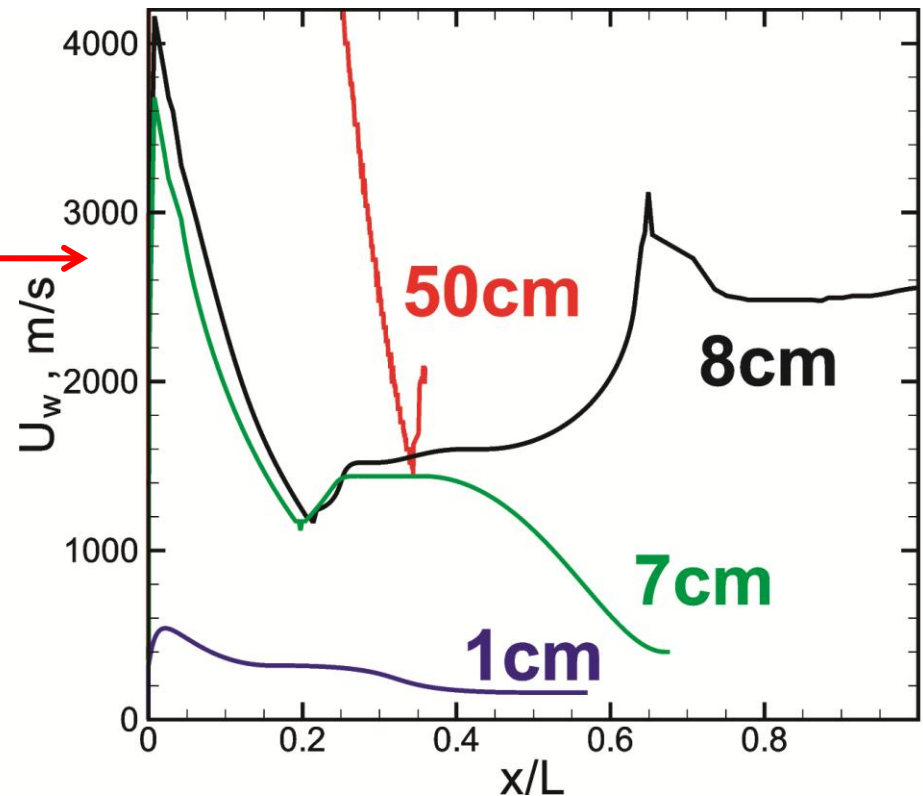
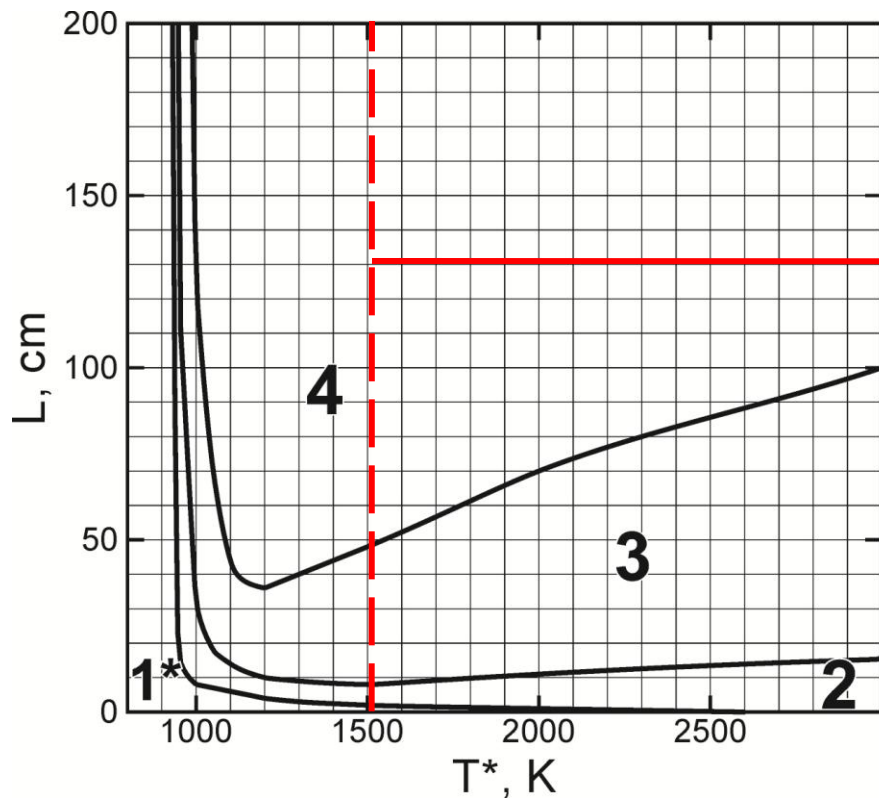
Механизм спонтанного распространения реакции вдоль градиента температуры



Спонтанная волна реакции рождает за собой волну давления, которая догоняя и пересекая фронт реакции формирует ударную волну. Ускорение волны реакции в потоке за ударной волной может привести к формированию детонации (левый рисунок).

Сплошные линии – профили давления, Штриховые – температуры, на разные моменты времени

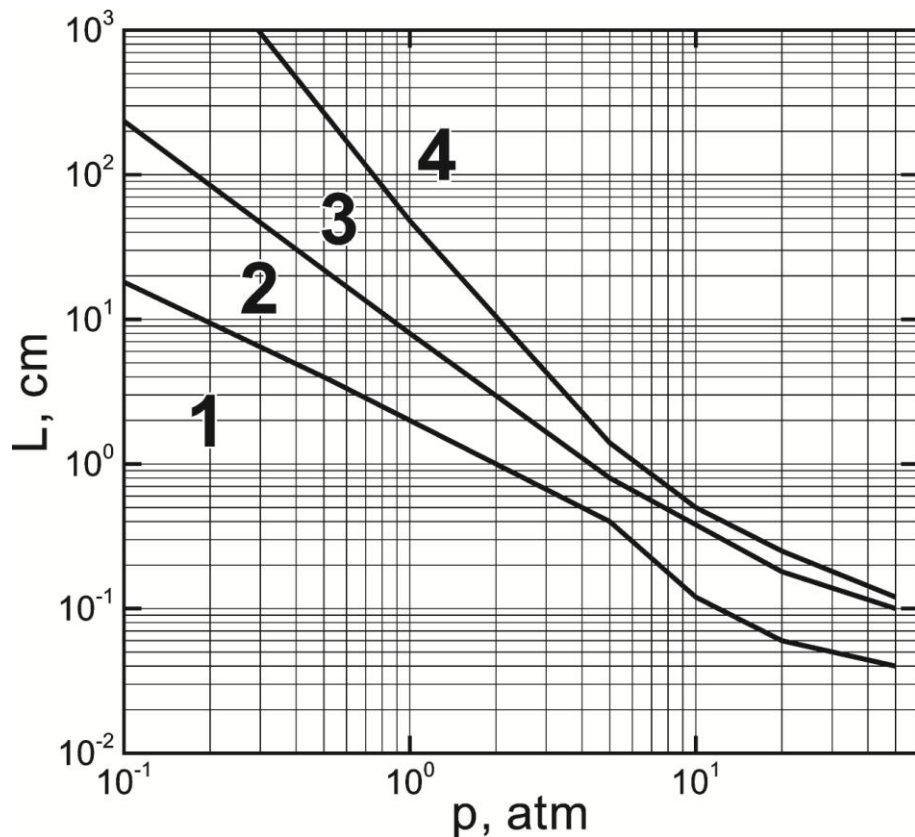
Реализация различных режимов горения в зависимости от параметров среды (T)



При использовании одноступенчатых моделей указанные выше особенности цепного воспламенения не учитываются и оценки дают весьма заниженные результаты по минимальной протяженности градиента, необходимого для инициирования того или иного режима. **1 – медленное горение**, **2 – горение за ударной волной**, **3 – переход горения в детонацию за ударной волной**, **4 – прямое инициирование детонации**.

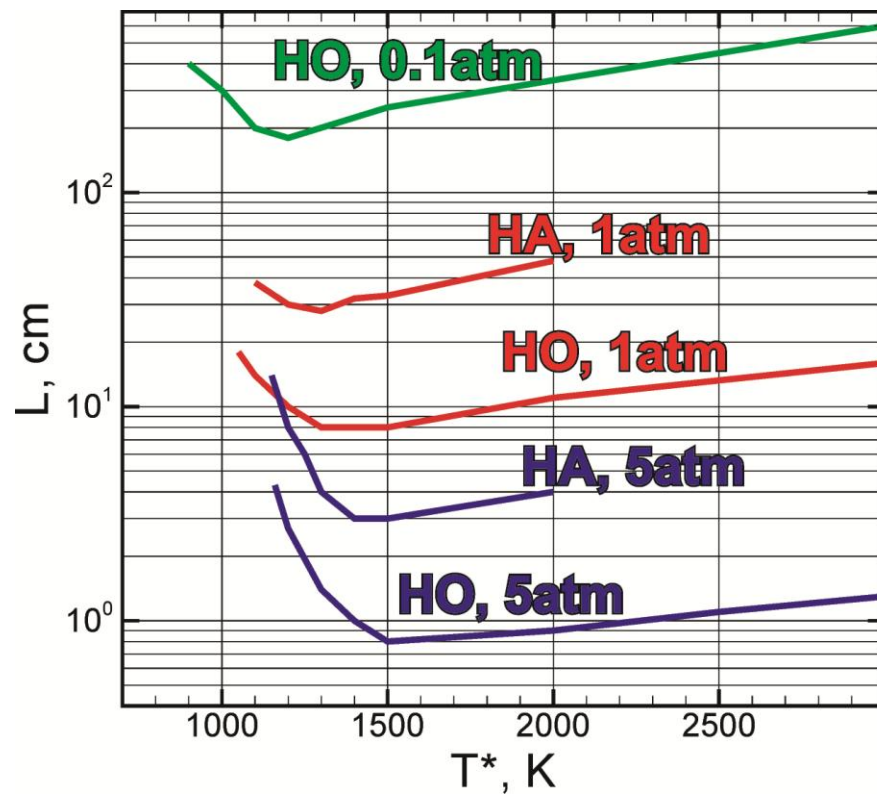
L – протяженность градиента, T^* – температура в верхней точке, U_w – скорость волны реакции, x – координата волны реакции вдоль градиента

Реализация различных режимов горения в зависимости от состава смеси (p , Y_k)



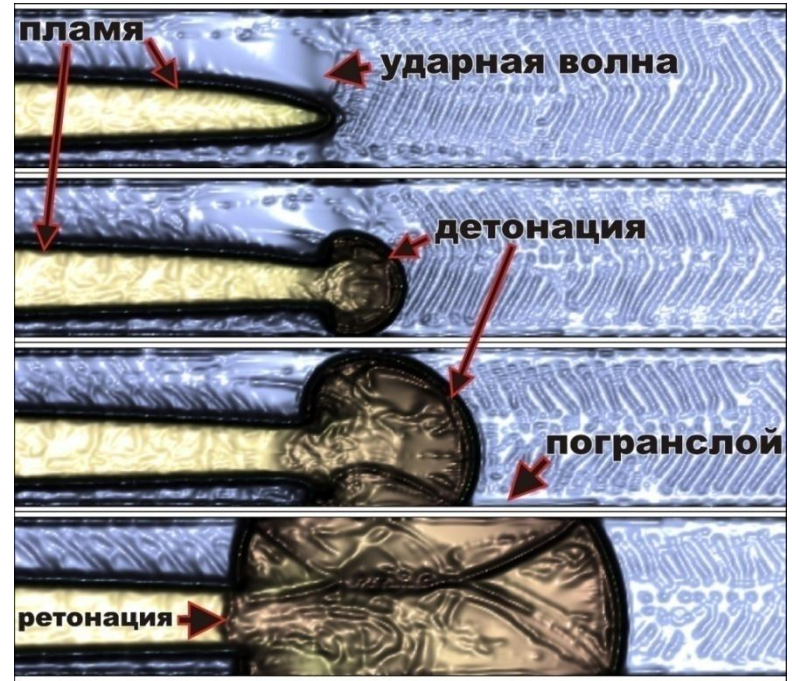
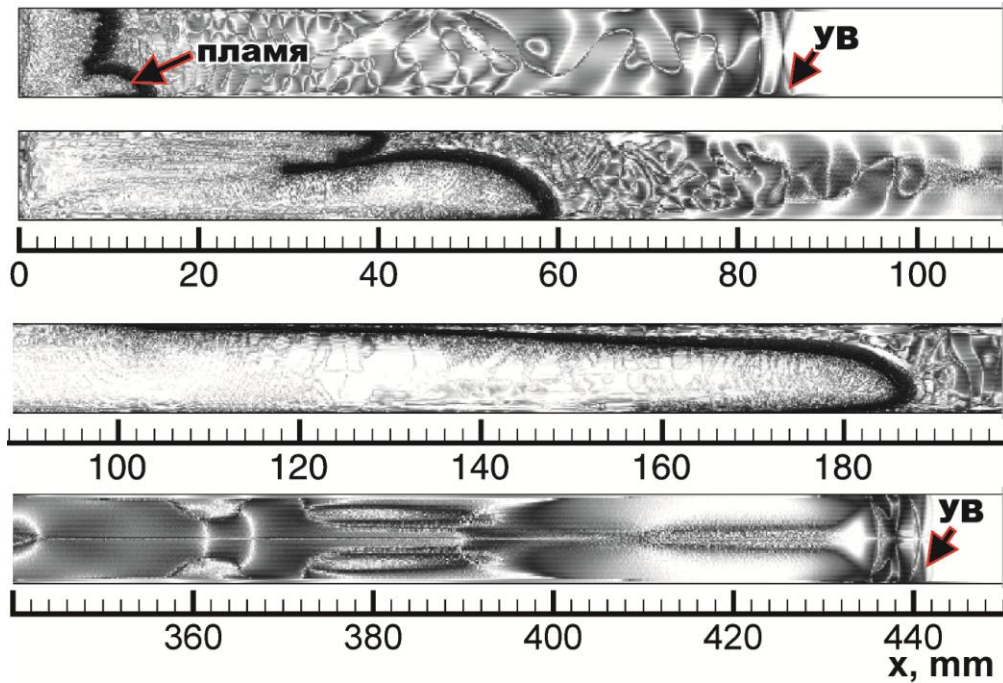
Пределы реализации различных режимов горения в зависимости от начального давления смеси.

$T^*=1500K$



Предельные протяженности градиента, на которых реализуются режимы с формированием детонационных волн (3 и 4), для разных смесей при различных начальных давлениях. HO – водород-кислород, HA – водород-воздух

Ускорение пламени и ПГД



Причины ускорения пламени:

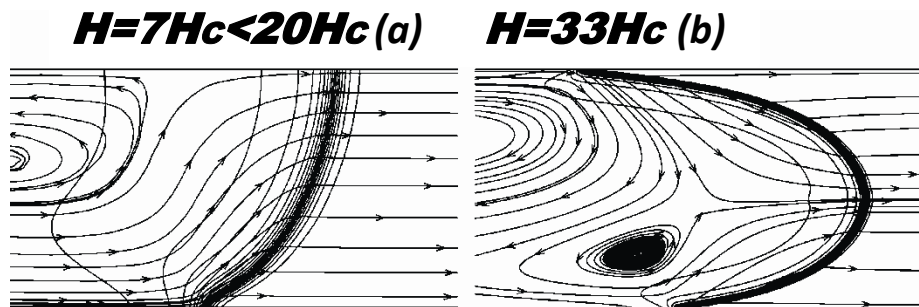
- Гидродинамическая неустойчивость фронта пламени
- Взаимодействие пламени с потоком впереди фронта
- Потоки за фронтом и охлаждение продуктов горения

Гидродинамическая неустойчивость

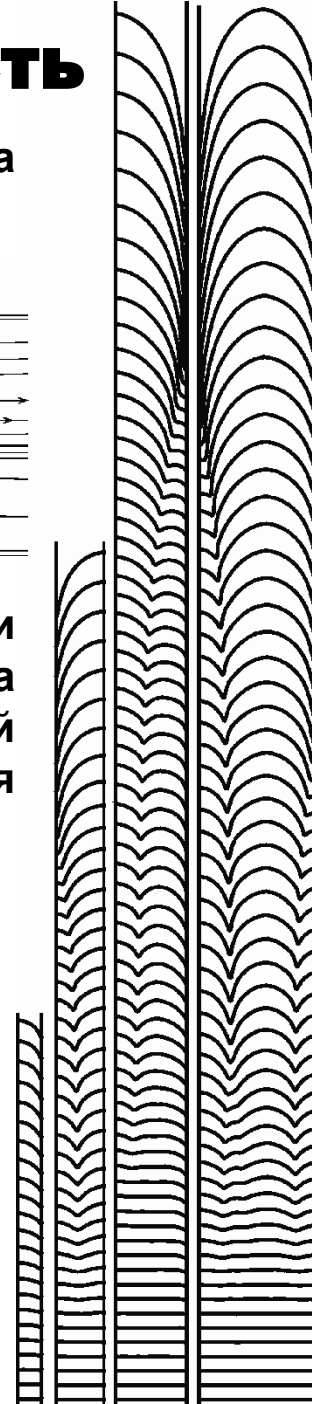
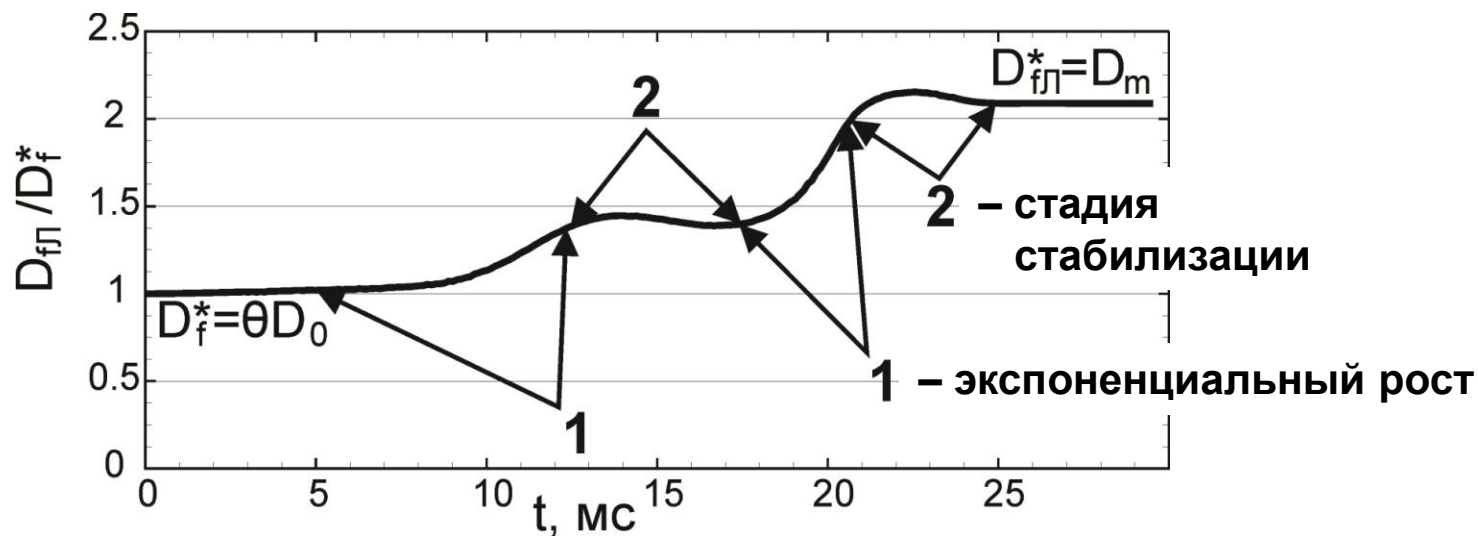
Теория (Kazakov K., Liberman M.) – свободное пламя выходит на стационарный режим через последовательность бифуркаций:

$$D_m = D_0(1 + W_m) \quad (1)$$

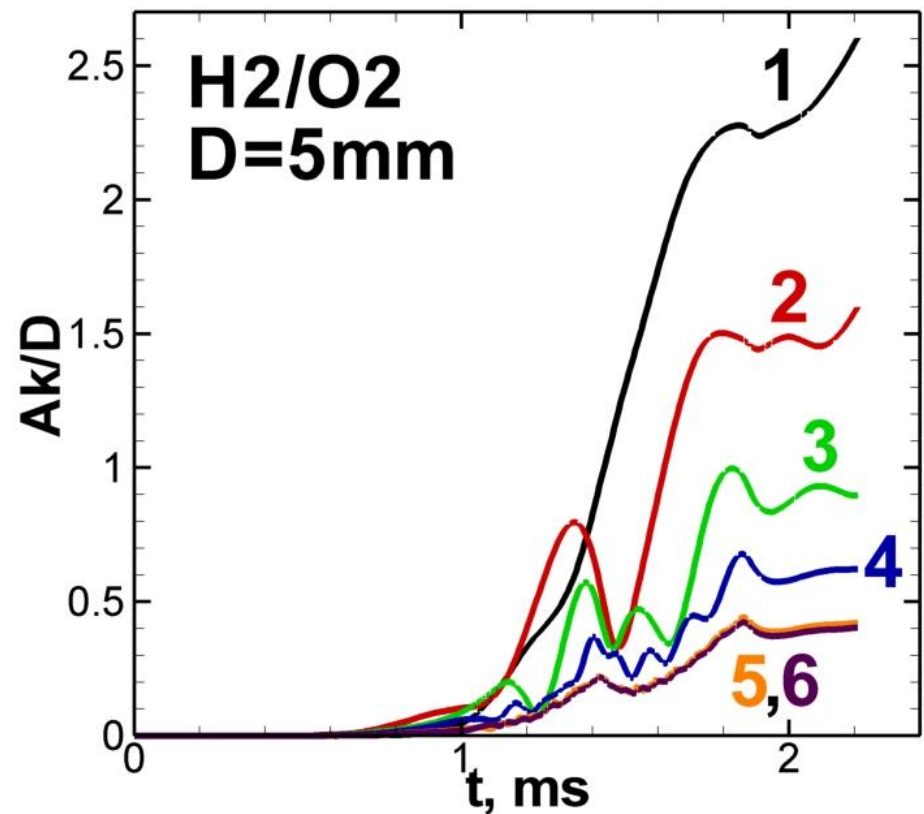
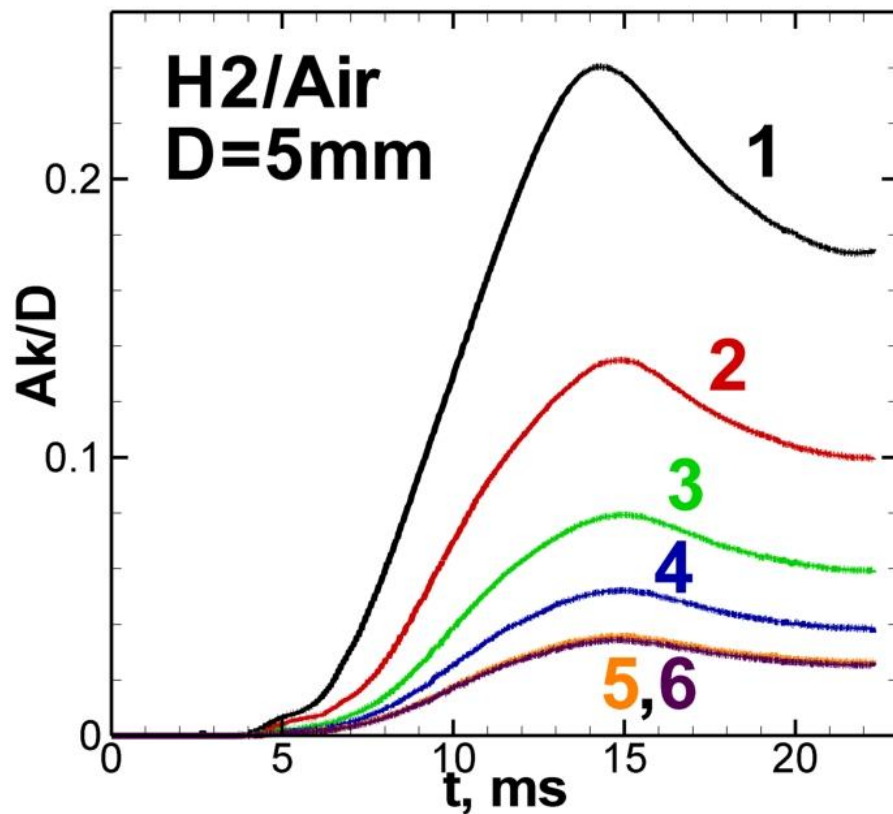
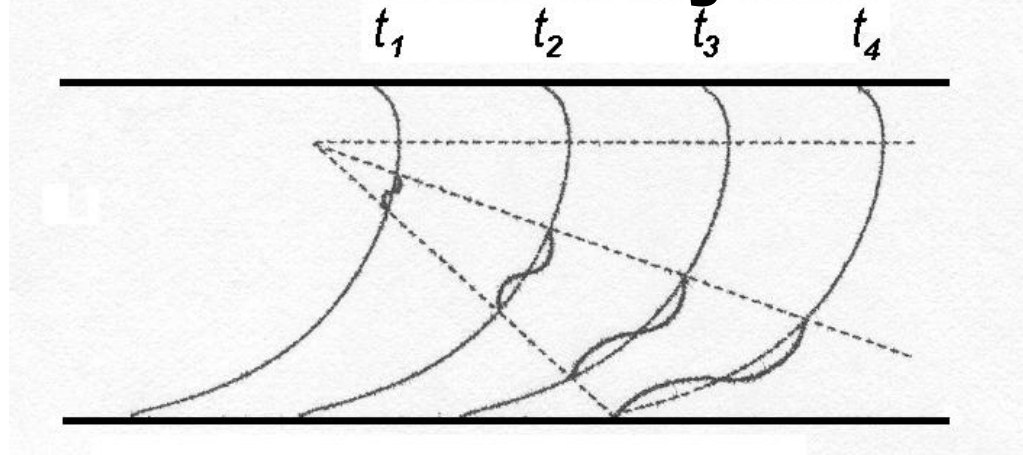
$$W_m = \frac{(\theta - 1)^2}{4\theta(\theta + 1)} \quad (2)$$



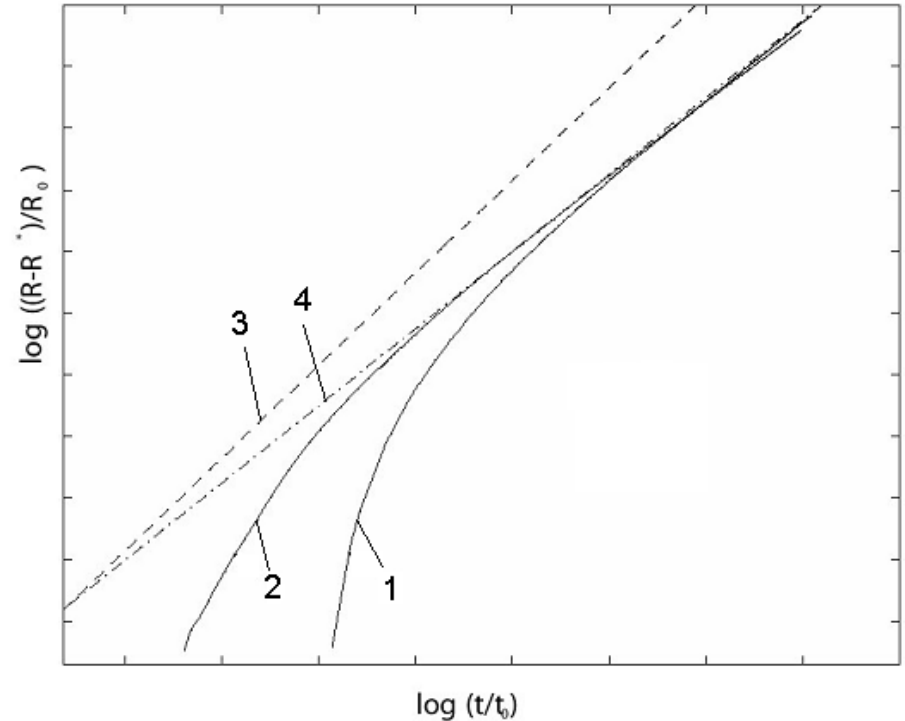
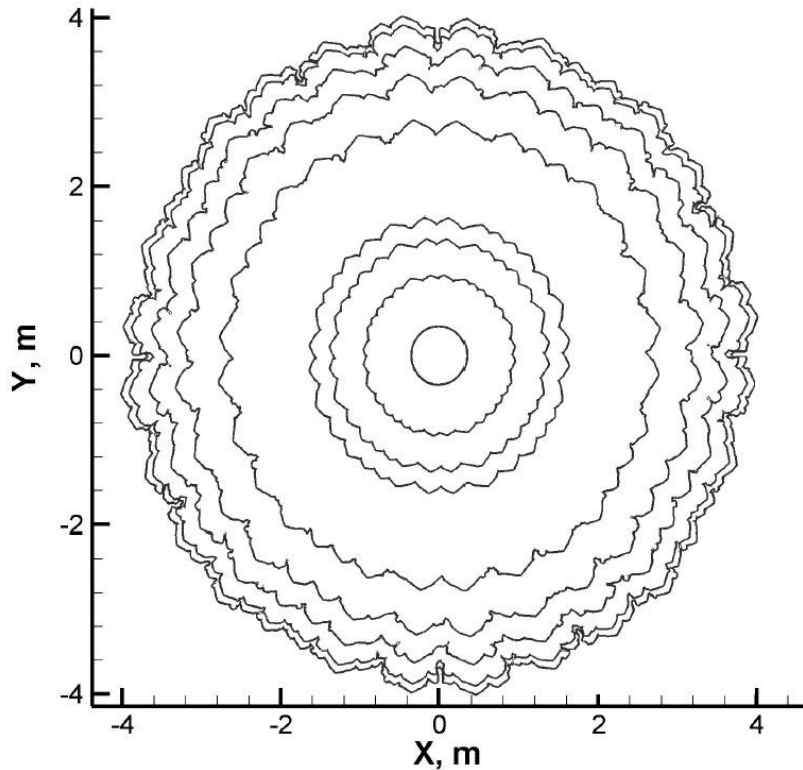
Результаты компьютерного моделирования гипотетической смеси (Liberman M., Ivanov M., Valiev D., Peil O.) – пламя выходит на стационарный режим путем роста длинноволновых возмущений (гипотеза Зельдовича), выражения (1), (2) применимы только для узких каналов (**$H \leq 4H_c$**)



Гидродинамическая неустойчивость

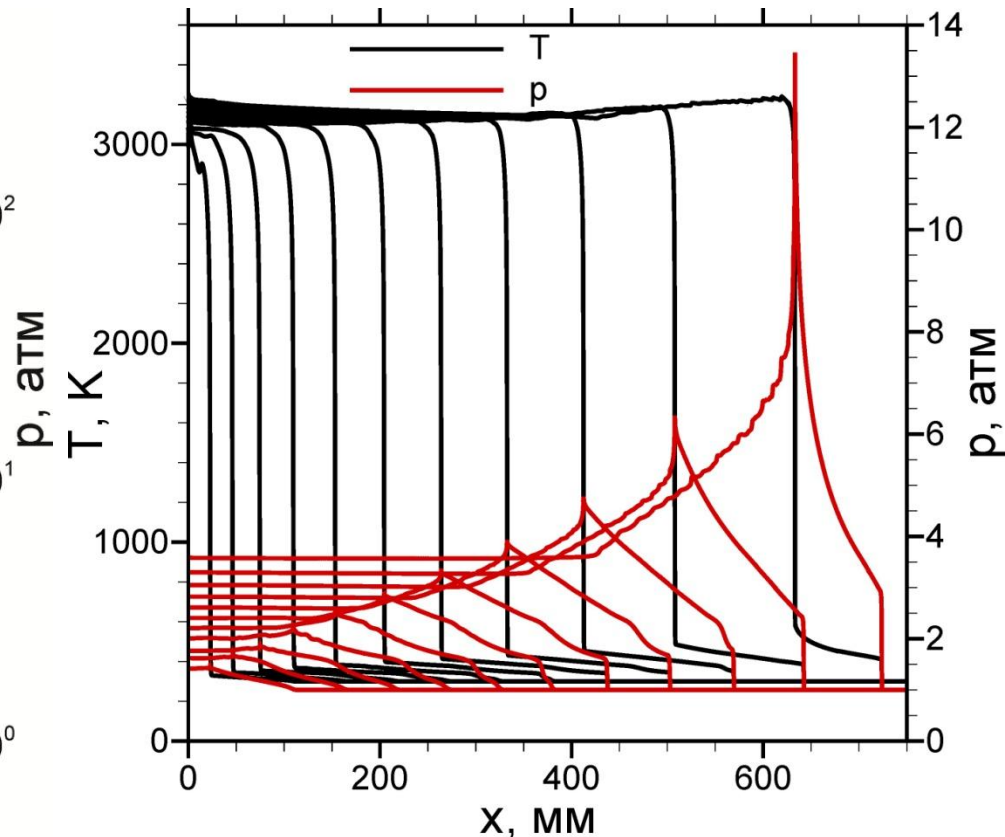
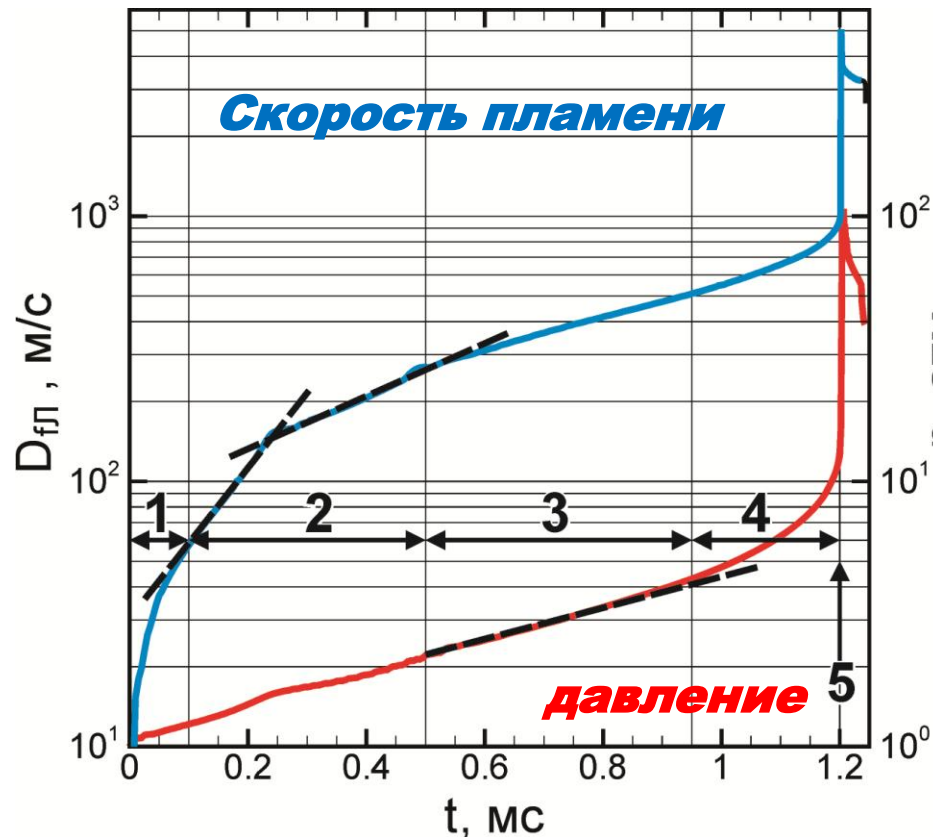


Гидродинамическая неустойчивость



- 1 – расчёт с размером ячейки $10L_f$;
- 2 – расчёт с размером ячейки $1L_f$;
- 3 – автомодельное решение для сферической симметрии ($t^{3/2}$);
- 4 – для цилиндрической симметрии ($t^{5/4}$)

Стадии ускорения пламени

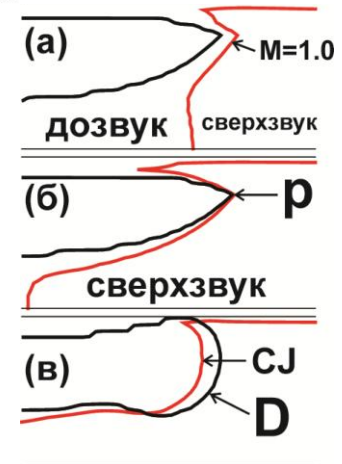


1ая стадия: Расширение продуктов горения

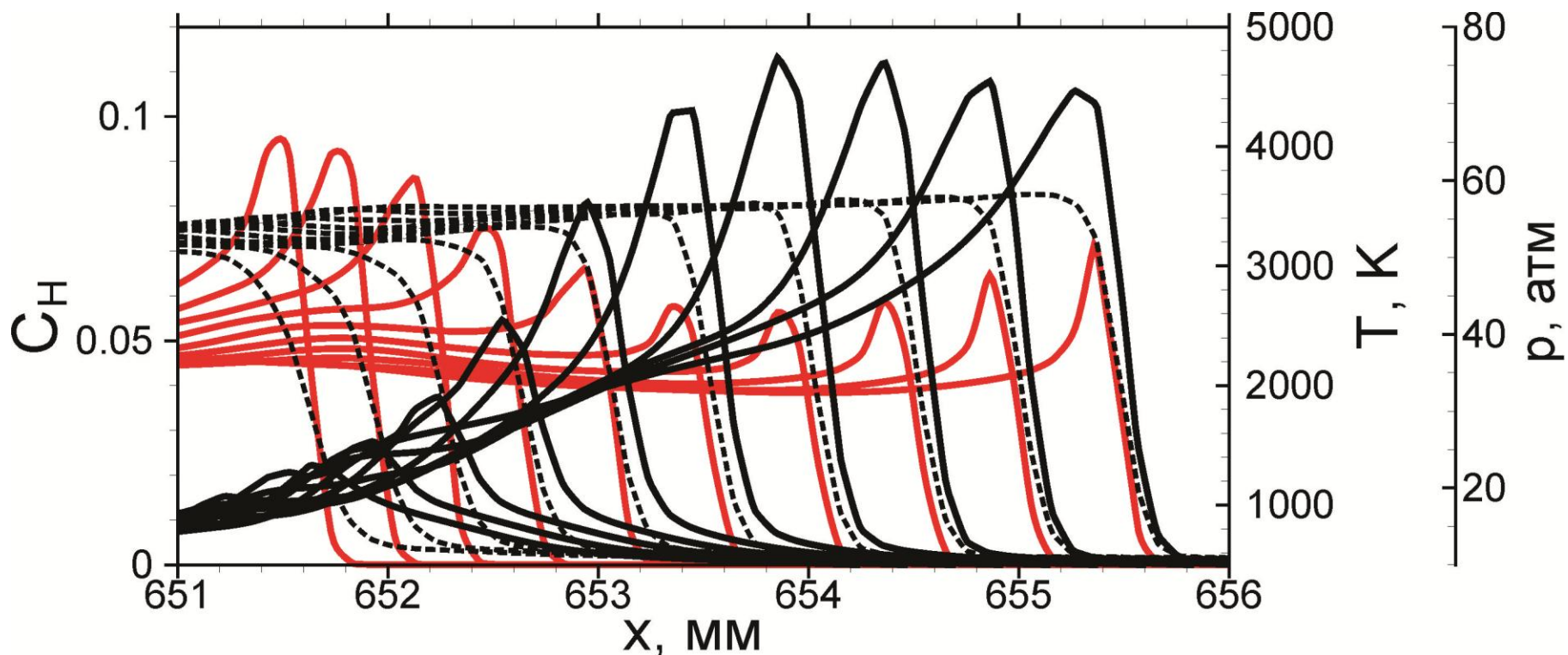
2ая стадия: Экспоненциальный рост скорости пламени (рост неустойчивости) $D_{пл} \sim \exp(\alpha D_0 t / H)$, $\alpha \sim 1$

3ая стадия: Снижение степени ускорения пламени $D_{пл} \sim (1 + \beta t^n)$, $0 < n < 1$, формирование ударных волн непосредственно на фронте пламени, формирование пика давления в зоне реакции

4ая стадия: Пик давления локализуется непосредственно в зоне горения; скорость роста параметров увеличивается, что ведет к формированию волны детонации (5ая стадия).



Перестройка структуры сверхзвуковой волны горения

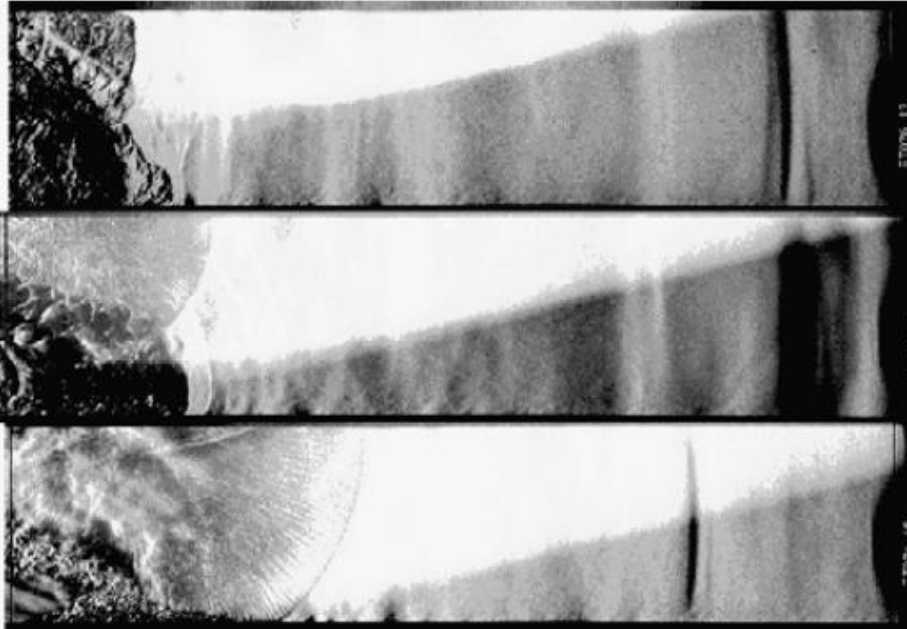


Сверхзвуковая волна горения сливается с ударной волной, формируя волну детонации.

сплошная – давление, штриховая – температура,
красная – концентрация радикала H

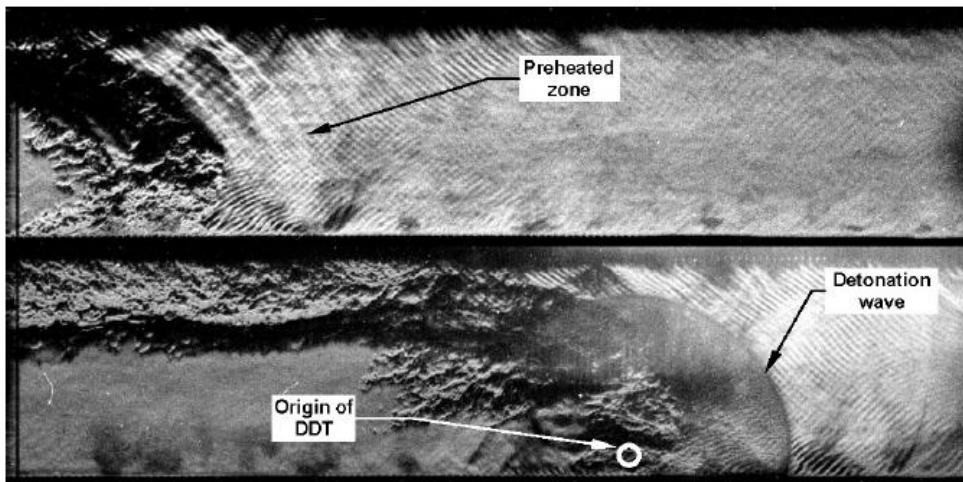
(М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, М.А. Либерман, В.Е. Фортов// ДАН. 2010. Т. 434. №6. С. 756)

Возникновение детонации вблизи фронта пламени, наблюдаемое в экспериментах



Lieberman M., Kuznetsov M., Ivanov A., Matsukov I.// Physics Letters A, 373 (2009)

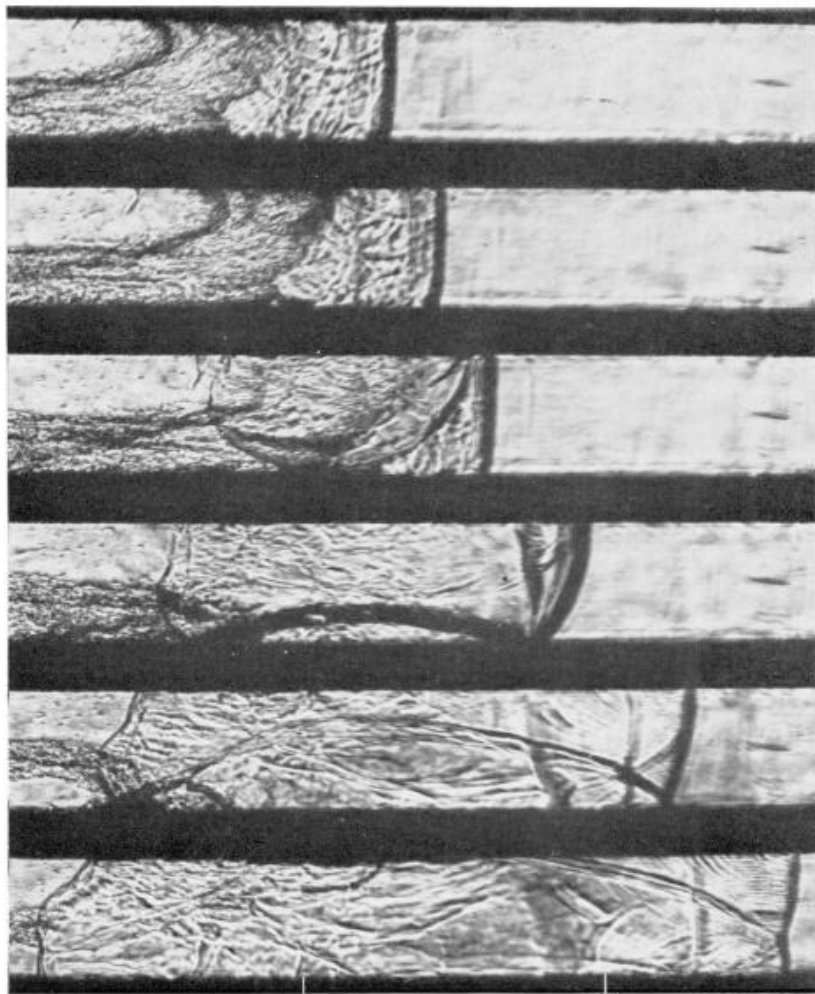
Этилен-кислород



Kuznetsov M., Liberman M., Matsukov I.// Comb. Sci. Tech., V.182, Is. 11 (2010)

Водород-кислород

Urtiew P.A., Oppenheim A.K.// Proc. R. Soc. (1966).



20
distance (cm)

25

Саламандра Г.Д., Баженова Т.В., Набоко И.М. // ЖТФ, Т. 29, №11 (1959)

Отдельные стадии преддетонационного периода

а) Начальная стадия

б) Стадия замедления

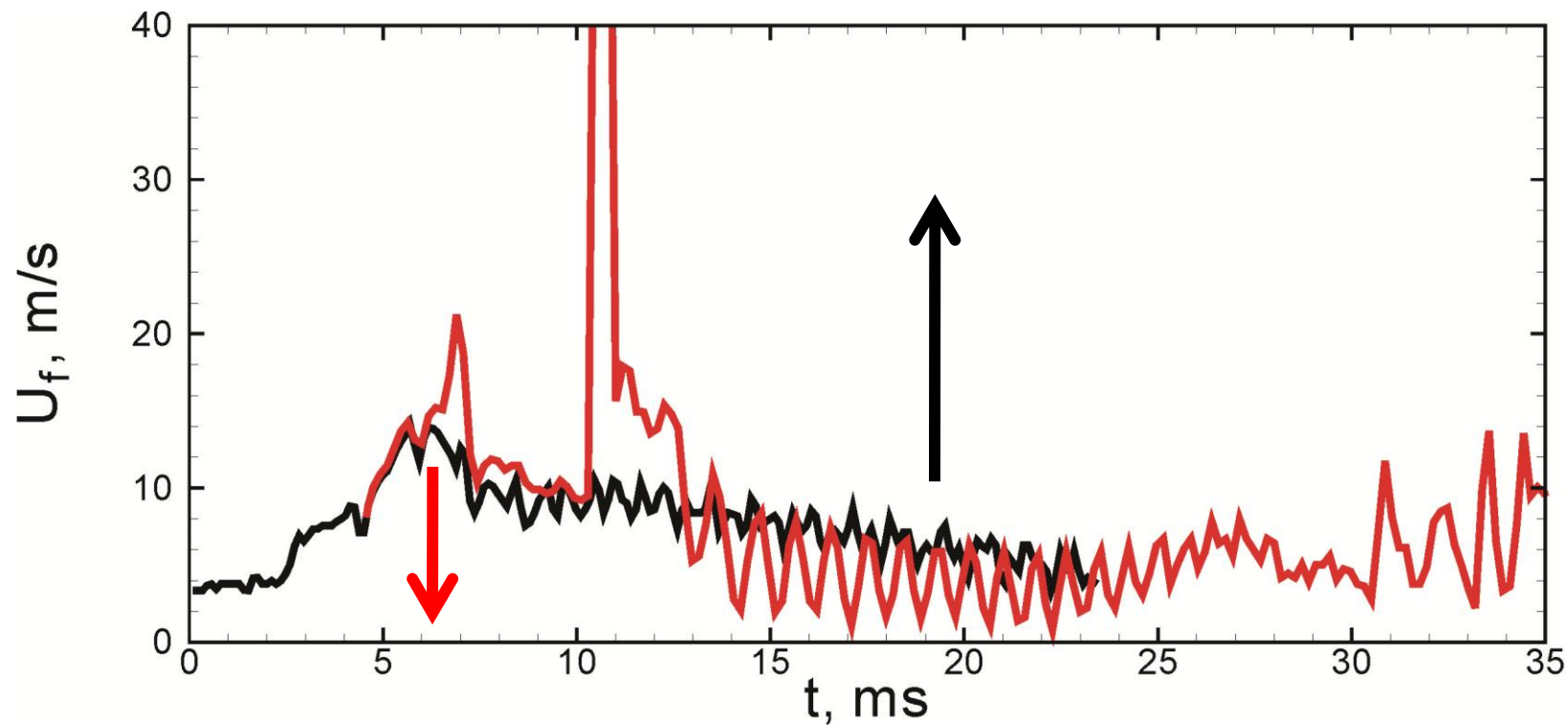
в) Новое увеличение скорости распространения пламени:

В этой стадии распространения пламени перед ускоренно распространяющимся фронтом пламени формируется большое количество возмущений, образующие ударные волны в непосредственной близости перед фронтом пламени.

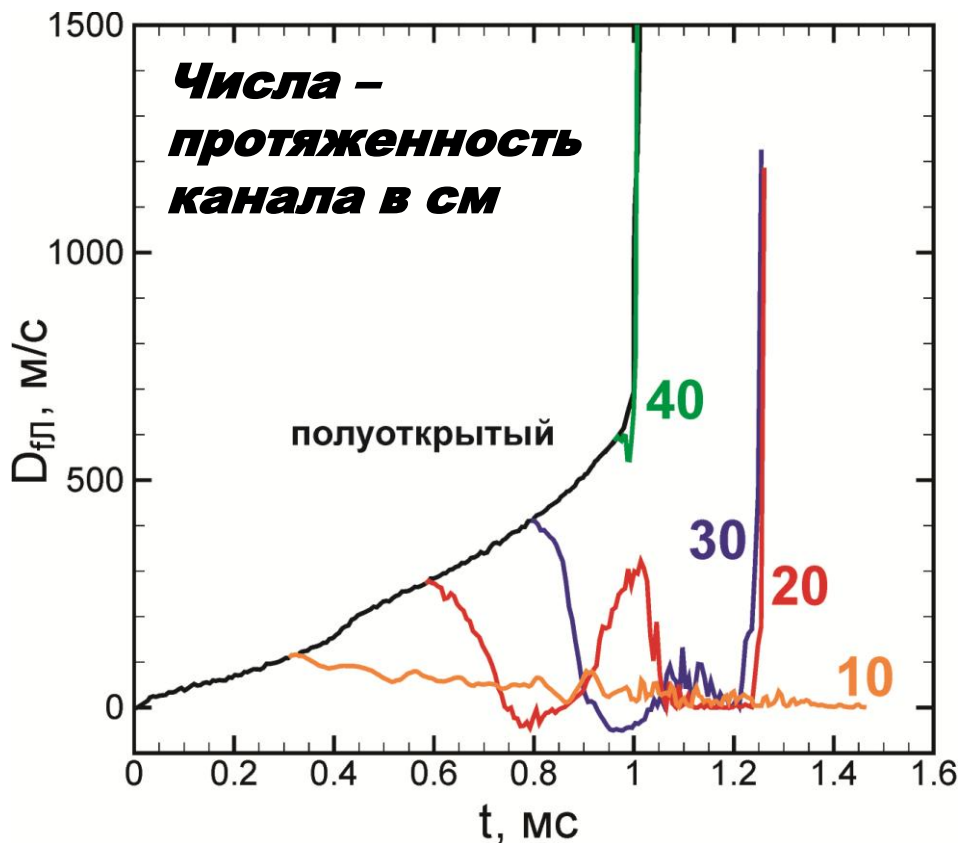
г) Преддетонационная стадия

В этой стадии распространения пламени ударные волны, возникающие перед фронтом пламени, оказывают особенно сильное влияние на фронт пламени. Ударная волна и фронт пламени составляют единый комплекс, перемещающийся с одной и той же скоростью.

Влияние вихревого возмущения на развитие пламени

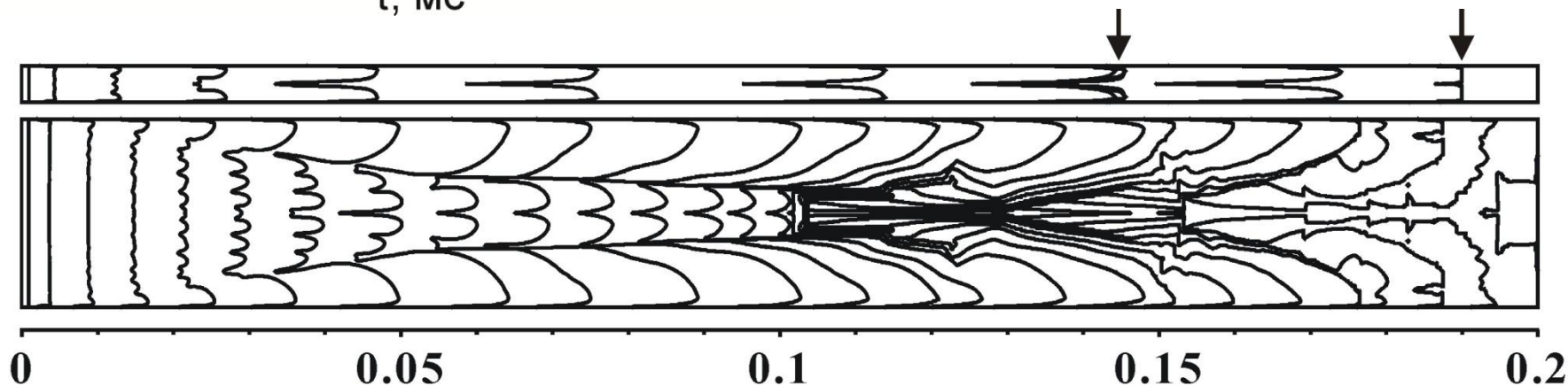


Динамика пламени и ПГД в закрытом канале

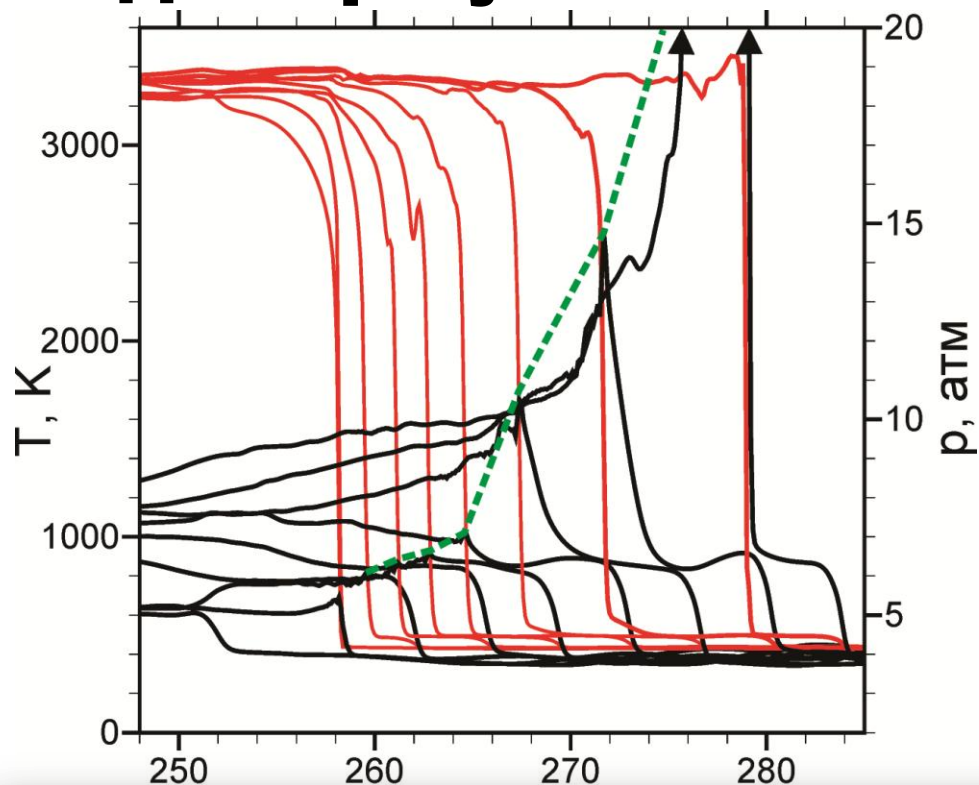


Ускоренное пламя сжимает смесь впереди себя. Волны сжатия формируют слабую ударную волну. УВ отражается от переднего торца, создавая поток, встречный по отношению к распространению пламени.

УВ, отражаясь от торцов канала и взаимодействуя с поверхностью фронта пламени, модулирует динамику пламени. В коротких каналах такое внешнее воздействие ведет к предотвращению ПГД. В более протяженных каналах это воздействие минимально, т.к. к моменту первого взаимодействия успевает сформироваться переходная структура.



ПГД как результат взаимодействия пламени с УВ



Черные линии – профили давления;

Красные – температуры;

Штриховая – развитие пика давления

T, K



300 1050 1800 2550 3300

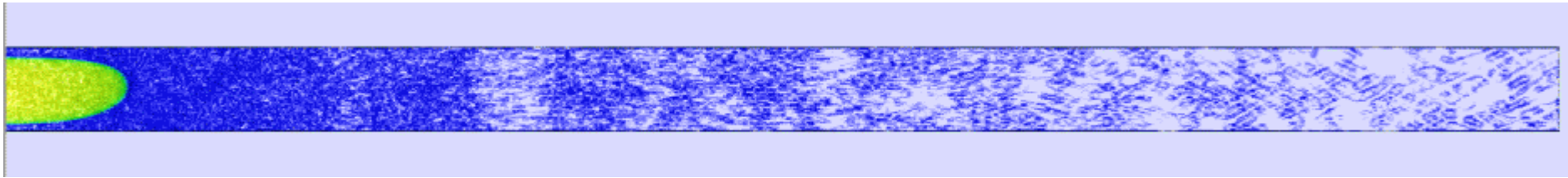
0.2

0.25

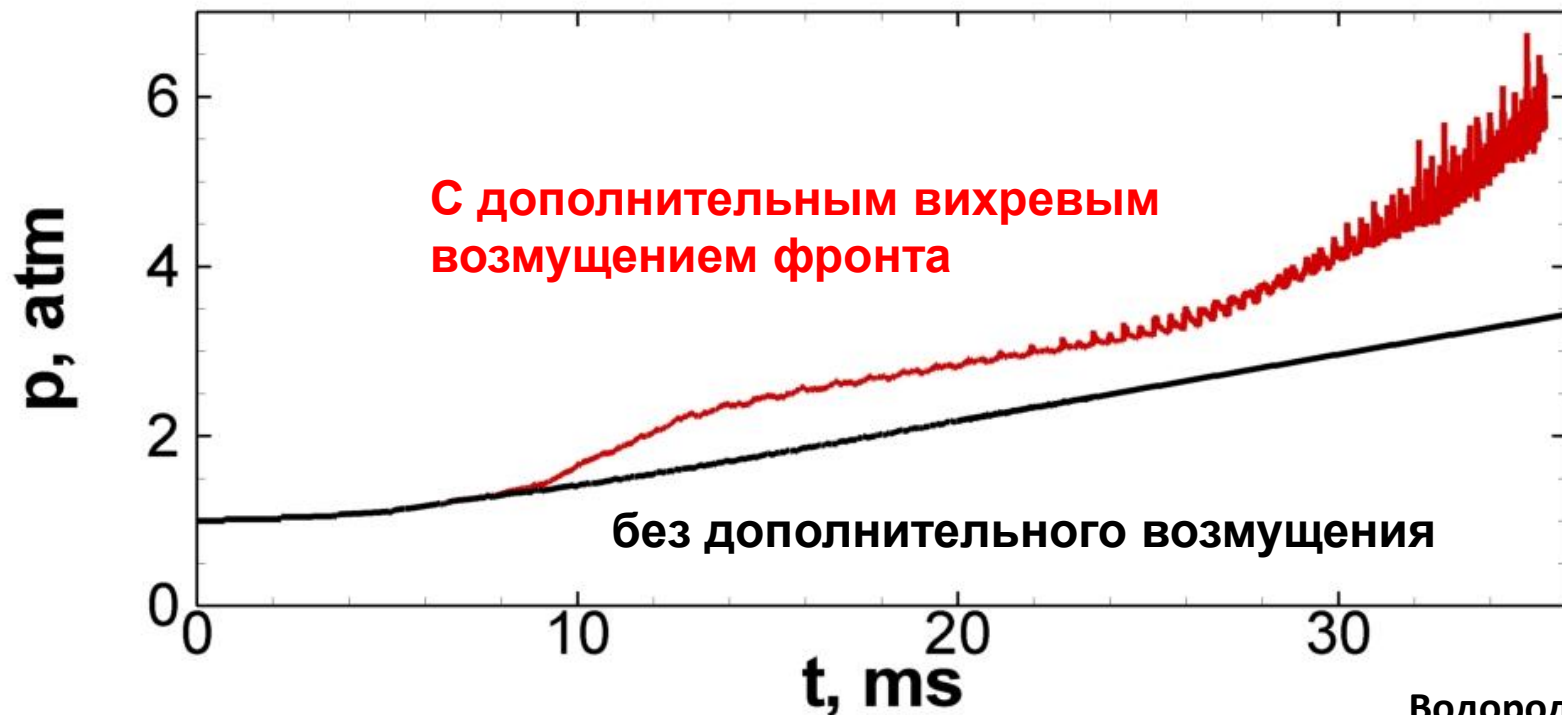
0.3

Рост акустической неустойчивости в закрытом канале

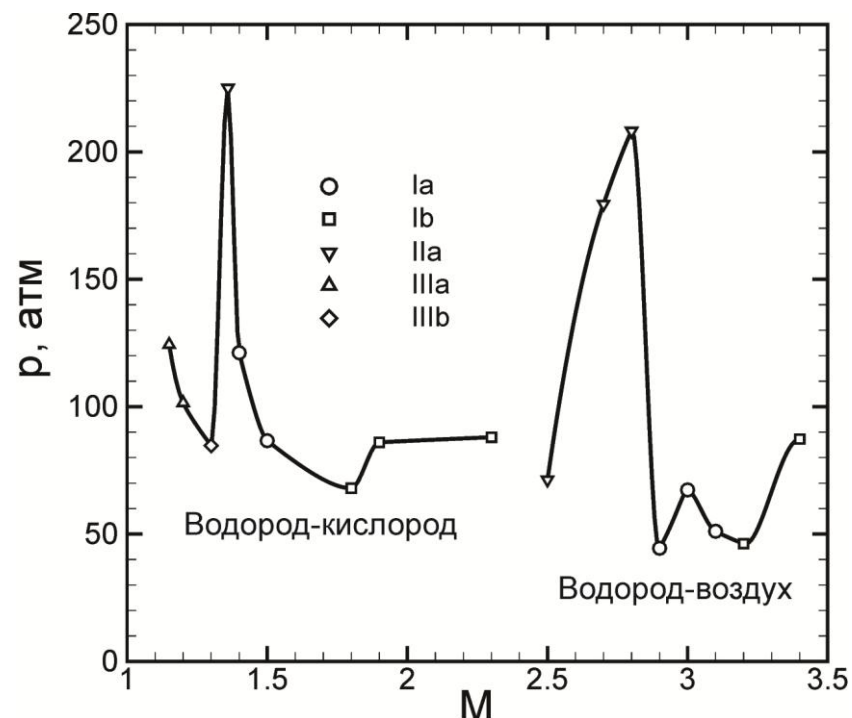
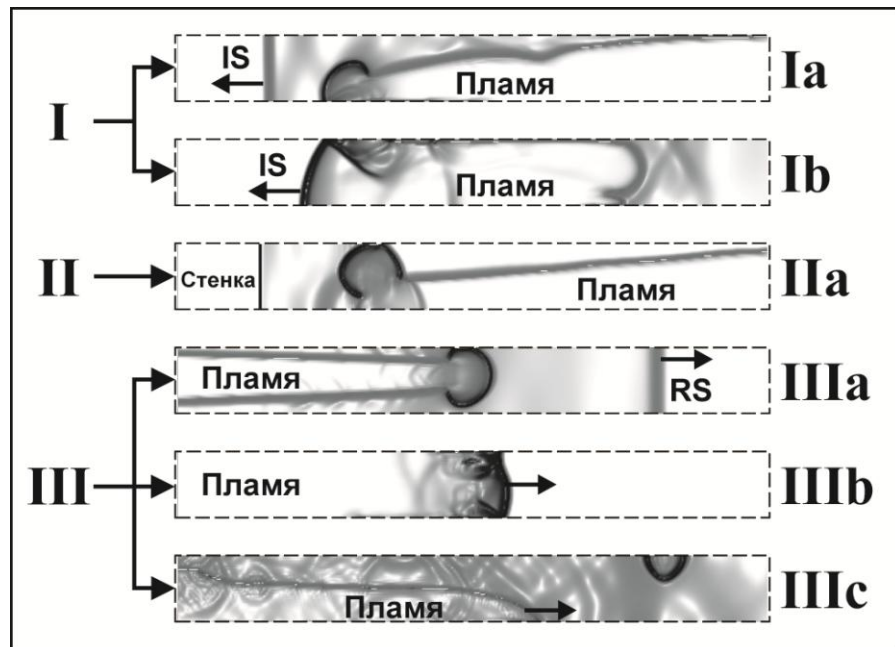
Визуализация эволюции волновой картины в канале



Рост давления на переднем торце

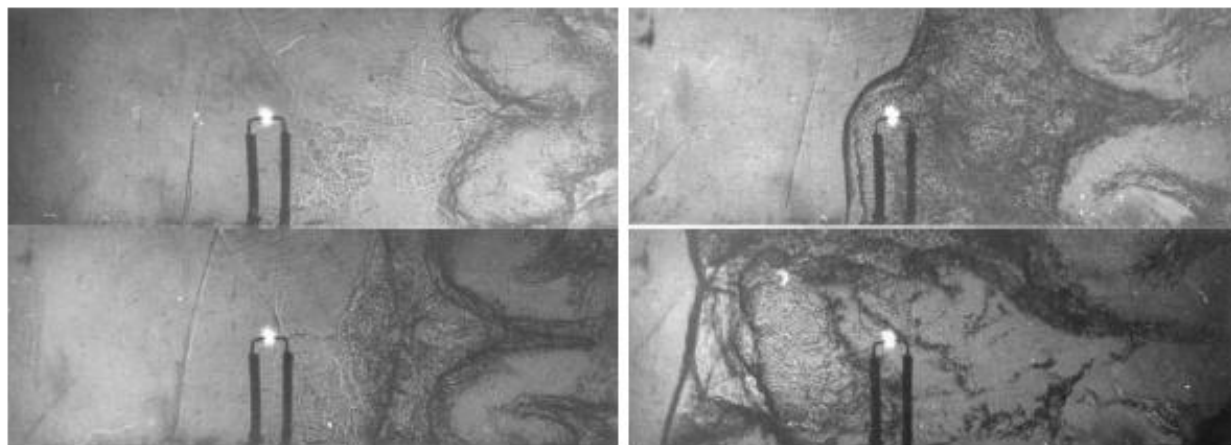
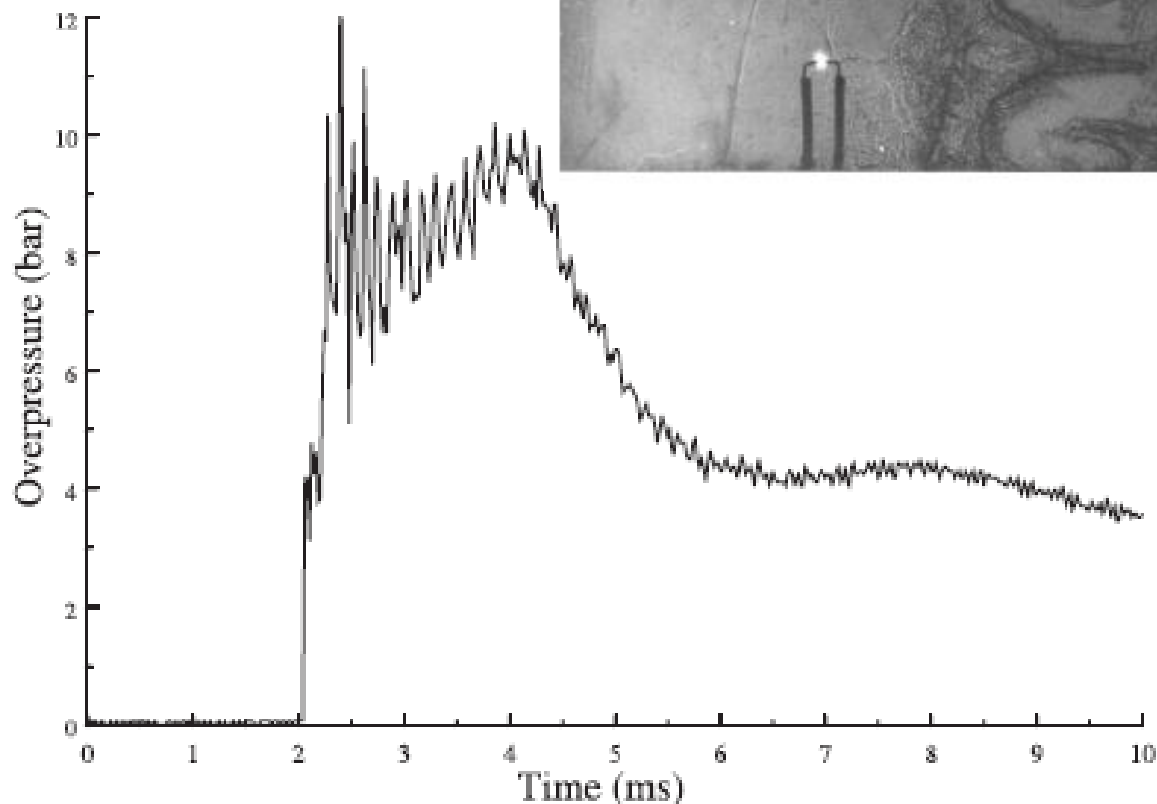


Режимы генерации высоких давлений при взаимодействии пламени с ударной волной



Воздействие УВ является только запускающим механизмом ПГД, а сам переход в детонацию происходит по ранее рассмотренному механизму. Зависимость пикового давления при ПГД от интенсивности падающей УВ немонотонна. Можно выделить режимы возникновения ПГД в водородно-кислородной и водородно-воздушной смеси, для которых пиковые давления имеют наибольшие значения (IIa во встречной УВ).

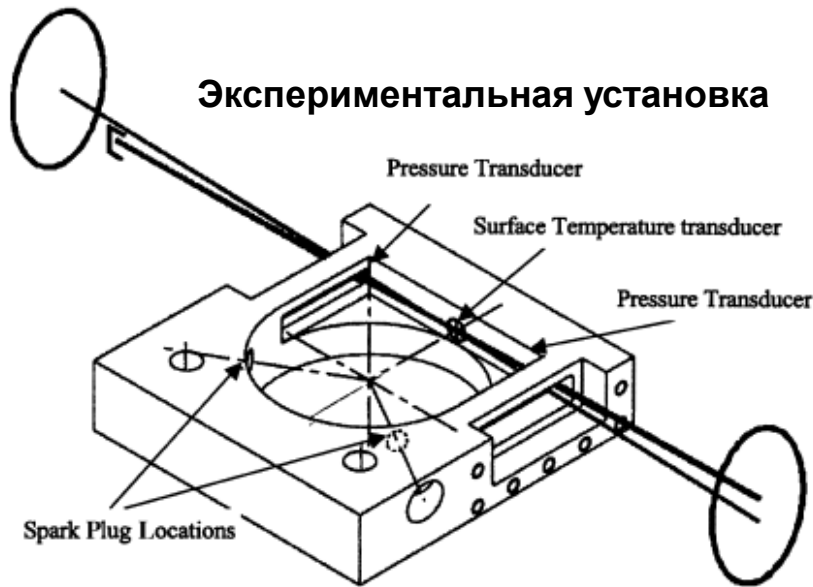
Режимы генерации высоких давлений при взаимодействии пламени с ударной волной



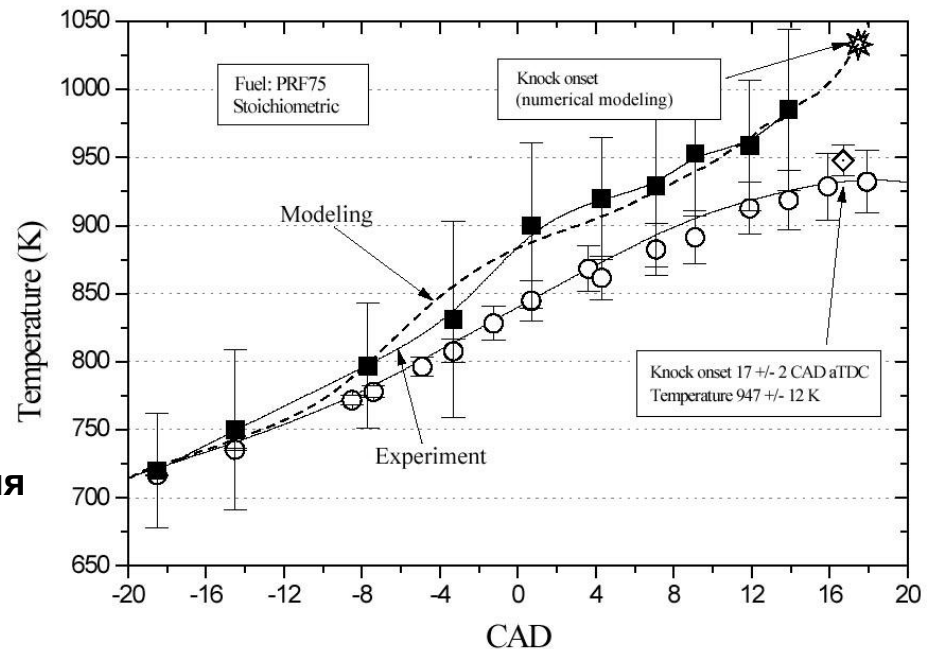
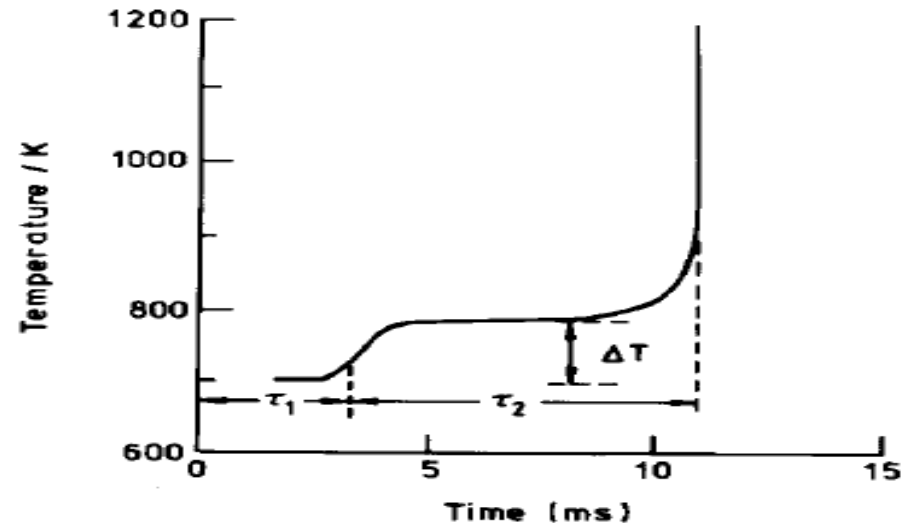
Этилен-воздух
 $p_0 = 0.1 \text{ атм}$
 $\max(p/p_0) = 120.0$

Стук в двигателях с искровым поджигом

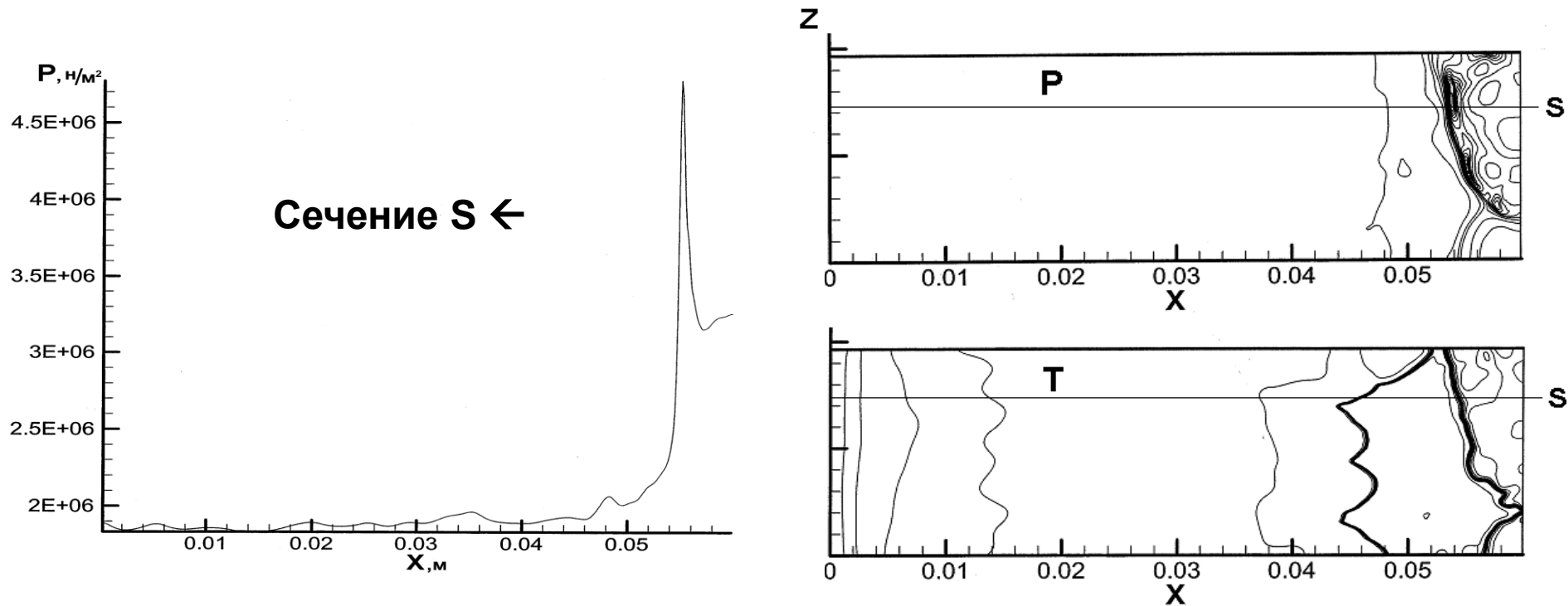
Особенности кинетики воспламенения углеводородных смесей →



Рост температуры на стенке камеры сгорания в зависимости от угла поворота →

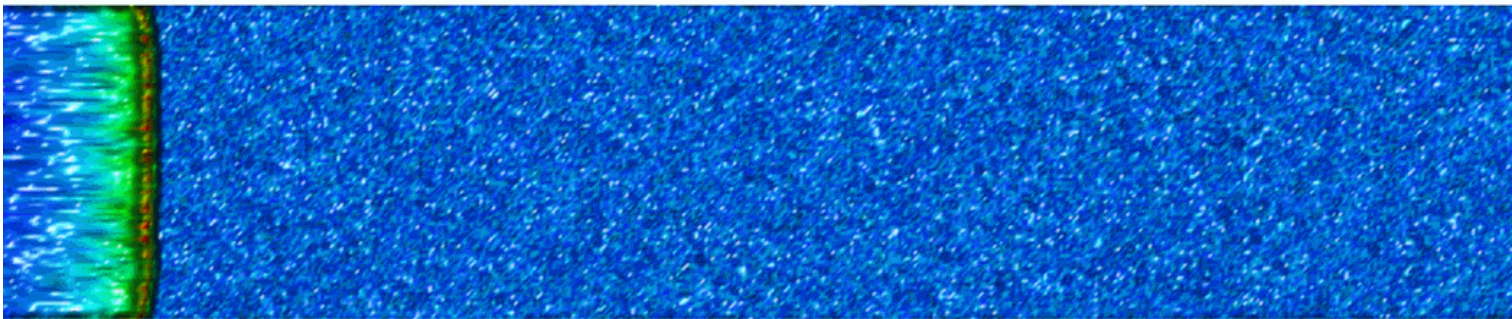
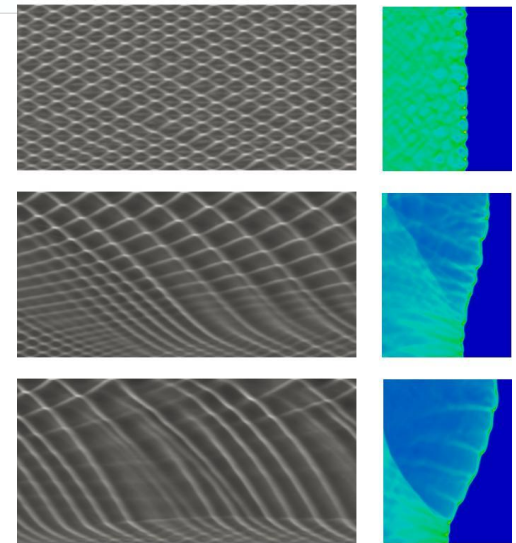
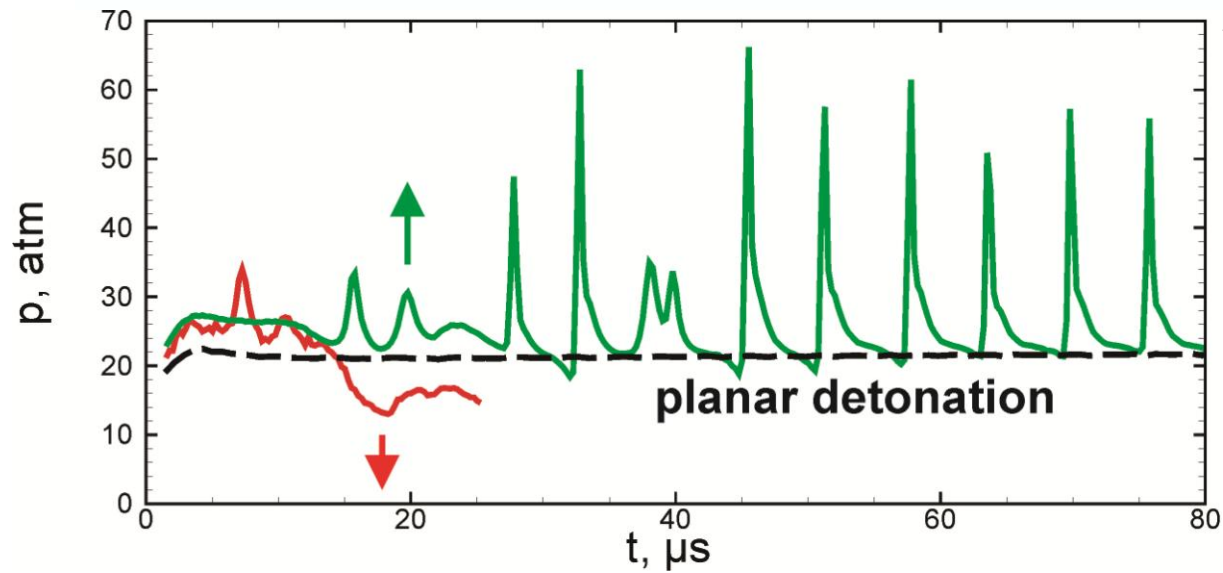
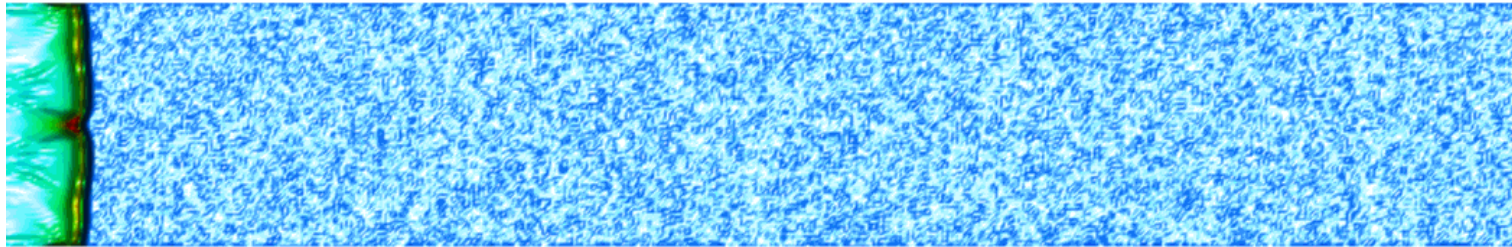


Стук в двигателях с искровым поджигом



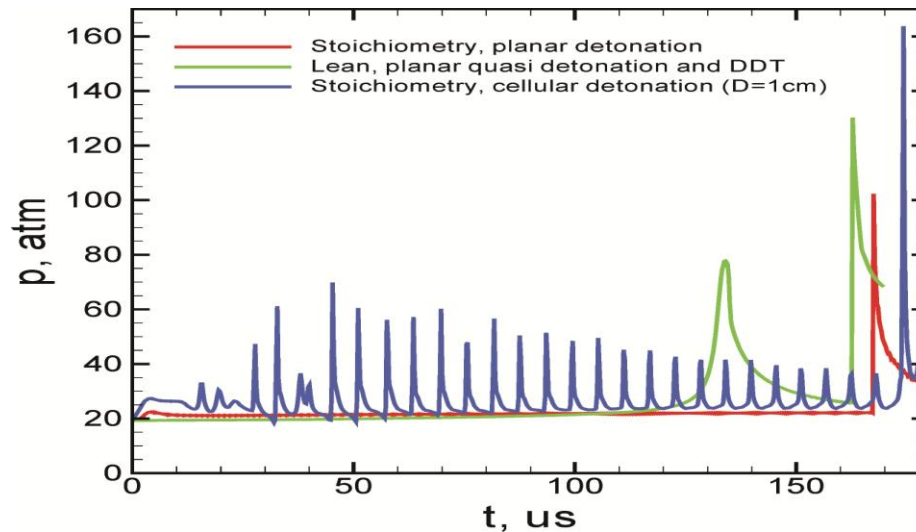
Механизмом «стука» является локальный тепловой взрыв
впереди фронта пламени, распространяющегося по сжатой
прогретой смеси, сжимаемой под поршнем.

Неустойчивость детонации



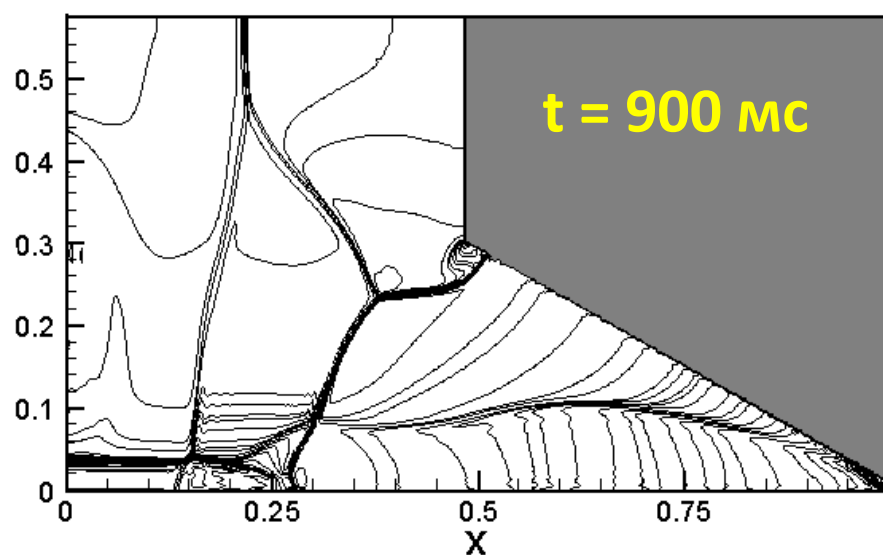
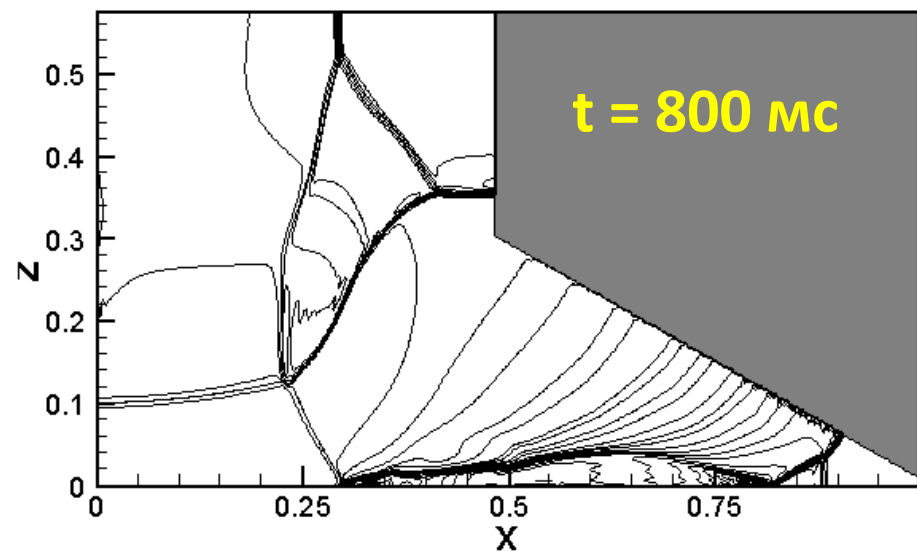
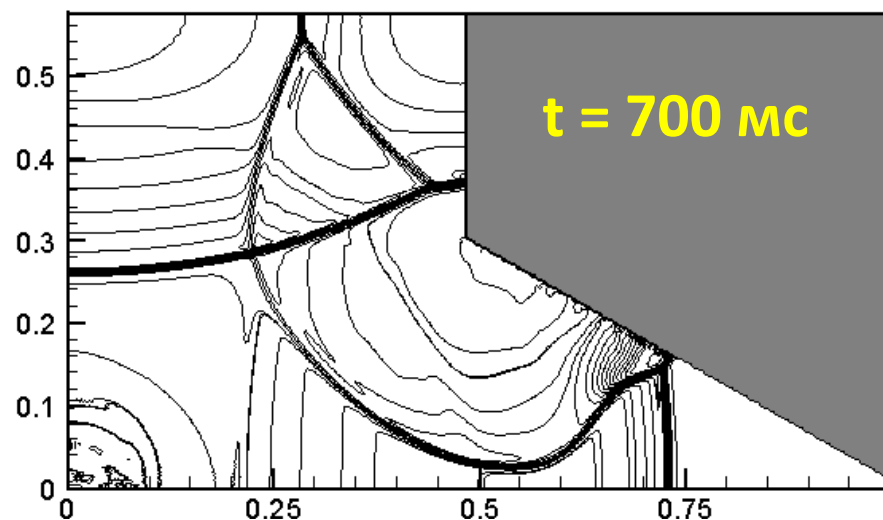
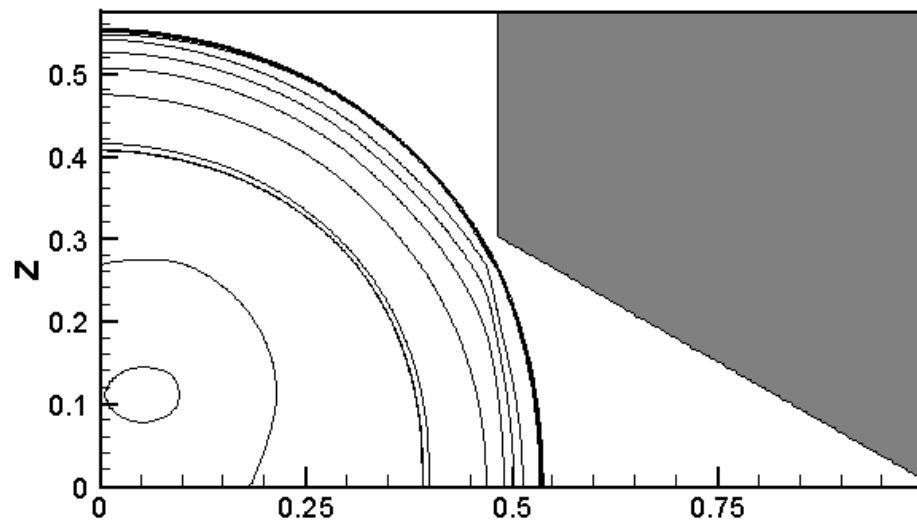
Разрушение детонации

Воздействие на конструкцию при различных сценариях развития взрыва

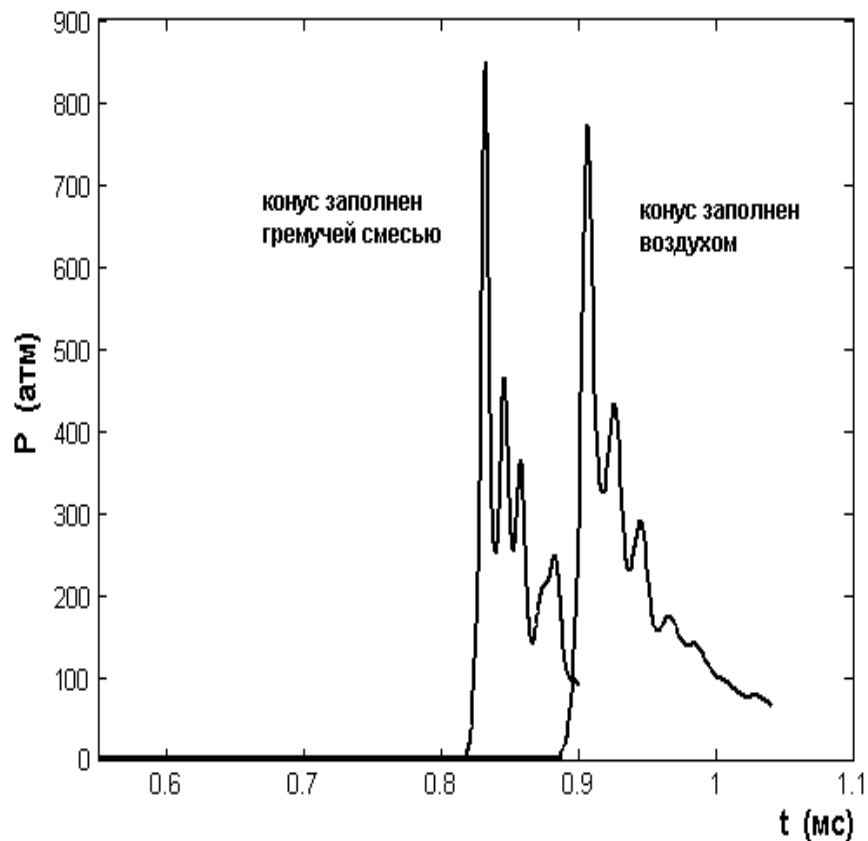


Тип волны	Давление в волне	Максимальное давление на стенке
Детонация ЧЖ	20 атм	до 100 атм (5ти кратное усиление)
“Пересжатая” детонация	до 60-80 атм	до 200 атм (3х-4х кратное усиление)
“Пересжатая” детонация (ПГД)	свыше 80 атм	до 200-250 атм (4х кратное усиление)
Ударная волна (разрушение детонации)	до 20 атм	до 160 атм (усиление до 7-8 раз)
Локальный взрыв за отраженной УВ	---	до 400-500 атм
УВ толкаемые волной дефлаграции	до 2 атм	до 16 атм, но воздействие многократное и с большей протяженностью импульсов

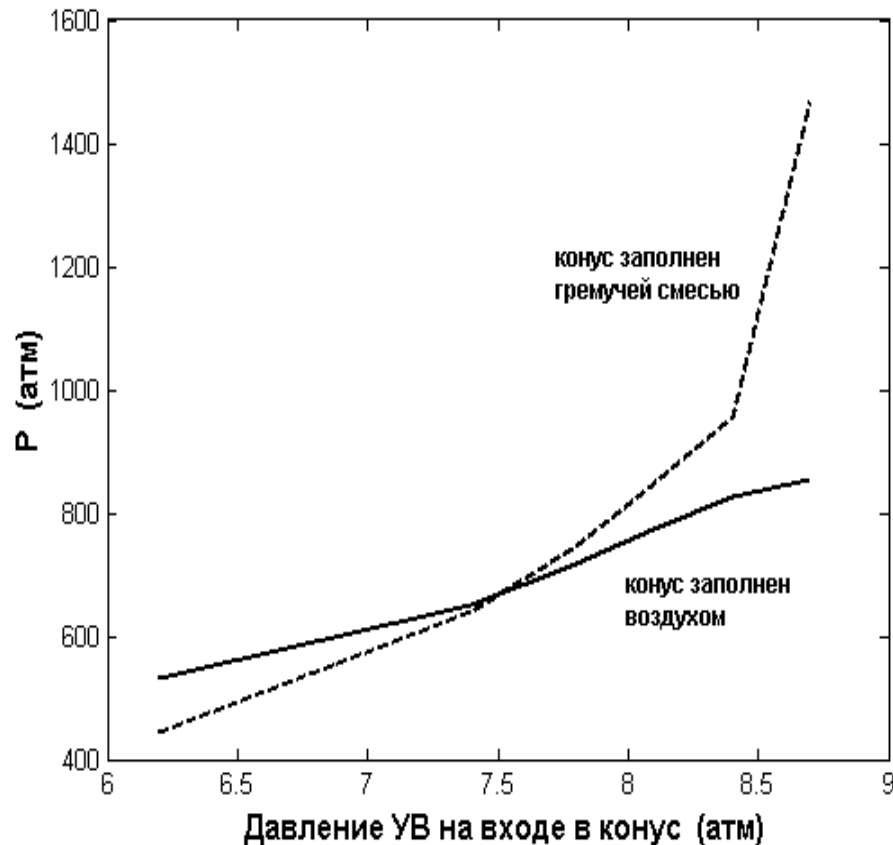
Кумуляция в конических мишенях



Кумуляция в конических мишенях

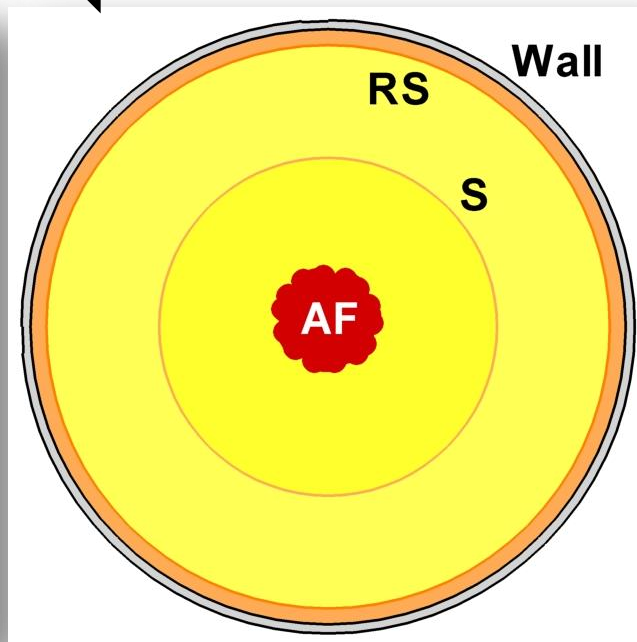
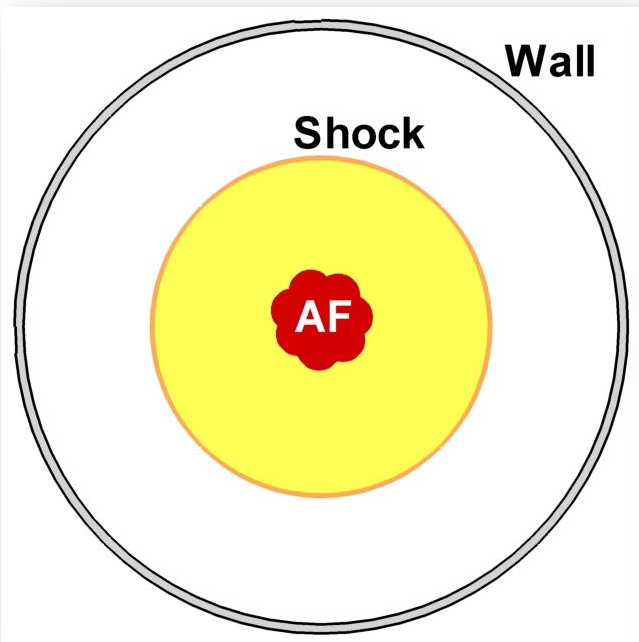
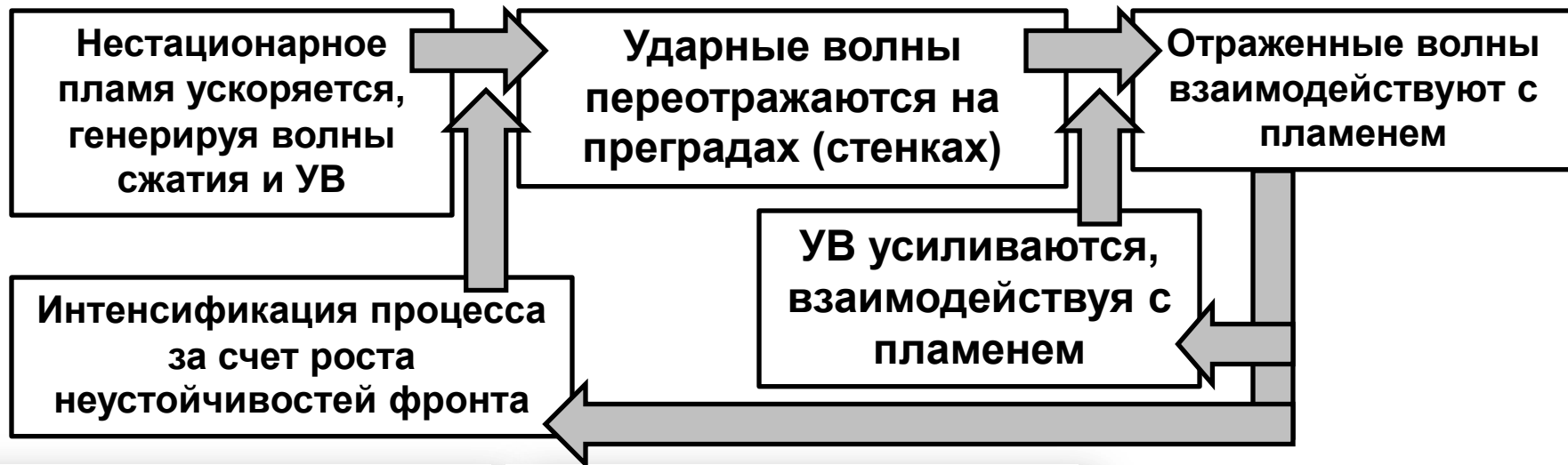


Изменение давления в вершине конуса при входе в конус ударной волны (в конус входит ударная волна интенсивностью 8 атм)



Зависимость давления в вершине конуса от интенсивности входящей ударной волны

Прогнозирование разрушающего воздействия процессов горения



AF – ускоряющееся пламя
S – ударная волна (УВ)
RS – отраженная УВ

Коллектив и сотрудничество

ОИВТ РАН:

Иванов М.Ф., Киверин А.Д.

Голуб В.В., Петухов В.А.

Uppsala University:

Либерман М.А.

НИИЯФ МГУ:

Рахимова Т.В., Попов Н.А., Манкелевич Ю.А., Чукаловский А.А.

Karlsruhe Institute of Technology:

Кузнецов М.С.



**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**