

Доклад на Ученом совете ОИВТ РАН

10 декабря 2018 г.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ И ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Киверин А.Д.

alexeykiverin@gmail.com



**Объединенный институт высоких температур
Российская академия наук
Лаборатория Математического моделирования**

Содержание

- Систематические исследования задач горения в лаборатории Математического моделирования ОИВТ РАН
- Обзор режимов горения газообразных смесей
- Механизмы взаимного действия химической кинетики и газодинамики
- Механизмы воспламенения в ударных трубах
- Механизмы перехода горения в детонацию в газообразных средах
- Распространение пламени и переход к детонации в дисперсных средах
- Заключение

Задачи горения

в лаборатории Математического моделирования ОИВТ РАН

1990-2000 – ренессанс в области теоретического исследования нестационарных и переходных режимов горения. Совершенствование ресурсной базы для проведения многомерных газодинамических расчетов с учетом химической кинетики горения.

2000-2010 – ренессанс в области экспериментального исследования нестационарного горения. Доступность диагностического оборудования для исследования быстропротекающих процессов.

2003 – инициирование **проф. Ивановым М.Ф.** работ в области систематического исследования динамических процессов в реагирующих средах.

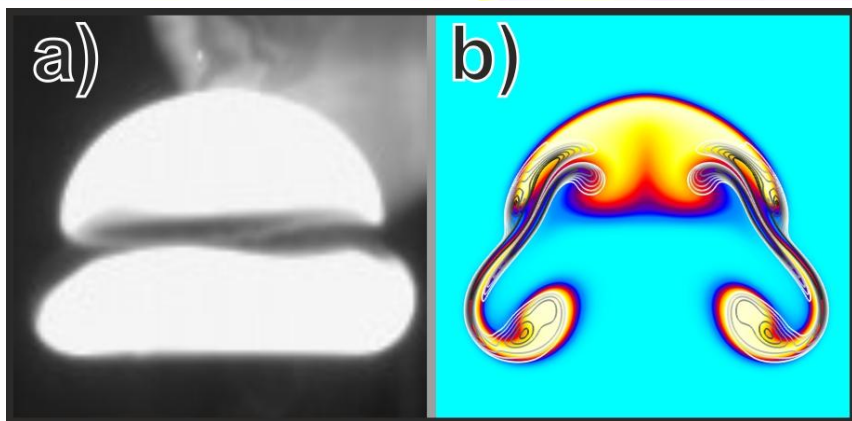
2010 – Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Либерман М.А., Фортон В.Е.// ДАН, Т. 434, №6, 756.

2010-ые – разработка методик расчета сложных газодинамических течений в газообразных и дисперсных средах, анализ и интерпретация экспериментальной данных, взаимодействие с ведущими научными школами в области экспериментального исследования динамических процессов в реагирующих средах (ОИВТ РАН, ИХФ РАН, ИТМО НАНБ, ВНИИТФ, ОДК-Авиадвигатель).

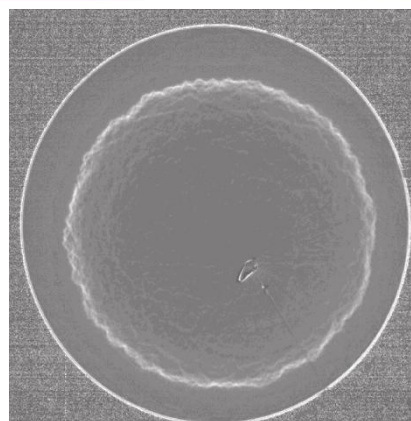
Сегодня – сформулированы основополагающие принципы и разработана платформа для математического моделирования, интерпретации и прогнозирования динамических процессов в реагирующих газообразных и дисперсных средах.

Прогностическая способность разработанных принципов математического моделирования апробирована на ряде прикладных задач, включая **ингибирование горения водорода в газопоршневых двигателях, развитие очагов горения в смесях водорода ультрабедного состава** и др. Получена интерпретация ряда экспериментальных данных в области **воспламенения и детонации газообразных смесей.**

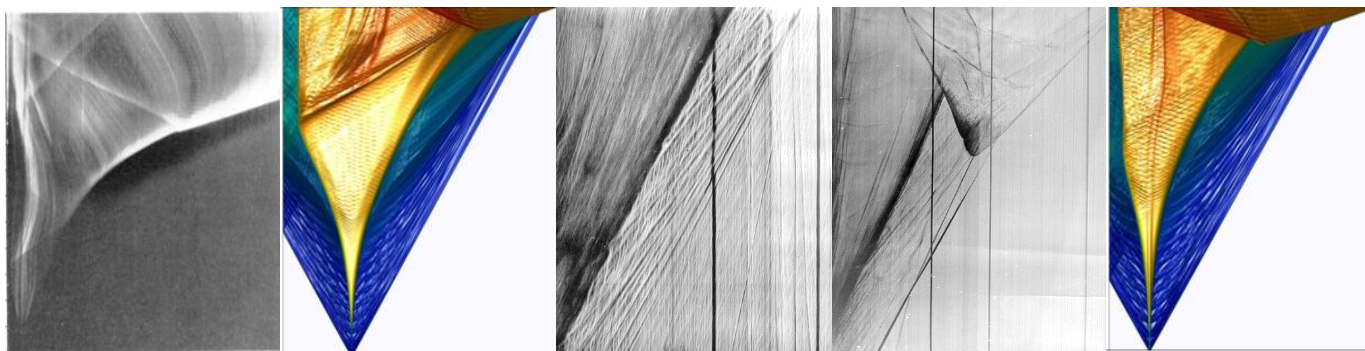
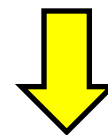
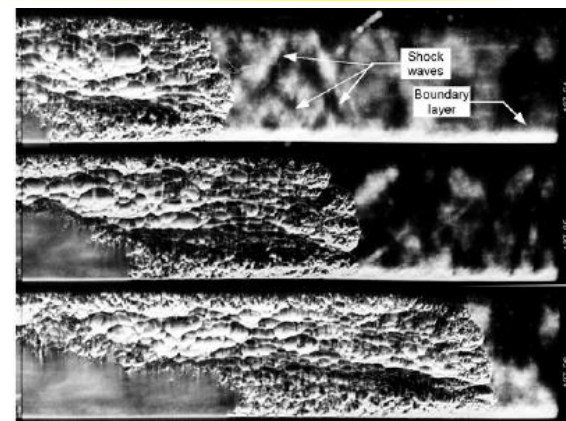
Обзор режимов горения газообразных смесей



Горение вблизи концентрационных пределов



Дефлаграционное горение

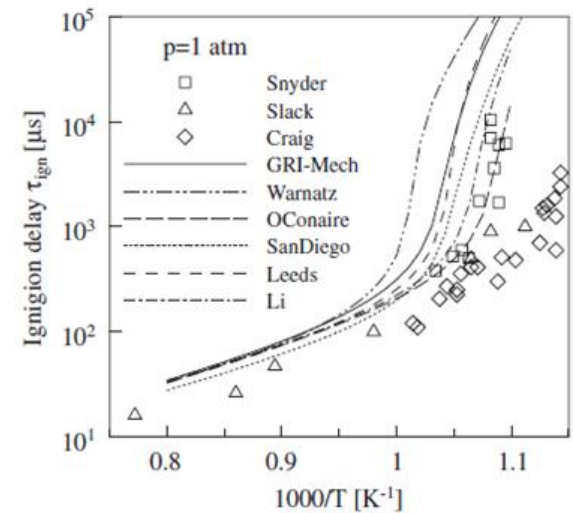
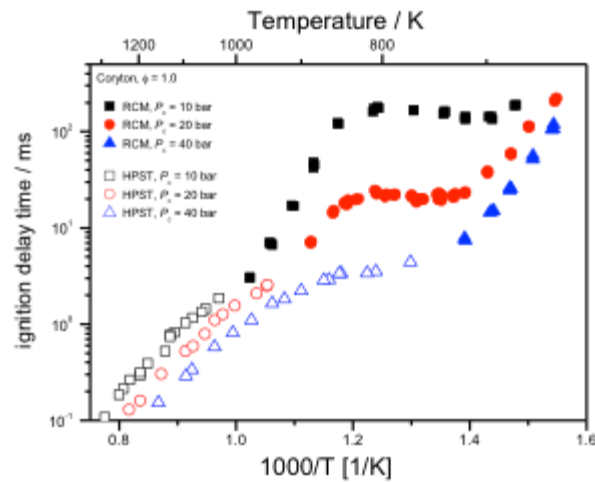
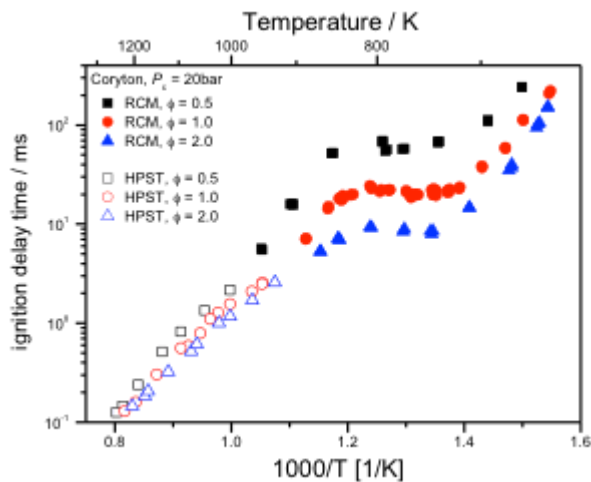


Ускорение пламени и переход в детонацию

Механизмы взаимного действия химической кинетики и газодинамики

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_k u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \rho Y_k V_{k,j}}{\partial x_j} + \left[\frac{\partial Y_k}{\partial t} \right]_{\text{chem}}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho E u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij} u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \sum_k h_k(T) Y_k V_{k,j} \right] + \sum_k \rho h_k(T) \left(\frac{\partial Y_k}{\partial t} \right)_{\text{chem}}$$



Механизмы воспламенения в ударных трубах

Combustion and Flame 157 (2010) 1436–1438



Contents lists available at ScienceDirect

Combustion and Flame

journal homepage: www.elsevier.com/locate/combustflame

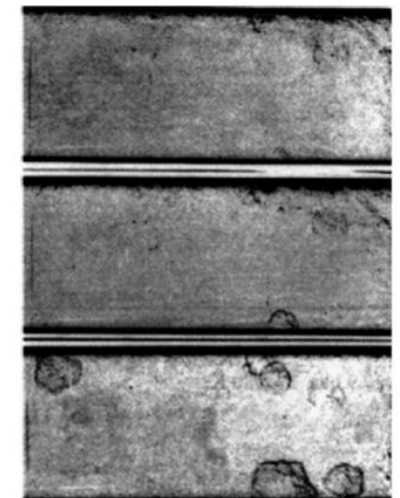
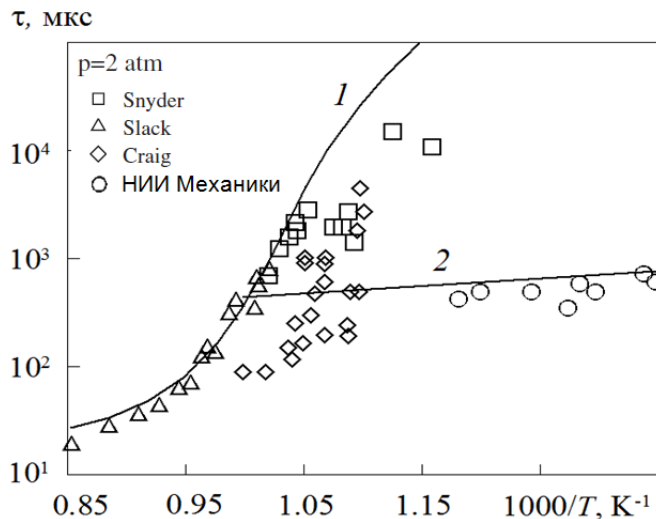
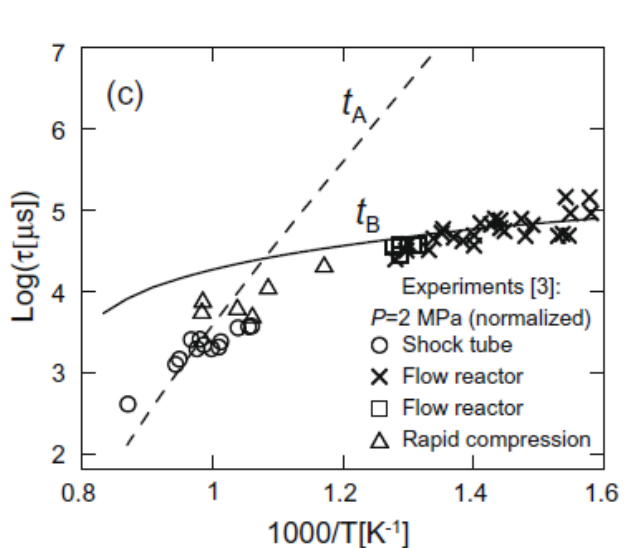


Brief Communications

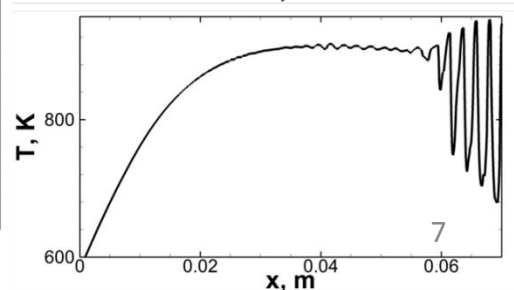
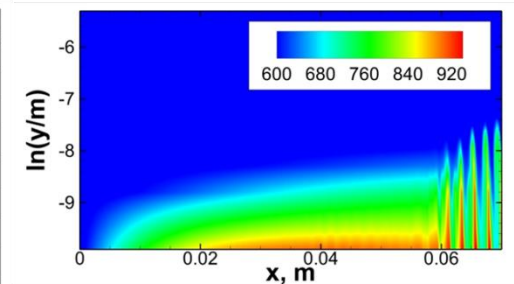
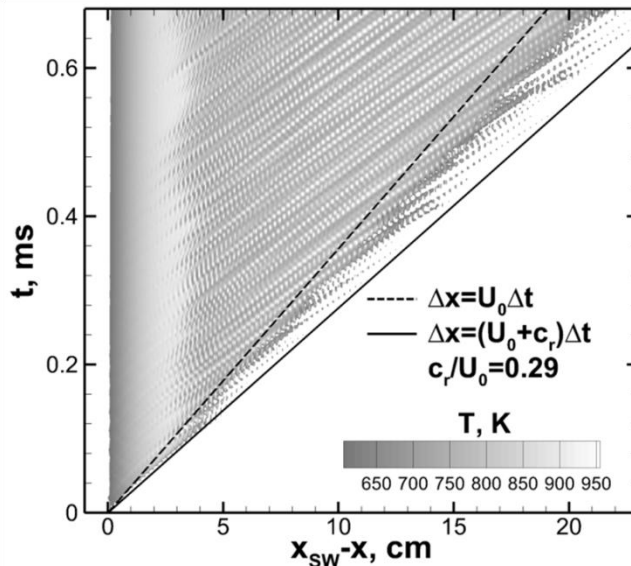
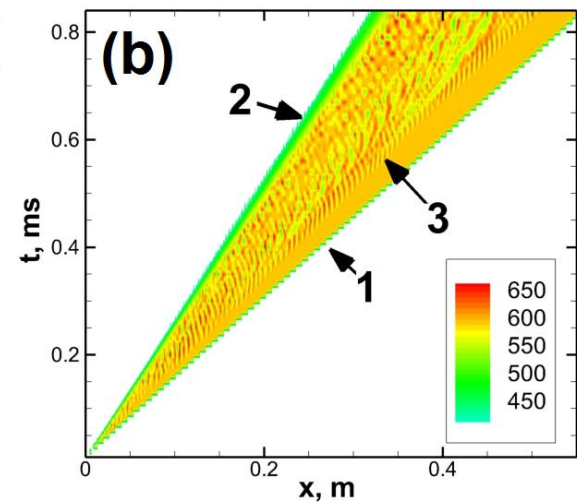
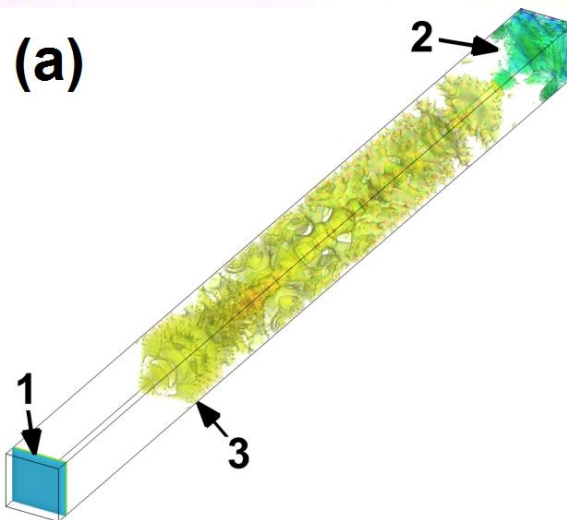
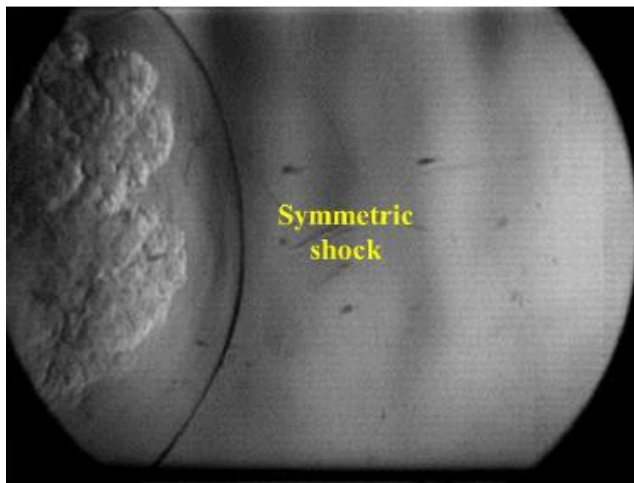
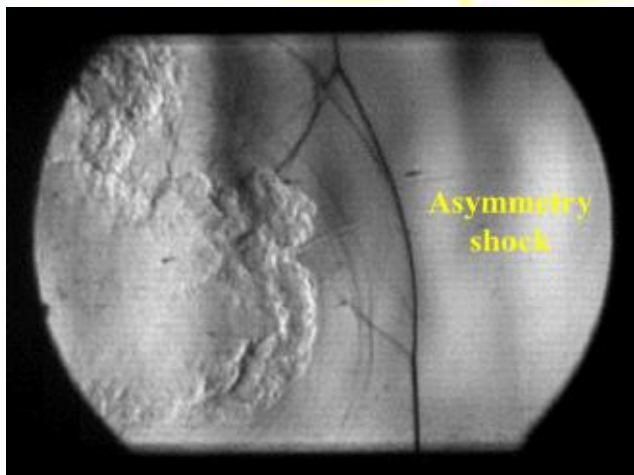
Ignition delay in hydrogen–air and syngas–air mixtures: Experimental data interpretation via flame propagation

Sergey P. Medvedev*, Gennady L. Agafonov, Sergey V. Khomik, Boris E. Gelfand

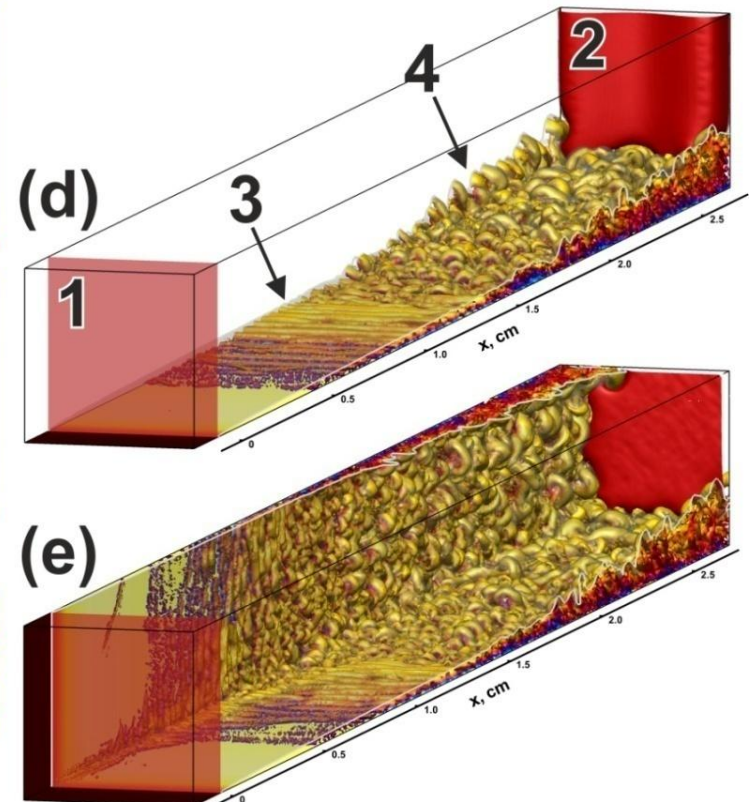
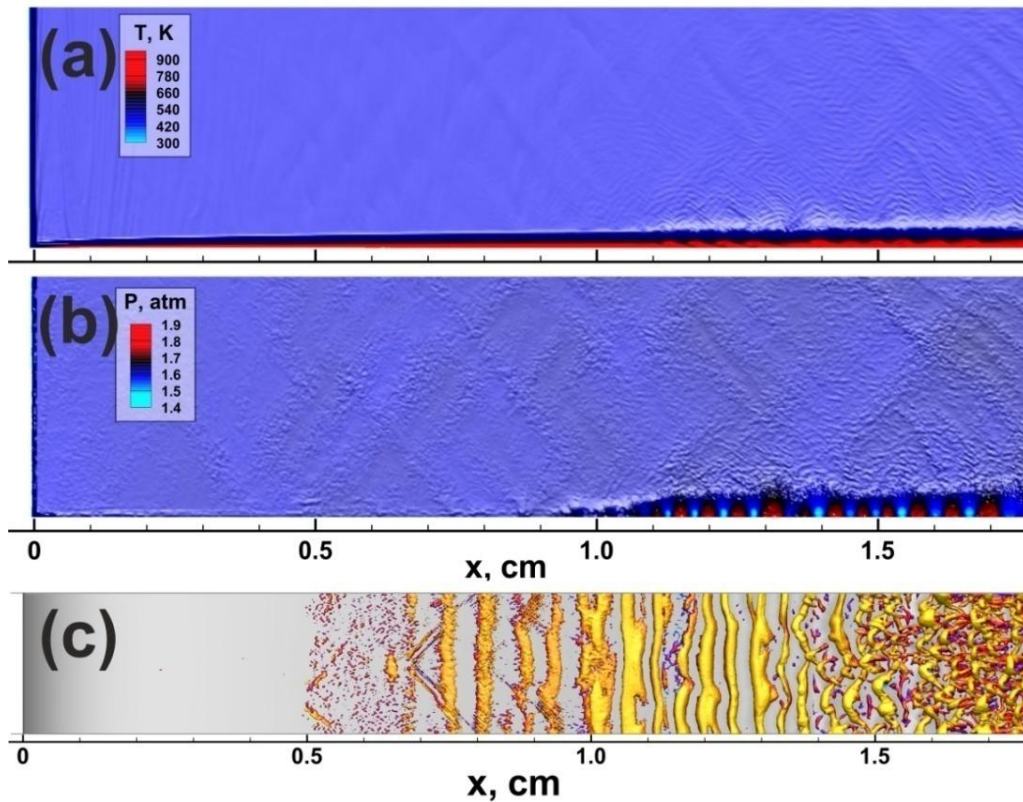
Laboratory of Heterogeneous Combustion, Semenov Institute of Chemical Physics, RAS, Kosygina Str. 4, 119991 Moscow, Russia



Очаговое воспламенение. Эволюция течения, гидродинамическая неустойчивость.

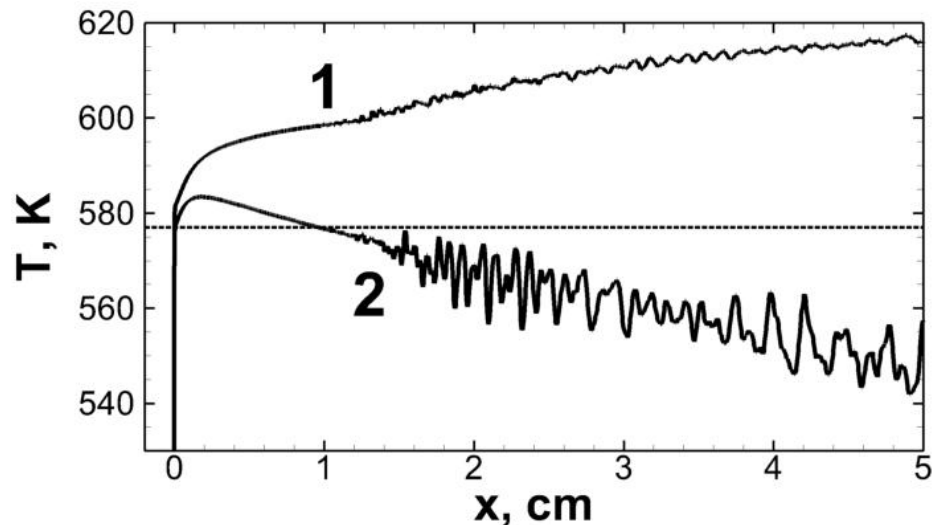
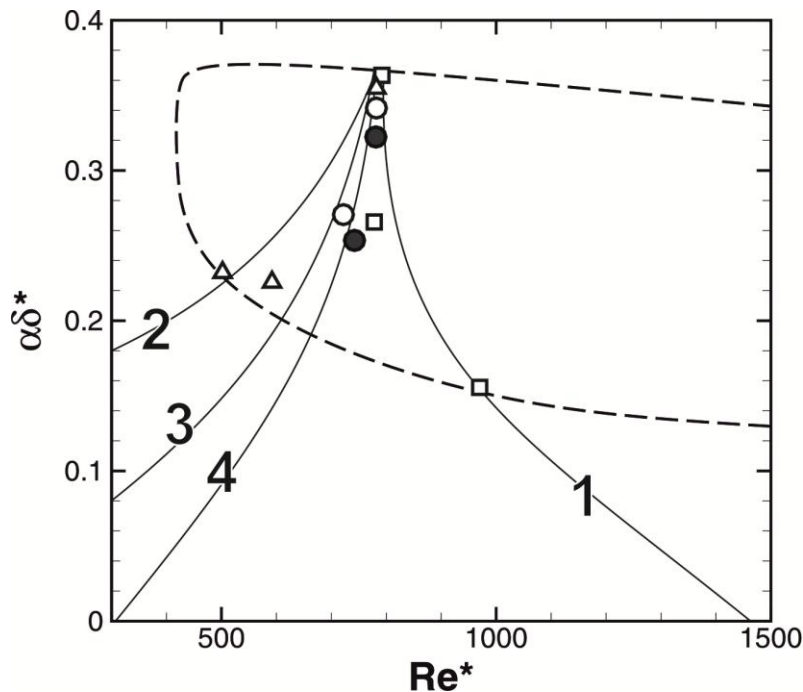


Очаговое воспламенение. Эволюция течения, гидродинамическая неустойчивость.

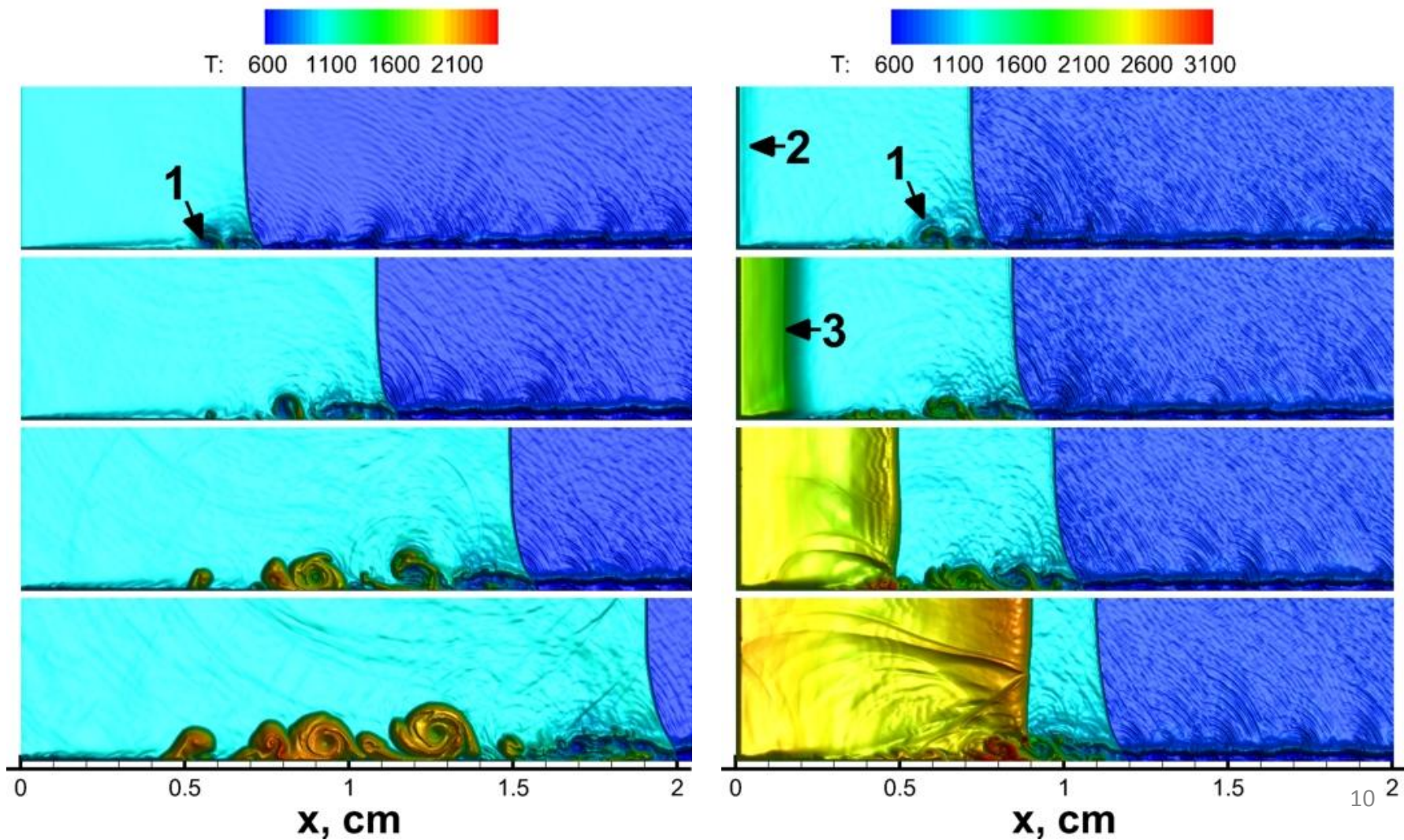


Очаговое воспламенение. Эволюция течения, гидродинамическая неустойчивость.

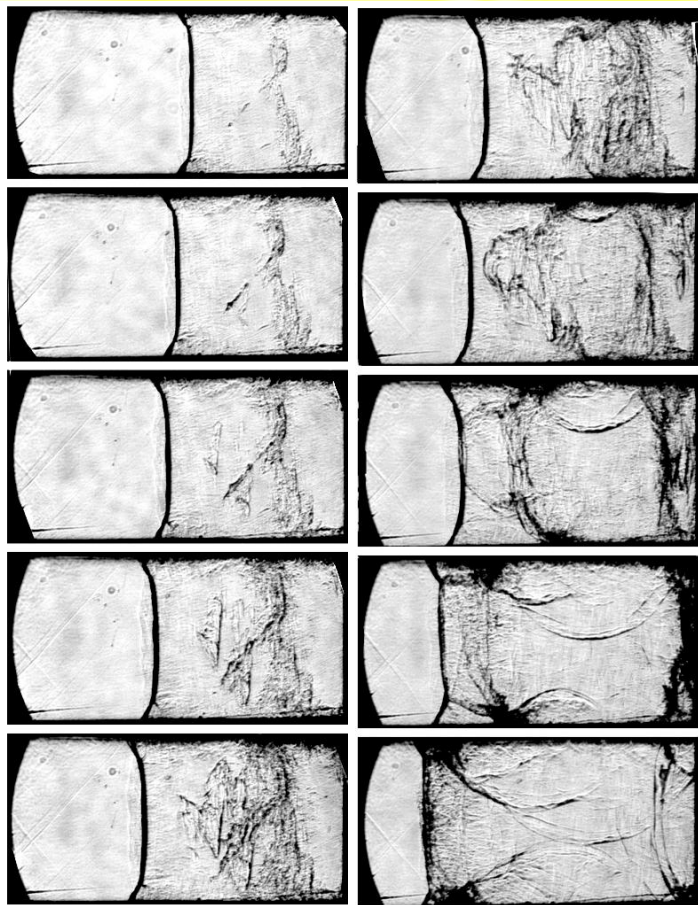
The temperature field structure is determined mainly by the mechanisms of boundary layer instability development. The kinetic energy dissipation related to the flow deceleration inside boundary layer results in local heating of the test gas. At the same time, the heat losses to the tube wall lead to the cooling of the gas. Therefore the temperature stratification takes place on the scales of the boundary layer. As soon as the shock wave reflected from the end-wall of the tube interacts with the developed boundary layer the localized hot regions arise at a certain distance from the end wall. The position of these hot regions is associated with the zones of shock wave interaction with roller vortices at the margin between the boundary layer and the bulk flow. Formulated mechanism of the temperature field evolution can be used to explain the peculiarities of non-steady shock-induced ignition of combustible mixtures with moderate ignition delay times, where the ignition starts inside localized kernels at distance from the end wall.



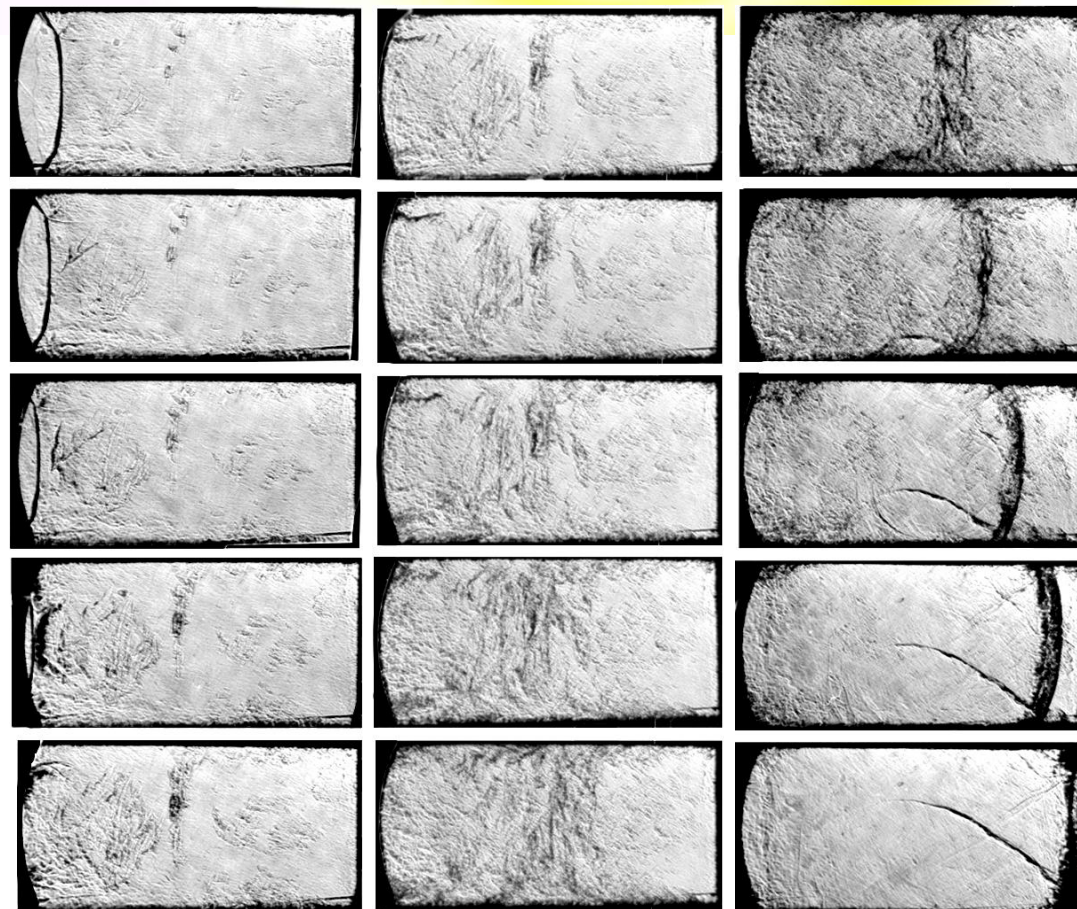
Развитие очага экзотермической реакции.



Воспламенение и формирование детонации

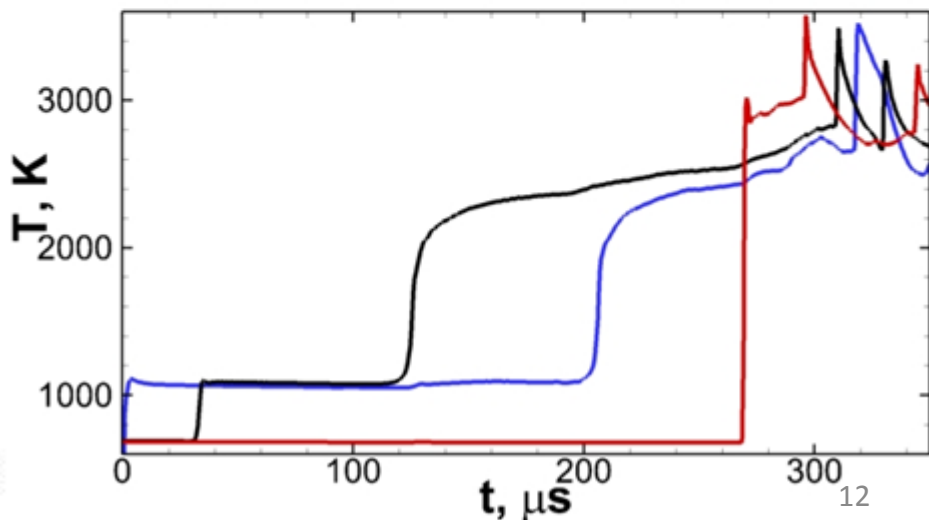
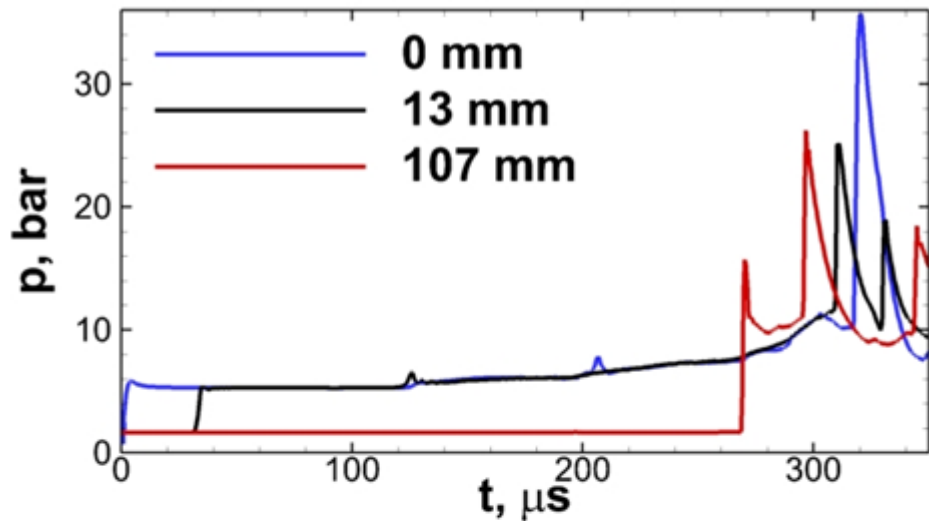
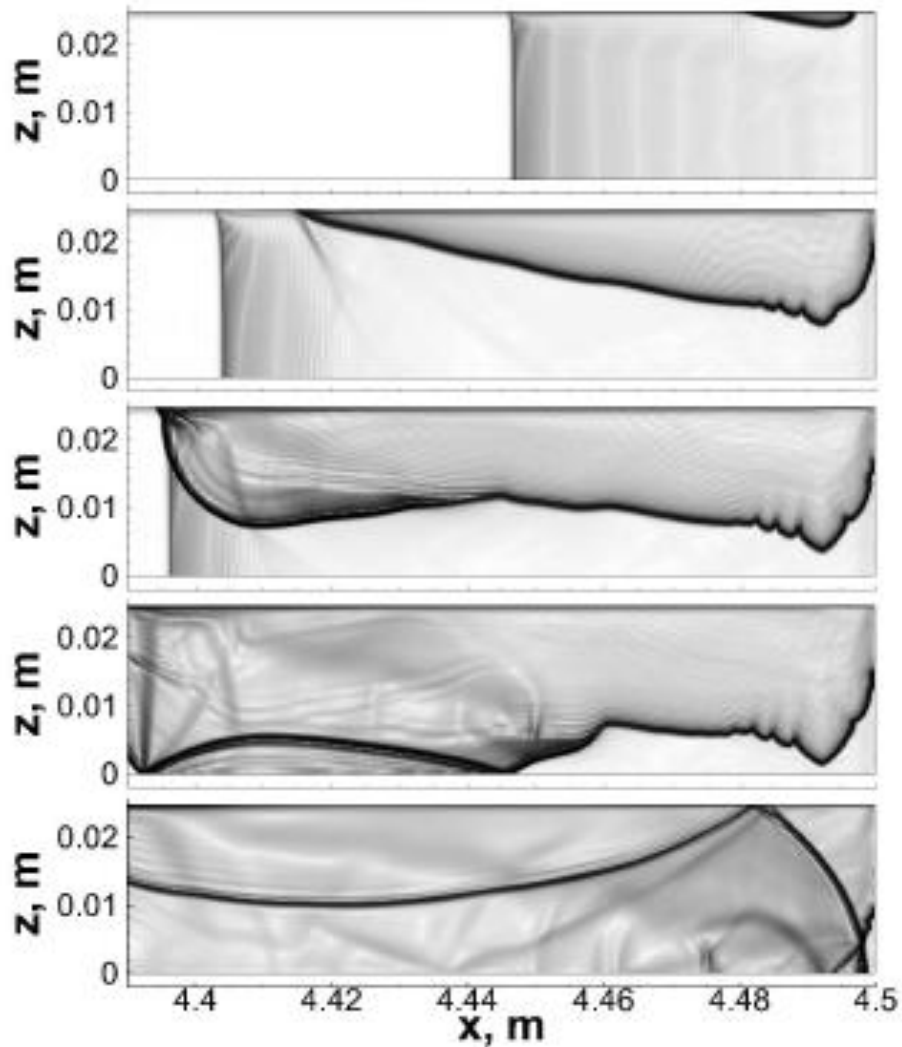


Ignition at $\sim 2-3$ cm from the wall.
Detonation arises as a sequence of
flame-shock interaction.

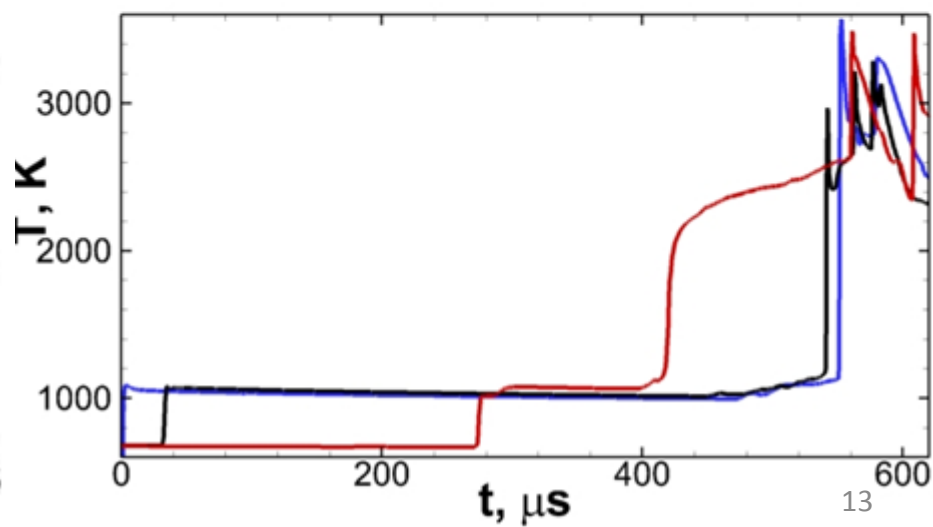
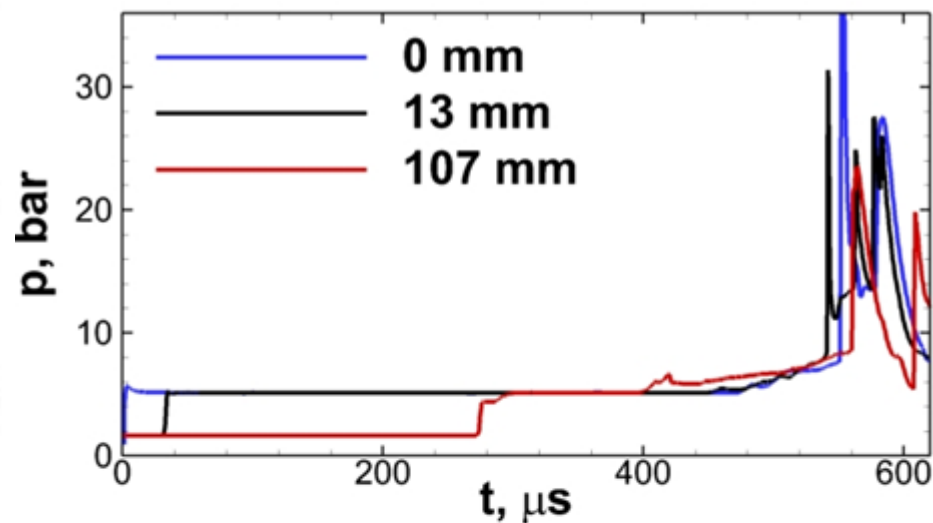
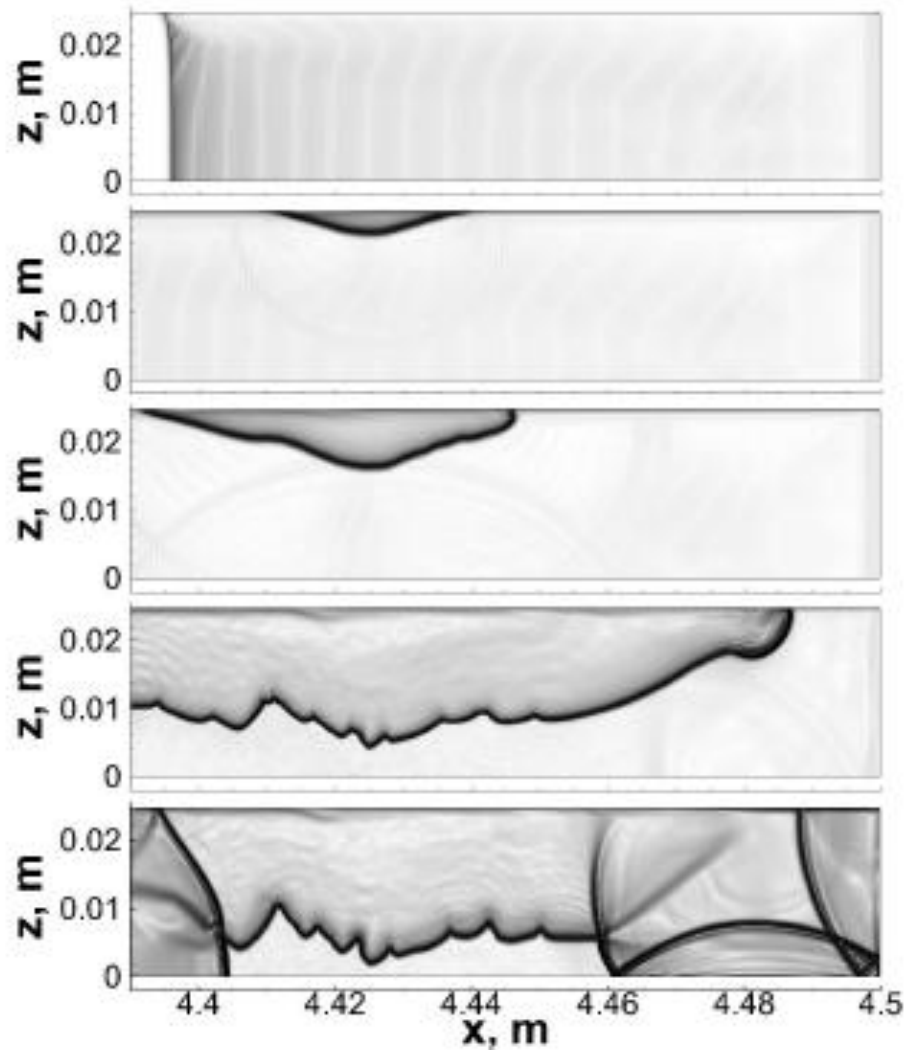


Ignition at ~ 10 cm from the wall.
Detonation propagates towards the wall.

Воспламенение и формирование детонации



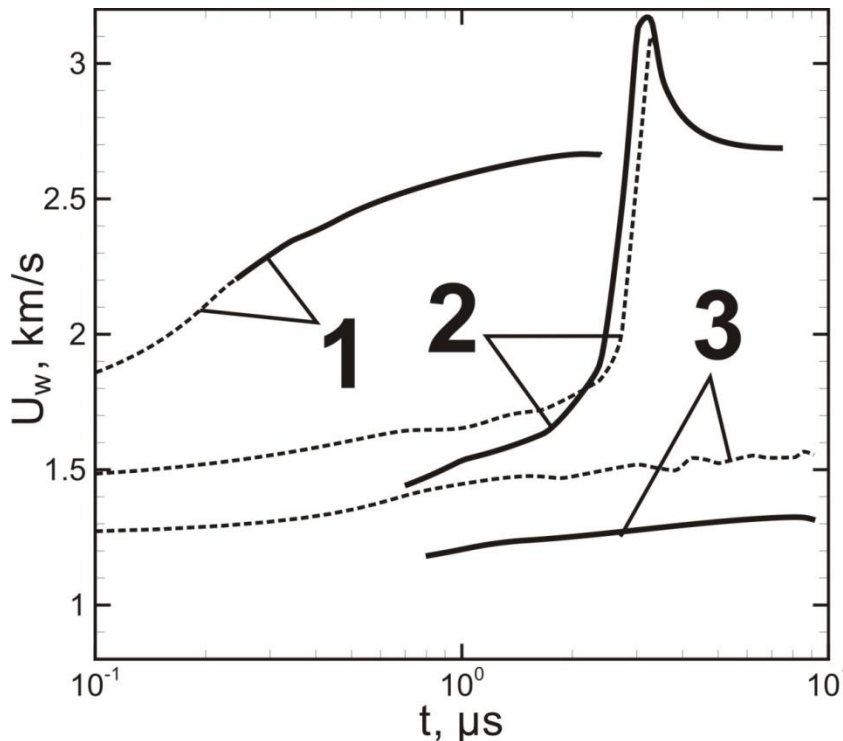
Воспламенение и формирование детонации



Инициирование детонации

как пример нестационарной задачи теории горения

Успех инициирования детонации в горючей смеси обеспечивается выбором геометрии канала, массой горючей компоненты и величиной подводимой энергии (или способом ее подведения).



1 – Прямое инициирование детонации ($\Delta Q > \Delta Q_{\text{крит}}$)

2 – Переход горения в детонацию за отошедшей ударной волной ($\Delta Q \sim \Delta Q_{\text{крит}}$)

3 – Инициирование волны медленного горения ($\Delta Q < \Delta Q_{\text{крит}}$)

К ТЕОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗАХ

Я. Б. Зельдович

Дадим выражение пути, на котором скорость пламени меняется от u_1 до u_2

$$x_{1,2} = d \cdot 0.6n (\ln u_2 - \ln u_1) / \lambda(n-1) [b \sqrt{\lambda}(n-1) - 1]. \quad (52)$$

Как видно из формулы, это расстояние сравнительно слабо (логарифмически) зависит от u_1 и u_2 .

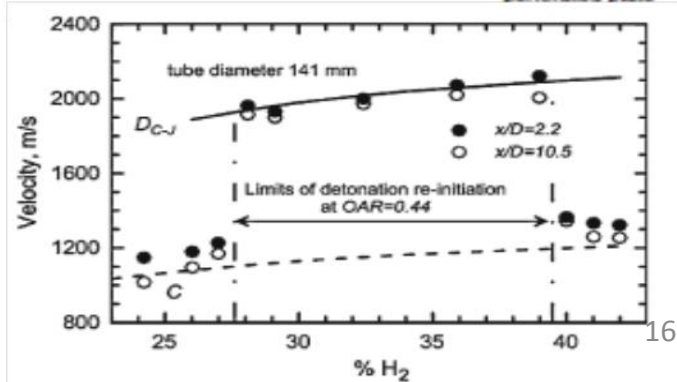
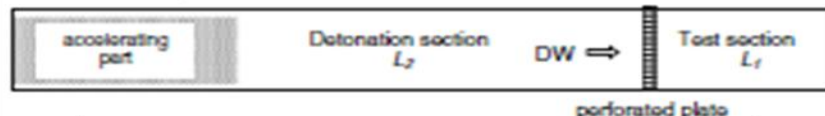
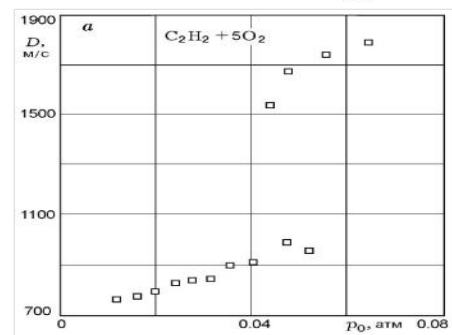
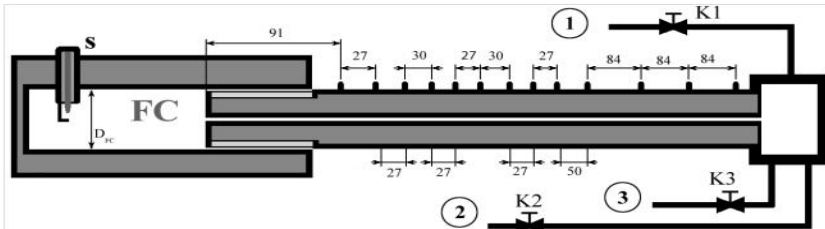
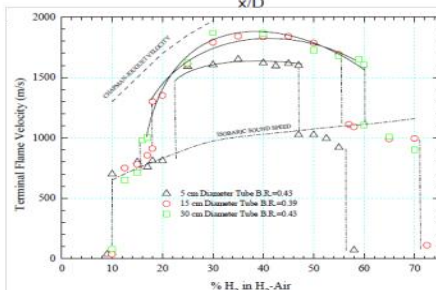
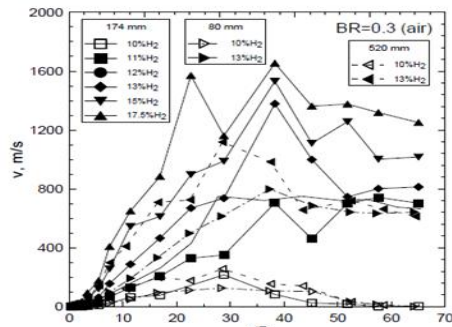
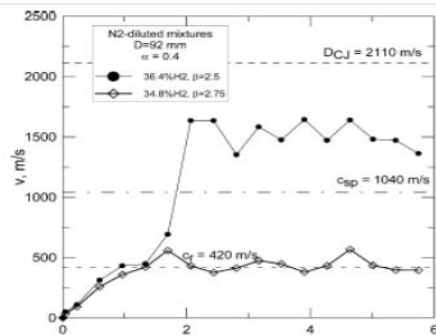
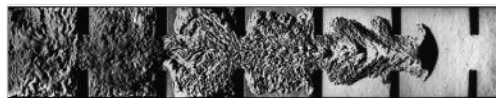
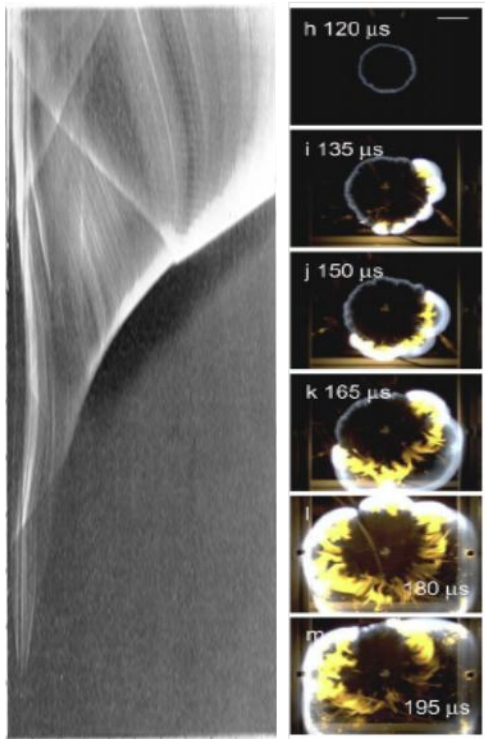
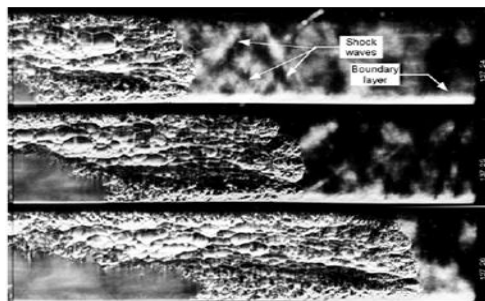
Можно полагать, что мы получим расстояние возникновения детонации, положив $u_1 = u_n$ (в начале — нормальная скорость горения) и $u_2 = c$, где c скорость звука; когда скорость горения достигнет скорости звука, пользоваться расчетом без учета сжимаемости газа уже нельзя, горение вызовет сильное сжатие смеси, которое приведет к ее самовоспламенению, т. е. к детонации. Как видно из формулы, точный выбор u_1 и u_2 мало влияет на величину x .¹⁶

Подставим числа для типичного случая: водород — воздушная смесь, $u_n = 2.70$ м/сек., $c = 400$ м/сек., $n = 8$; $b = 1.7$; $\lambda = 0.03$ (гладкая труба).

Подставляя, получим $x = 100 d$.

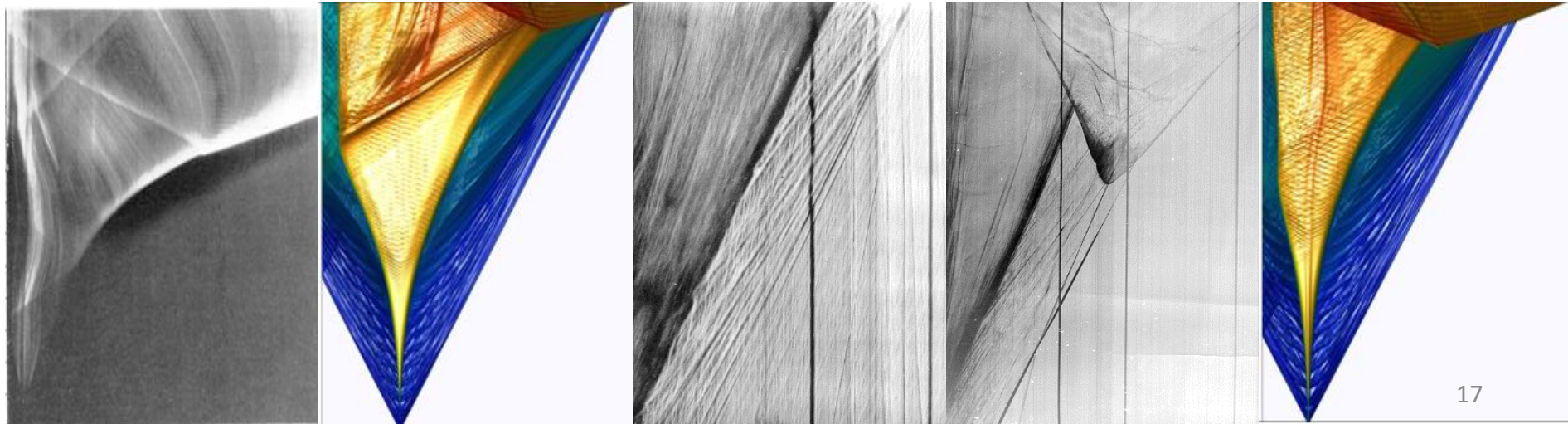
Для шероховатой трубы с вдвое большим коэффициентом сопротивления $\lambda = 0.06$ мы получим вчетверо меньшую длину $x = 25 d$.

Ускорение пламени и переход к детонации



Экспериментальные факты

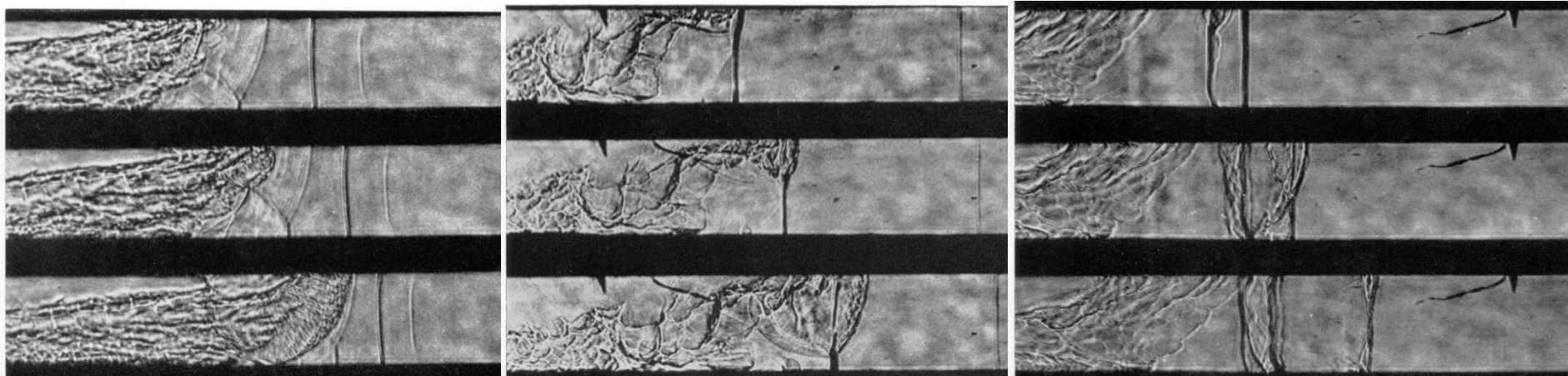
- Ускоренное в канале пламя прежде чем сформировать устойчивую детонацию проходит стадию так называемого «запертого пламени» (*choked flame*).
- Детонация возникает либо на фронте запертого пламени, либо на контактном разрыве впереди фронта.
- Детонация формируется только в высокоактивных смесях.



Основные вопросы

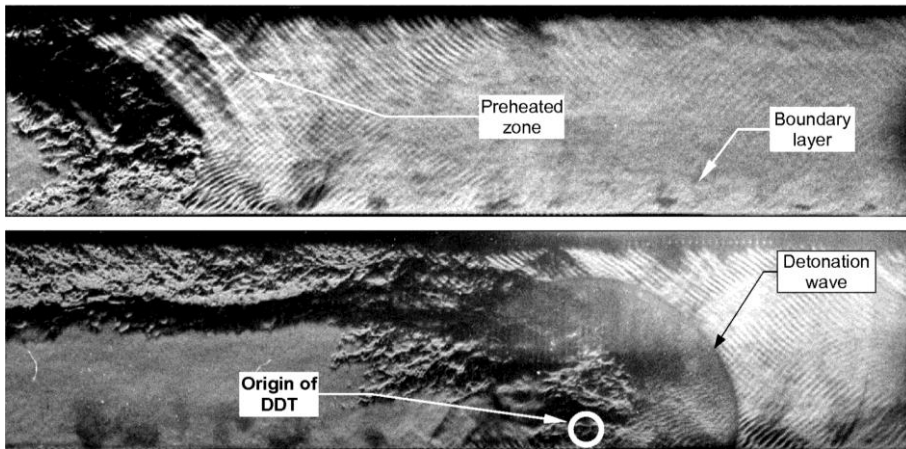
необходимые для построения критериев возникновения детонации

- Каковы базовые механизмы ускорения пламени в канале?
- Какова природа режима запертого пламени?
- Какова структура запертого пламени и каковы условия устойчивости такой структуры?
- Какова природа контактных разрывов, возникающих впереди запертого пламени?
- Каковы роли особенностей формирующихся течений и химической кинетики?

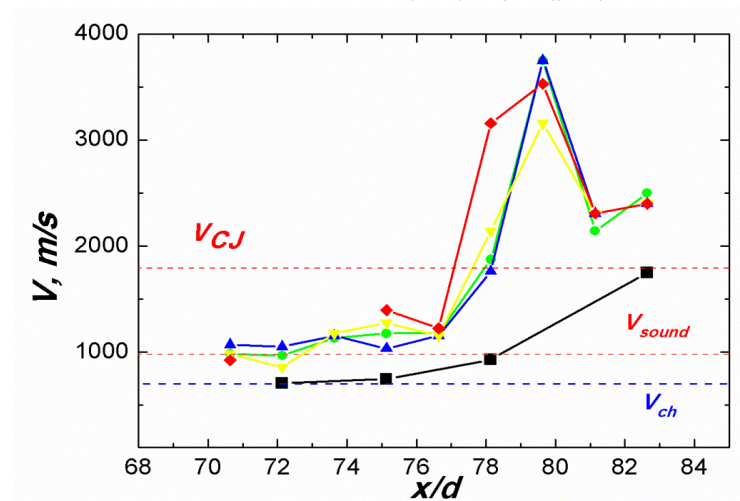
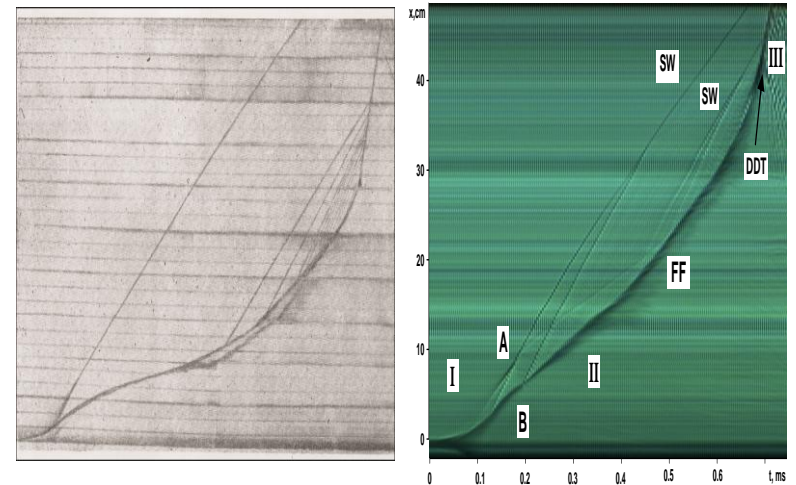


Эвристические положения в литературе 1980-2000

- “Turbulent flame brush”
- “SWACER mechanism of DDT”

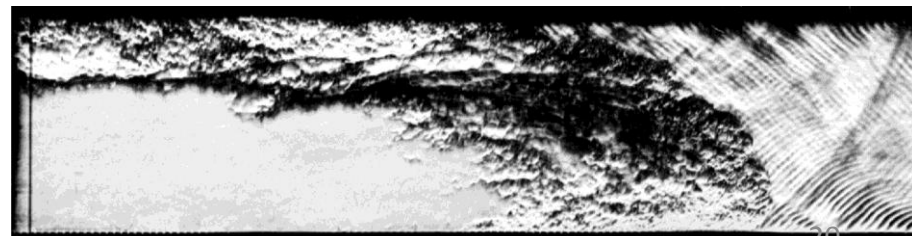
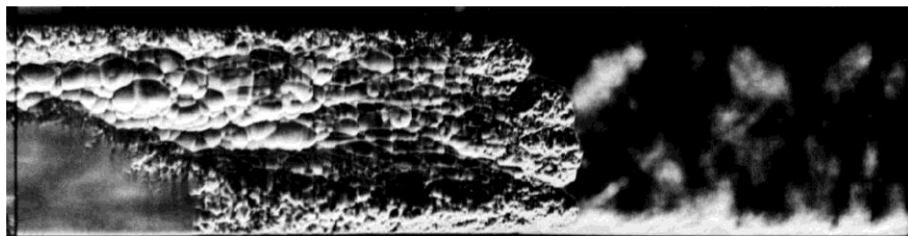
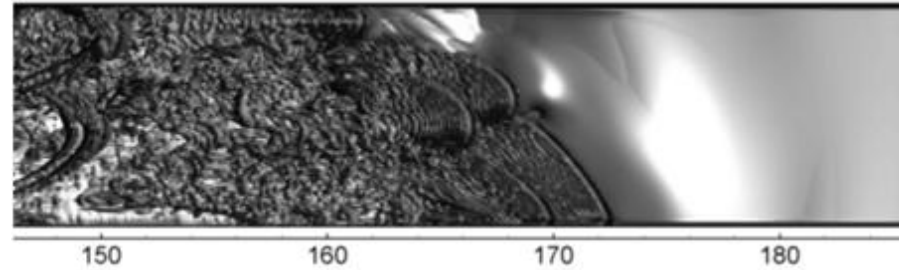
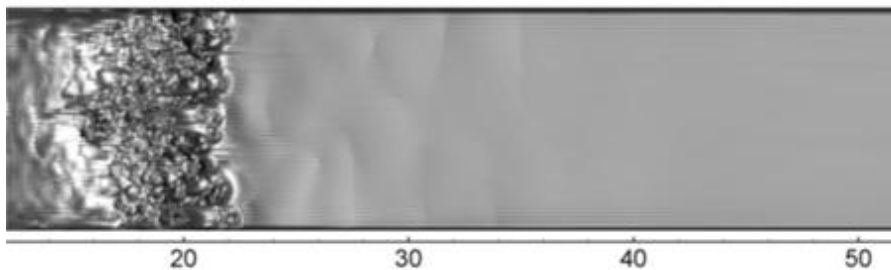
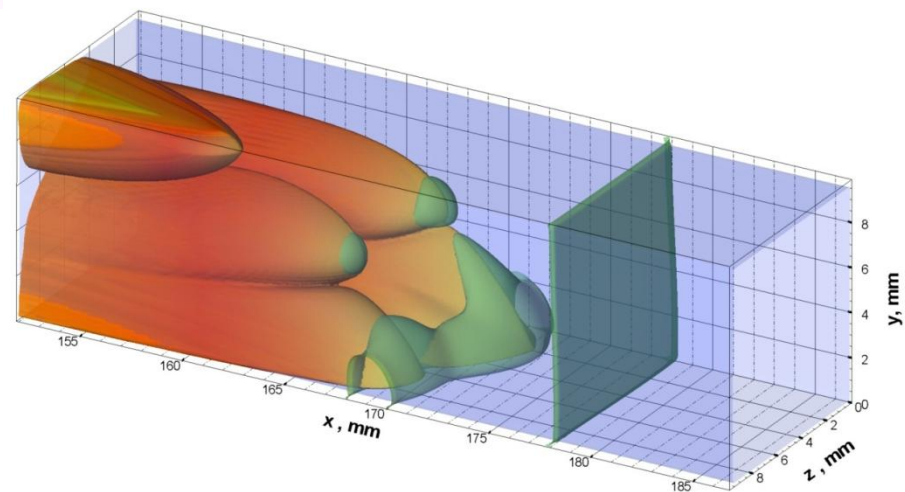
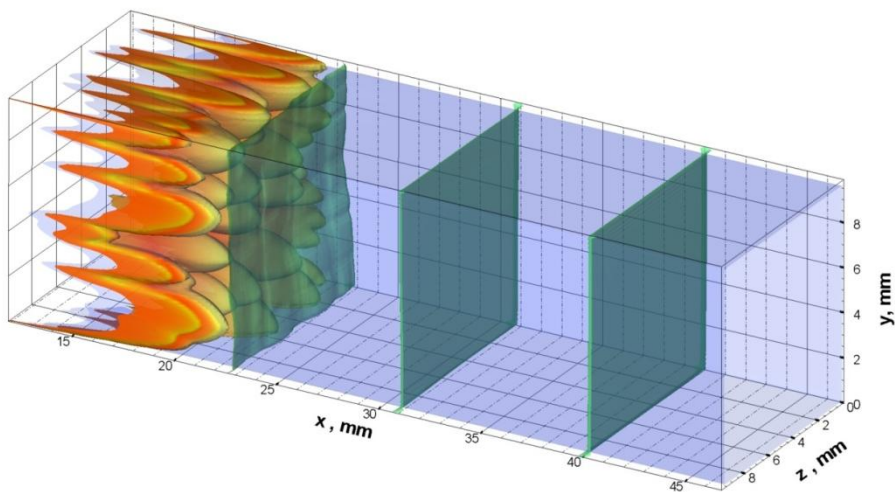


Kuznetsov M., KIT



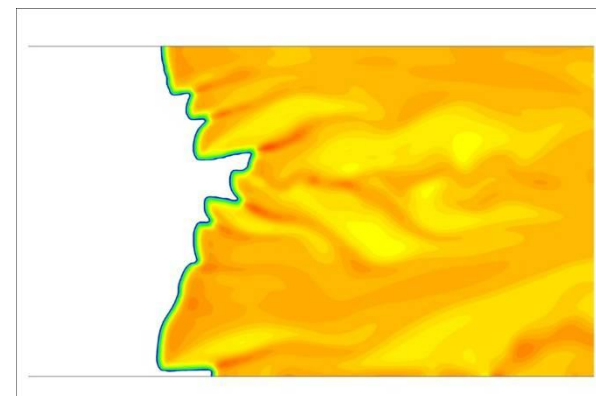
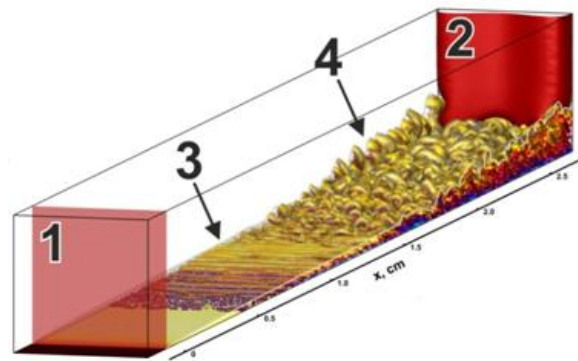
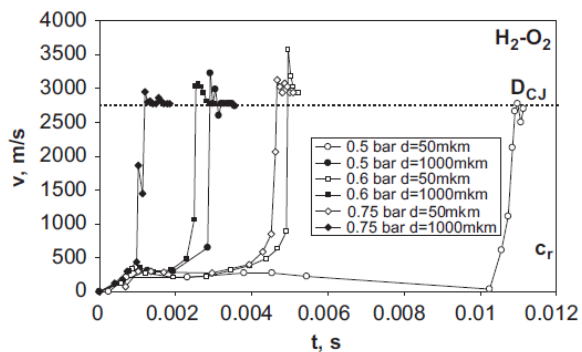
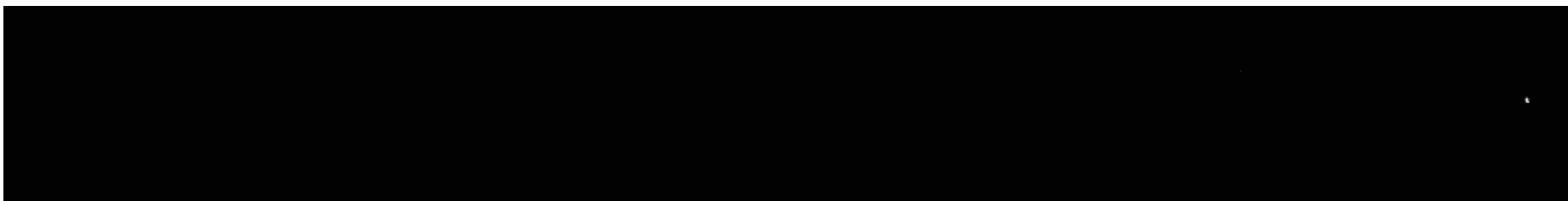
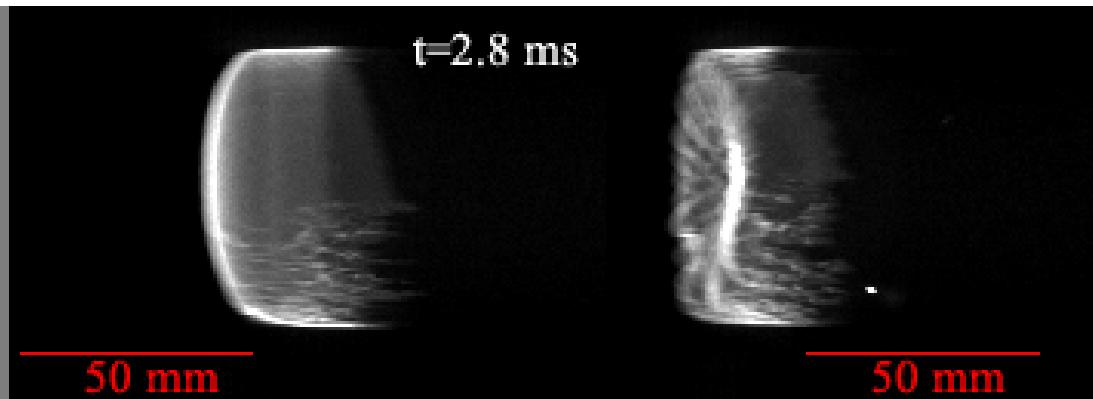
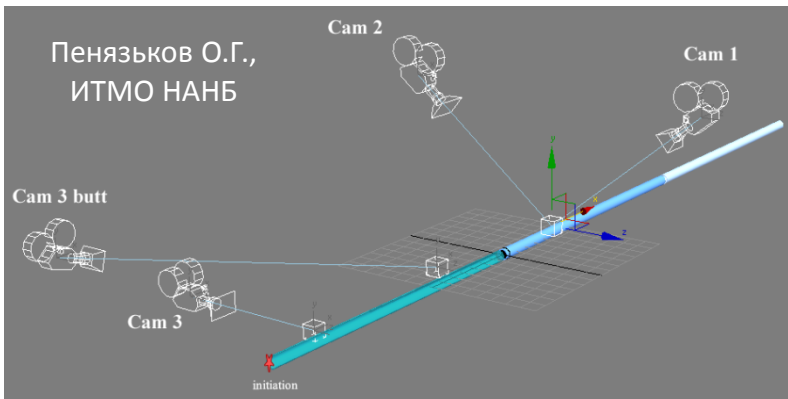
Пенязьков О.Г., ИТМО НАНБ

Структура потока в канале визуализация



Структура потока в канале

3D визуализация



Структура потока в канале сжатие свежей смеси

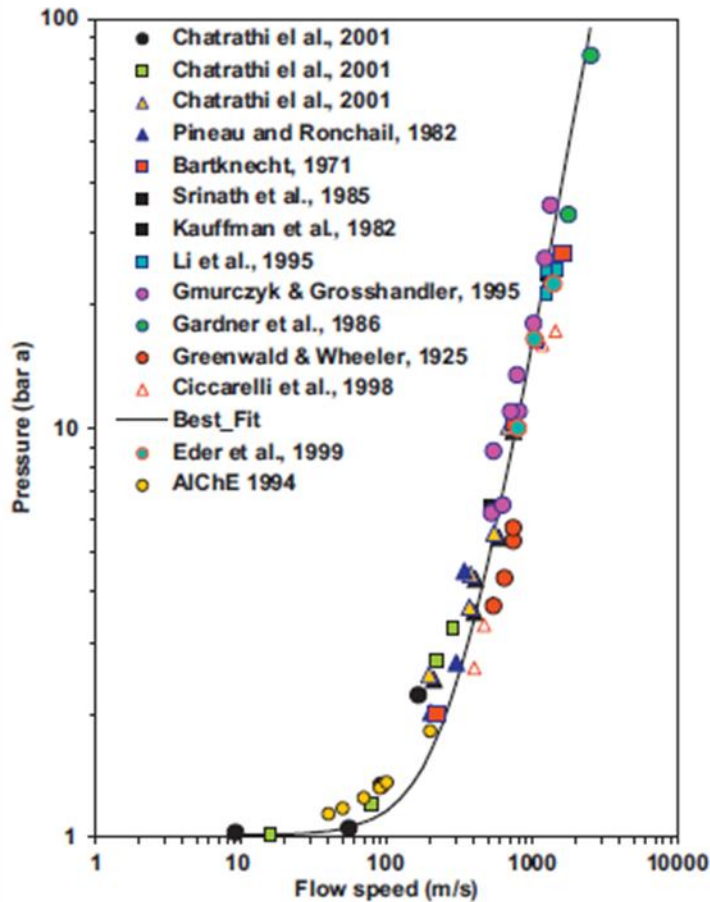
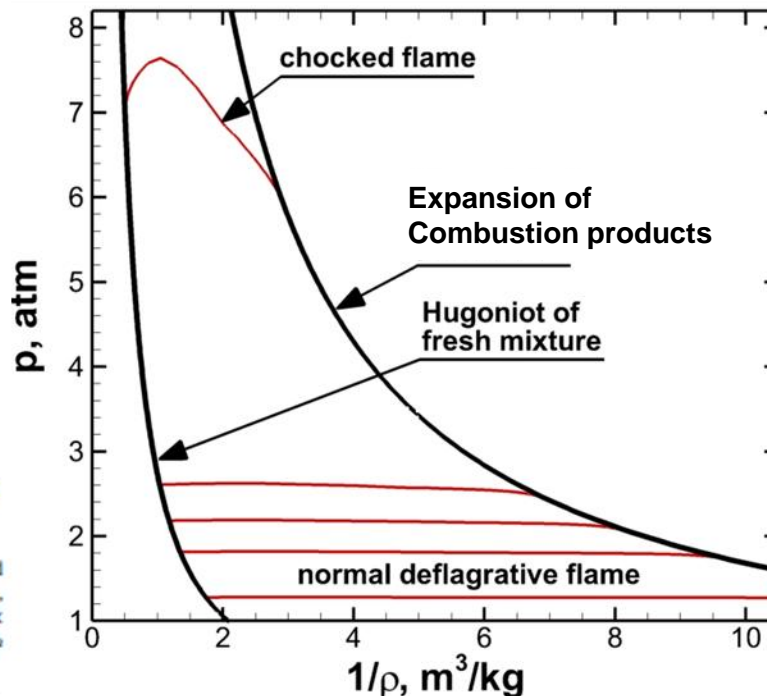


Fig. 4. Correlation between flow speed and pressure build-up inside elongated enclosures (e.g. tubes and galleries) for gas-air and dust-air mixtures. (AIChE, 1994; Eder, Gerlach, & Mayinger, 1999; Gardner, Winter, & Moore, 1986; Gmurczyk & Grosshandler, 1995; Greenwald & Wheeler, 1925; Kauffman et al. 1982; Pineau & Ronchail, 1982; Srinath et al., 1985).

Сжатие свежей смеси происходит в результате воздействия серии последовательных волн сжатия, генерируемых движущимся источником энергии (фронтом пламени), что соответствует сжатию по ударной адиабате.



Два механизма сжатия смеси при распространении пламени

- Расширяющиеся в ограниченном объеме продукты горения вытесняют газ вперед вдоль стенок канала. Собственно этот механизм и определяет в большей степени ускорение потока на начальных стадиях.
- Энергия, выделяемая внутри зоны реакции (фронта пламени) переносится акустическими волнами из зоны реакции и передается газу.

Распространяющееся пламя \Leftrightarrow движущийся источник энергии.

Kurylo J., Dwyer H.A., Oppenheim A.K.// AIAA J. 1980. V. 18. № 3. P. 302-308.

Deshaies B., Joulin G.// Comb. and flame. 1989. 77. P. 201-212.

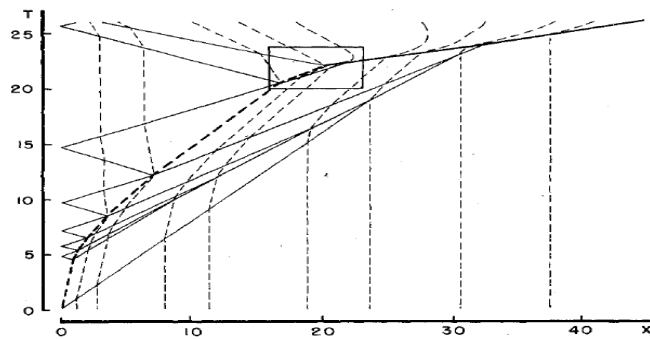
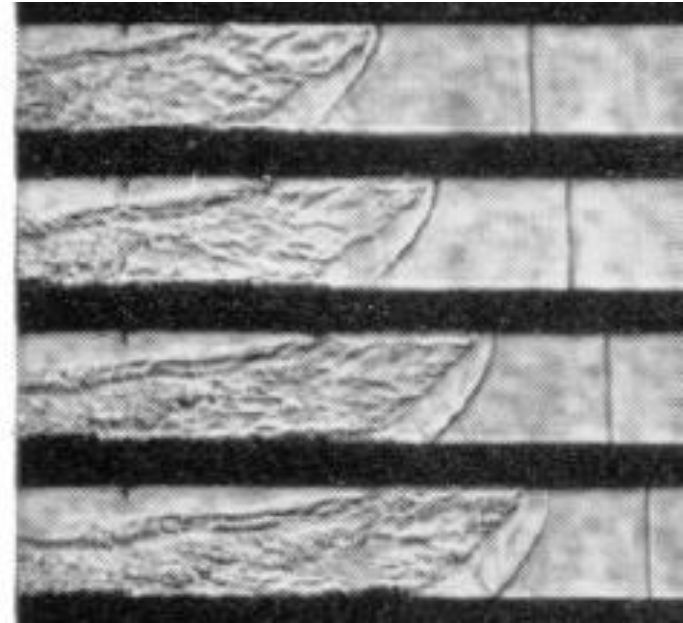
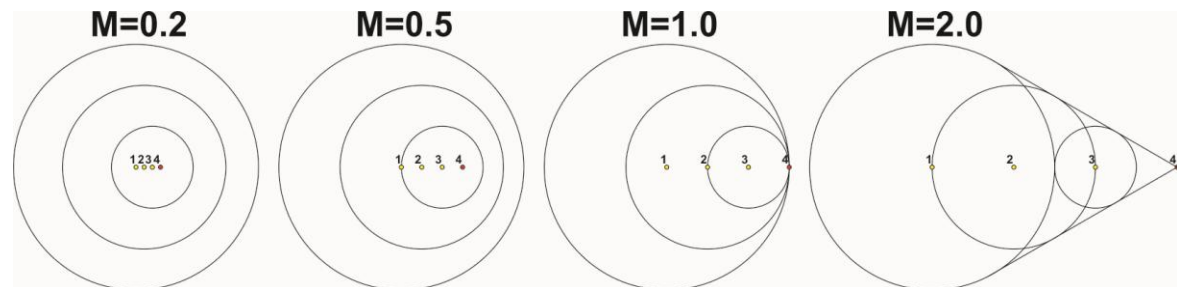
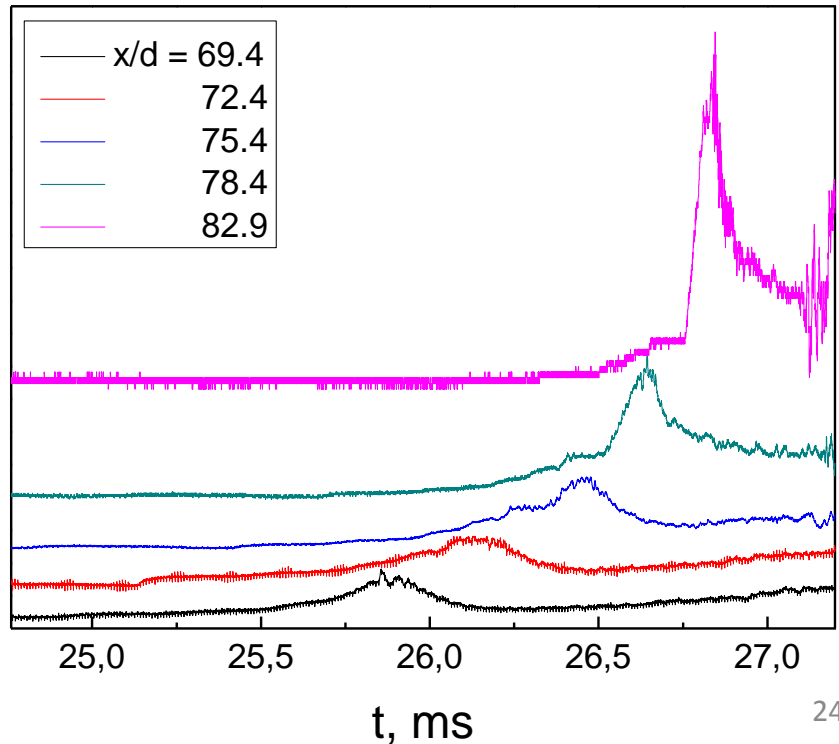
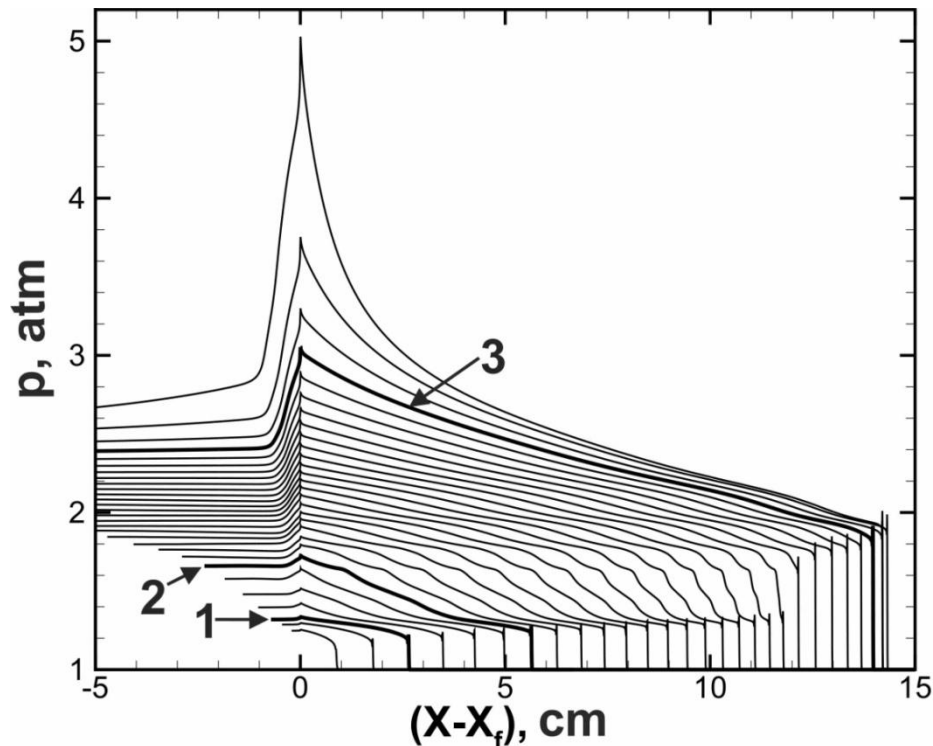


Fig. 7 Wave diagram of unstable solution obtained in the case of supercritical burning speed increment.

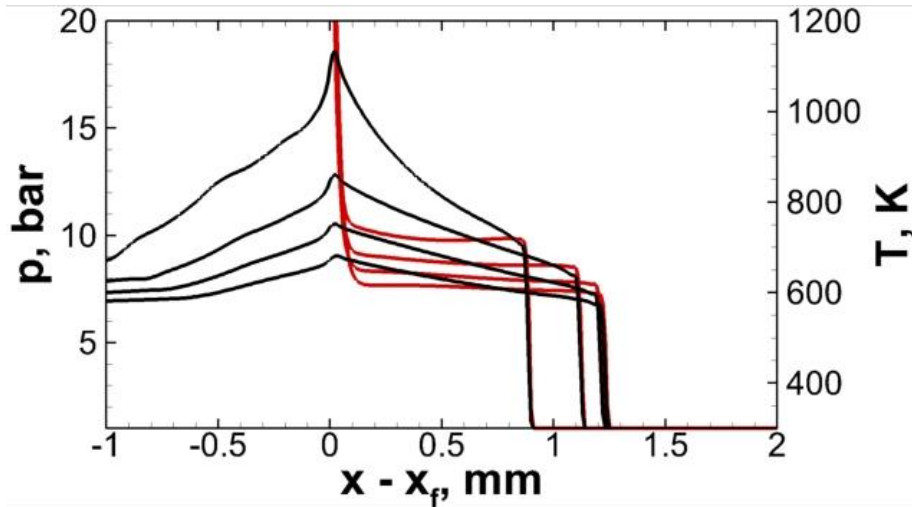


Структура фронта пламени на заключительных стадиях его ускорения

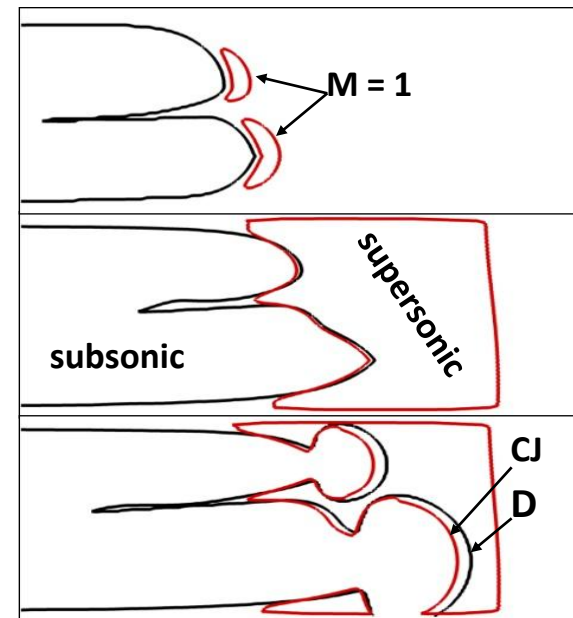
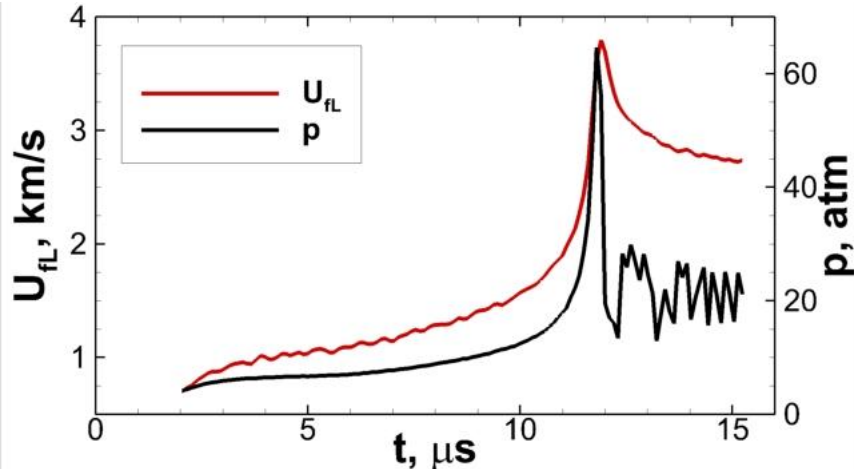
По достижении скоростью фронта пламени локальной скорости звука излучаемые из зоны энерговыделения возмущения запираются сверхзвуковым потоком, что в свою очередь обеспечивает самоподдерживаемое сжатие внутри зоны реакции. В случае положительной зависимости роста скорости горения от давления становится возможным дополнительный рост скорости пламени по смеси и, как следствие, дополнительное сжатие и т.д.



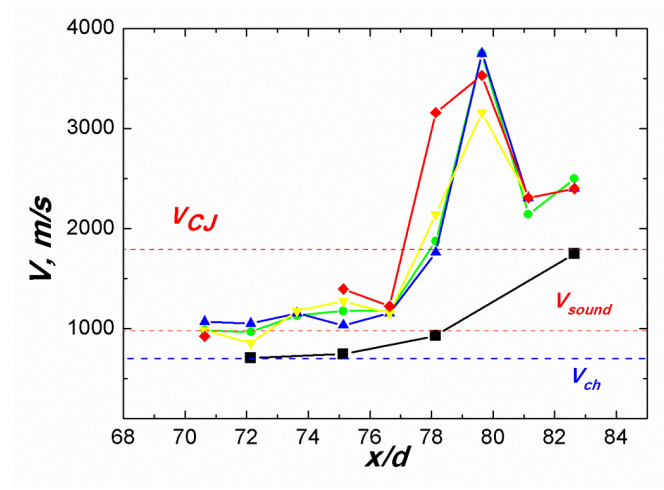
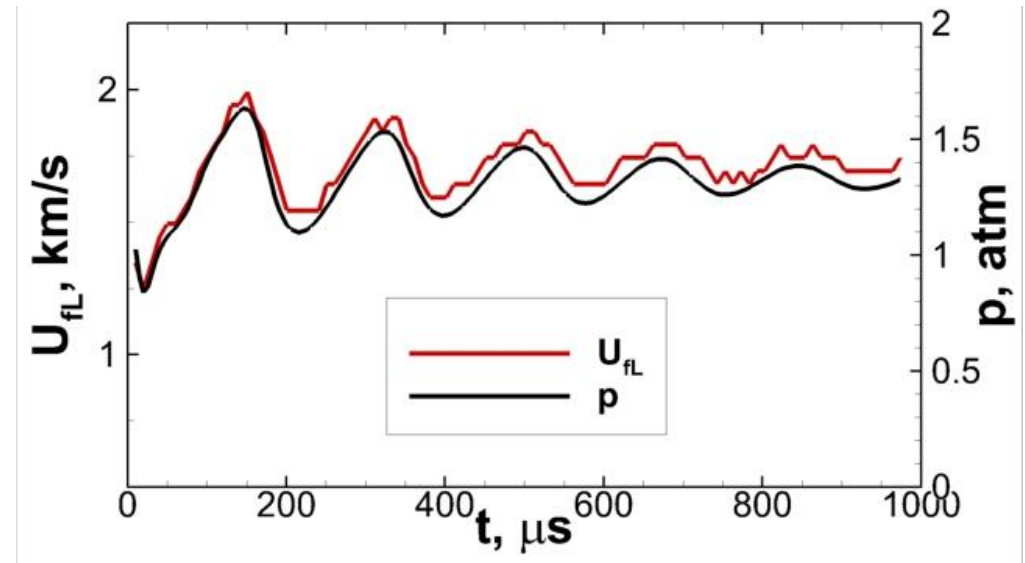
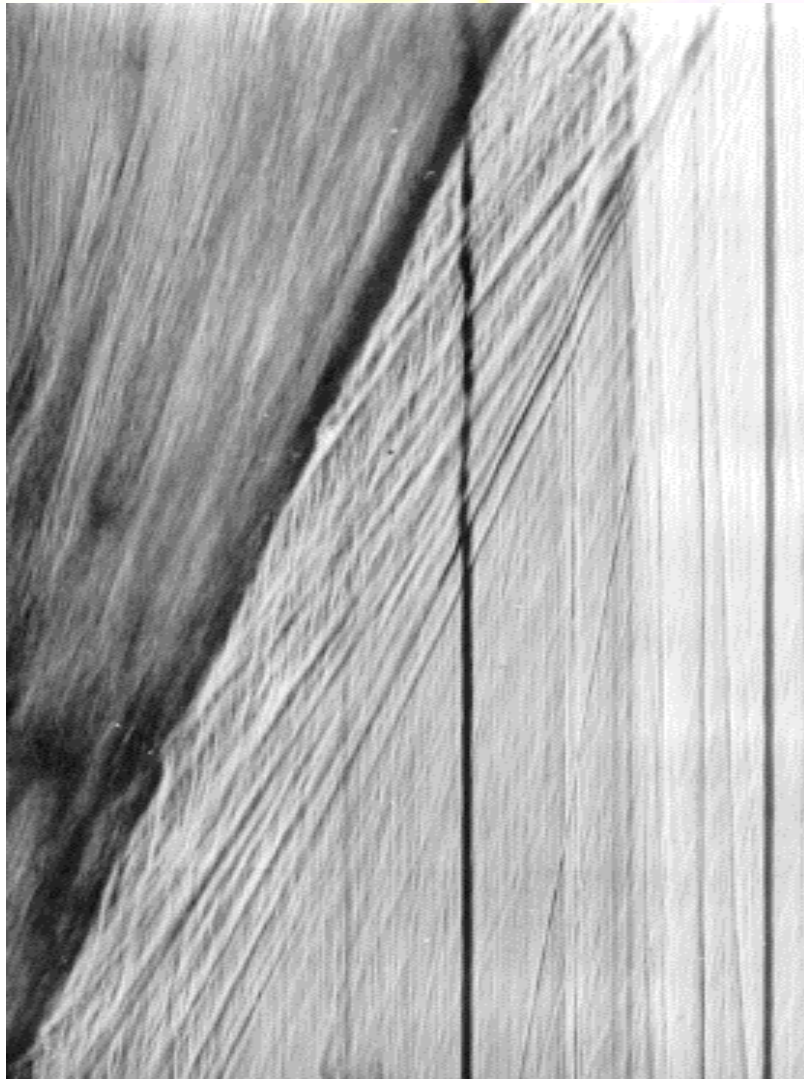
Переход горения в детонацию вследствие нарастания скорости реакции с давлением



Согласованное непрерывное сжатие и ускорение реакции внутри фронта пламени ведет к формированию ударной волны на масштабах фронта. Взаимодействие фронта реакции и ударной волны ведет к формированию детонации. [Иванов М.Ф., Киверин А.Д. Либерман М.А. Фортов В.Е.// ДАН, 2010]



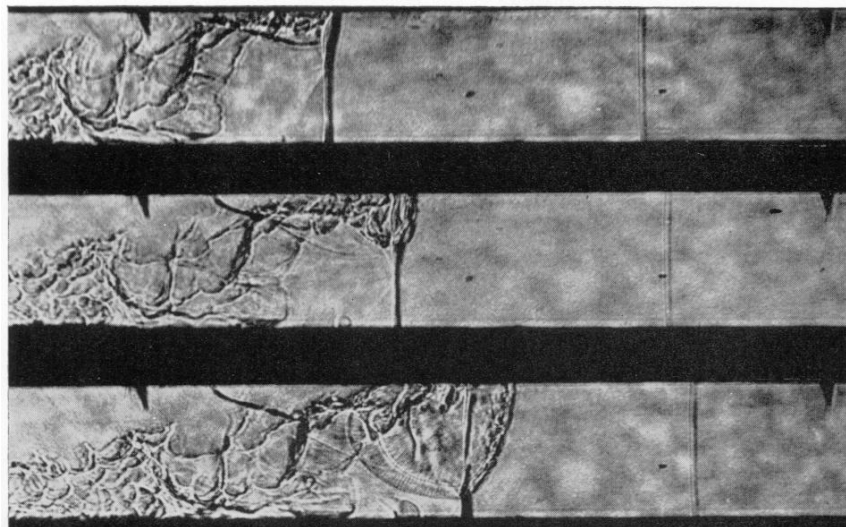
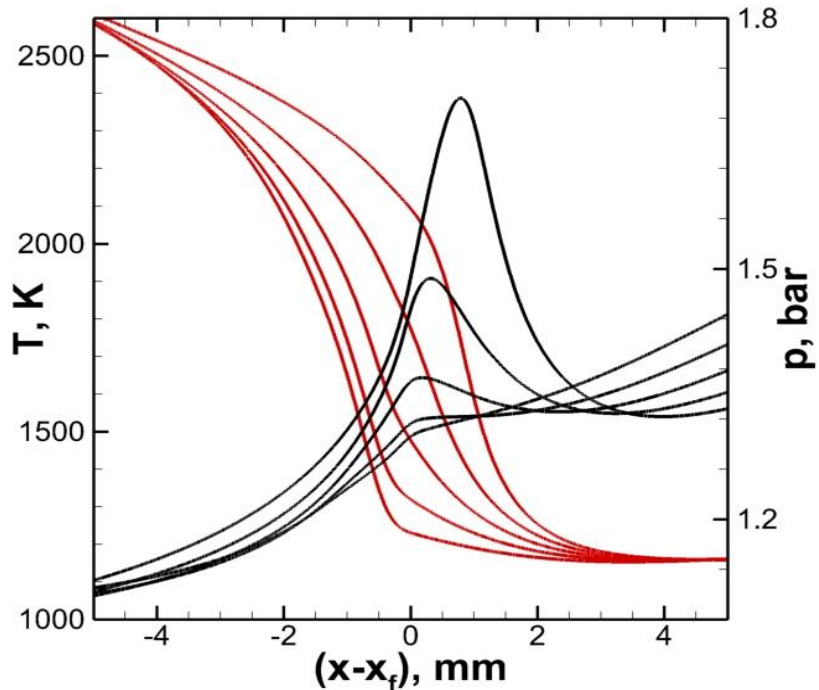
Квазистационарное быстрое пламя



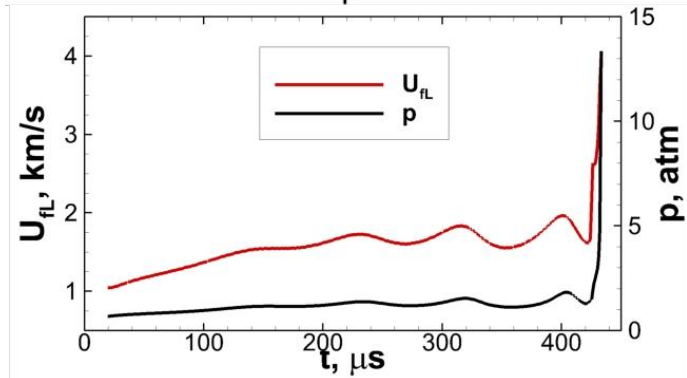
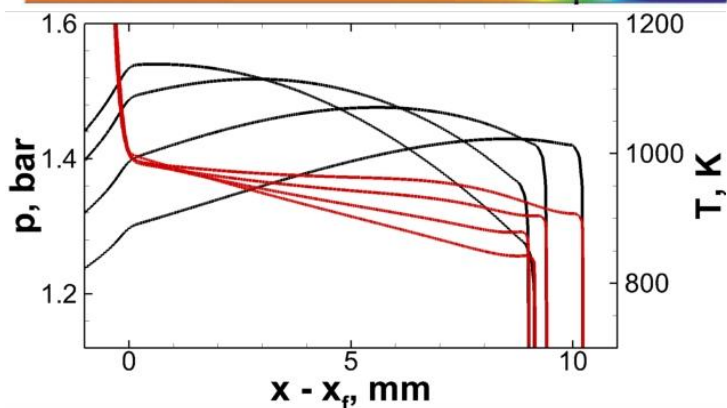
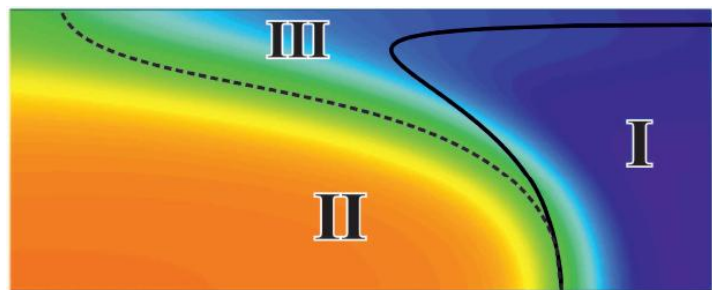
Механизмы формирования детонации

влияние механизма кинетики горения на структуру запертого пламени

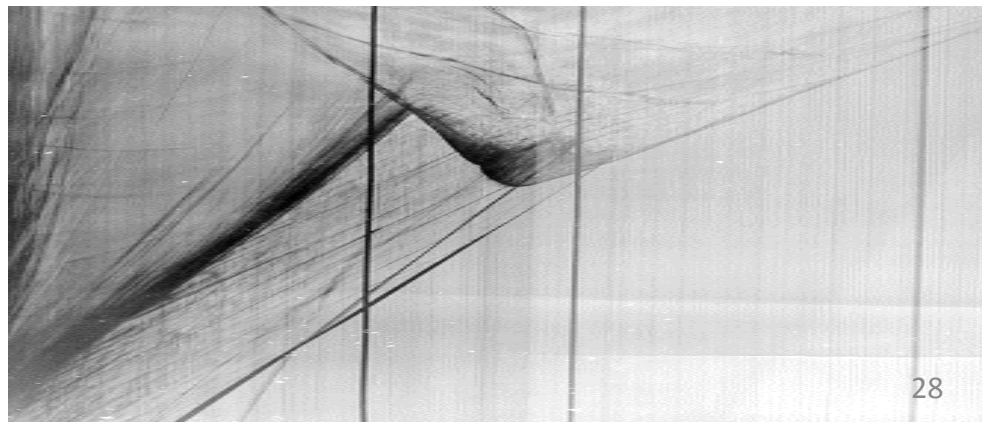
При высоких степенях сжатия (или при длительном непрерывном сжатии) рост температуры смеси может достигать предельного значения, определяющего переход от механизма с доминированием процесса обрыва цепи к механизму с доминированием процесса развития цепи. При этом экзотермические реакции начинают развиваться и оказывать влияние на скорость горения уже в предпламенной зоне. В конечном счете предпламенная область может стать очагом нового фронта горения.



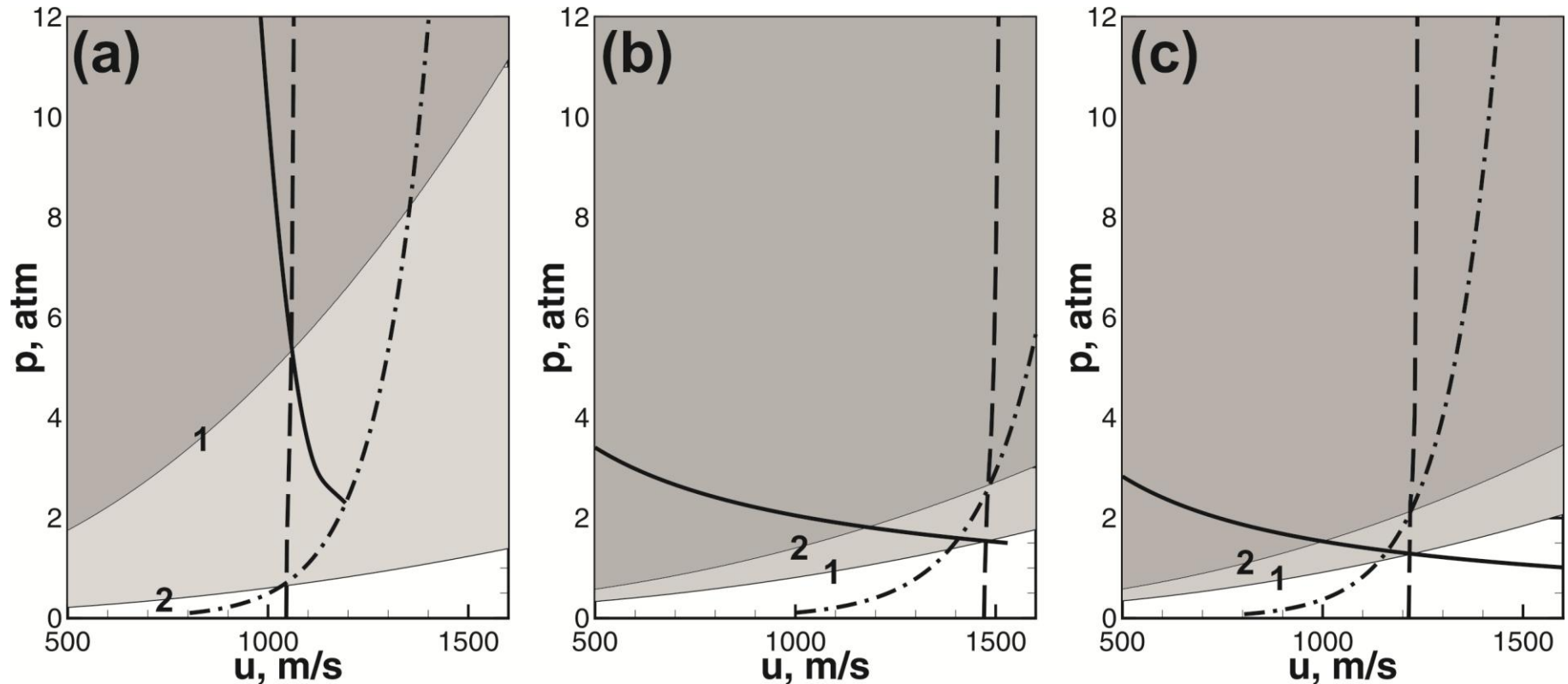
Механизм формирования детонации в «горячих точках»



При реализации квазистационарного режима распространения пламени в запертом режиме на фазе торможения отстававшие от фронта пламени волны сжатия догоняют его, возобновляя его ускорение. Нагретый газ из области III выталкивается вперед, формируя комплекс, состоящий из контактного разрыва и бегущей впереди волны сжатия. Если условия перед фронтом соответствуют области температур выше «crossover»-а, то контактные разрывы могут стать очагами новых фронтов горения.



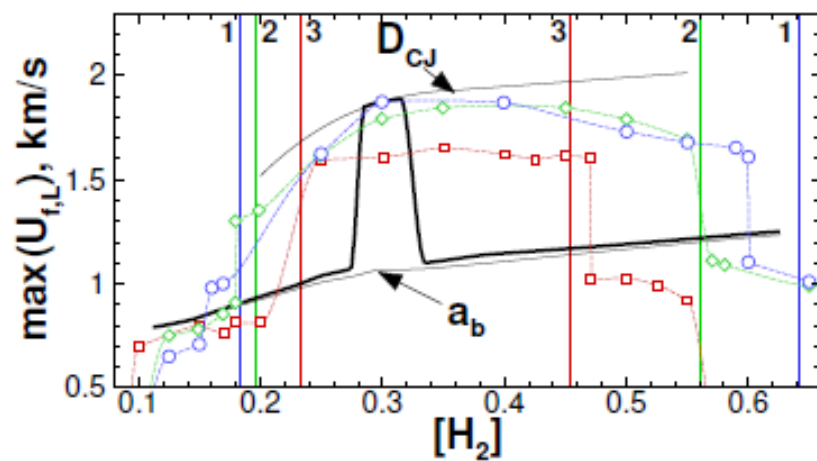
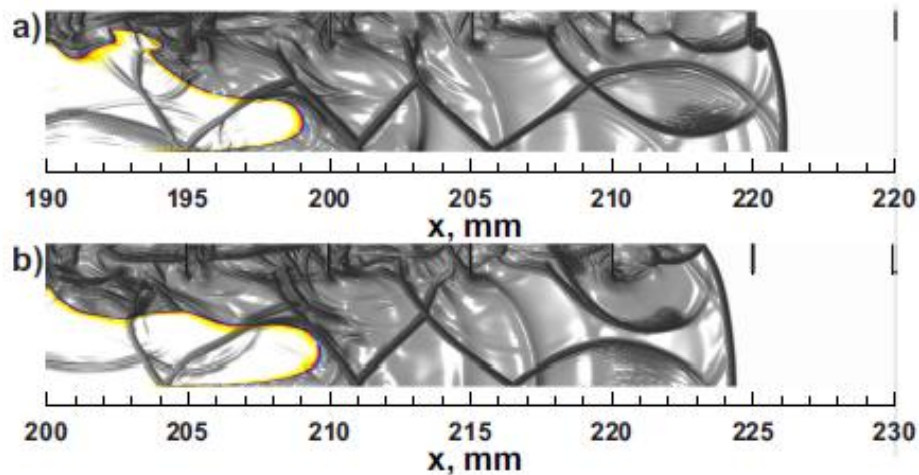
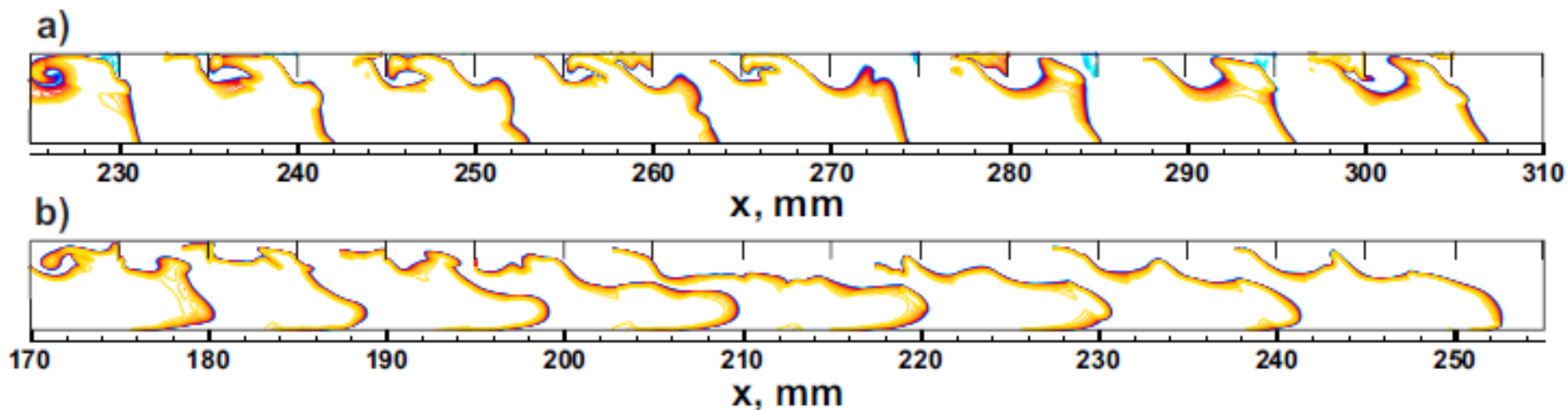
Criteria for realization of different regimes of supersonic combustion in channels



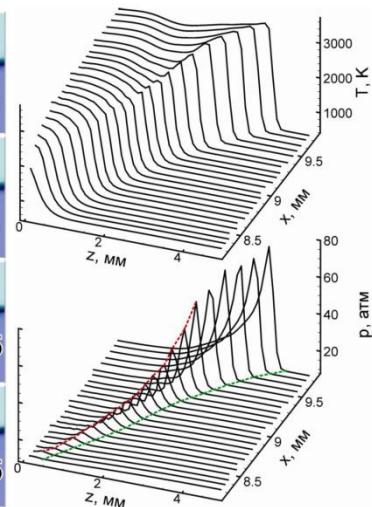
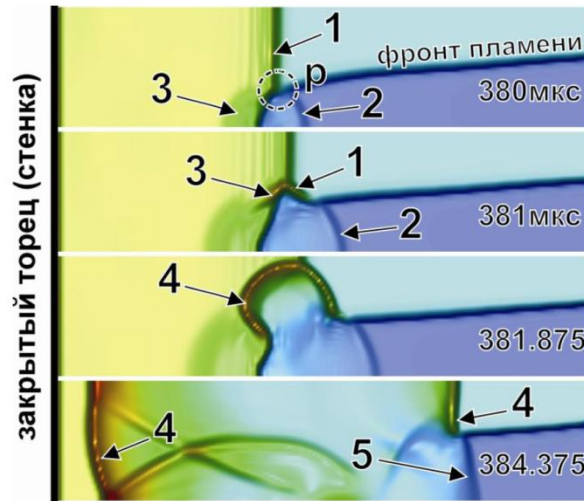
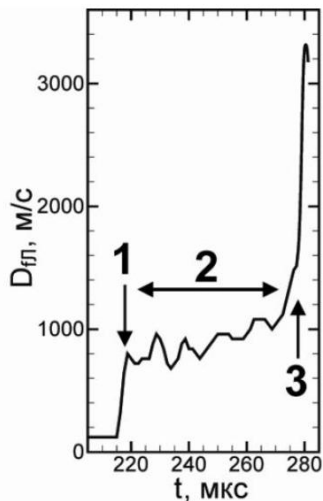
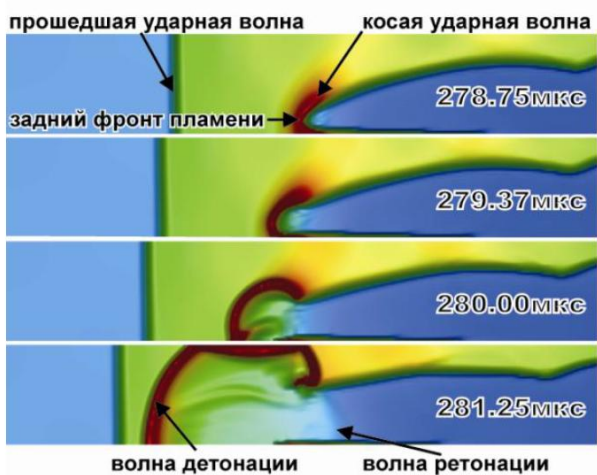
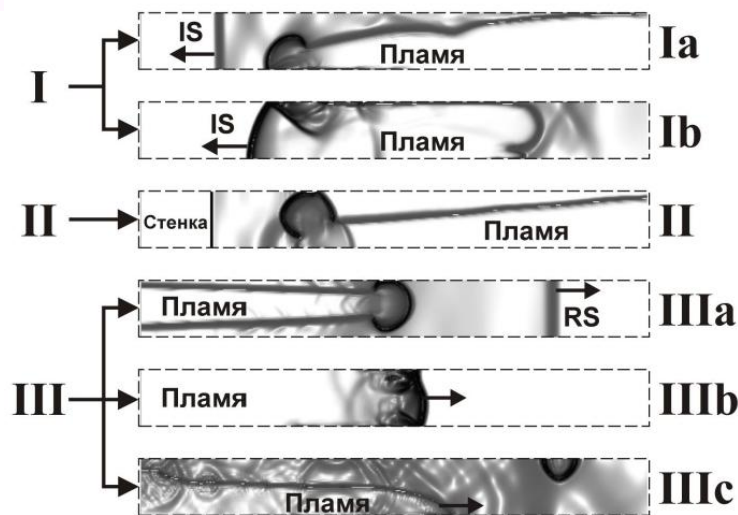
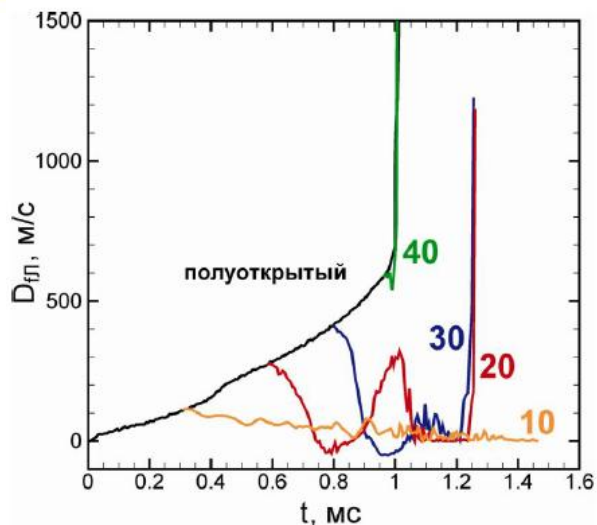
a – $2\text{H}_2+\text{air}$; b – $2\text{H}_2+\text{O}_2$; c – H_2+O_2

dashed – criterion A, solid – criterion B, dash-dotted – «crossover»

Ускорение пламени и переход к детонации в загроможденном канале



Переход в детонацию в ограниченных объемах



Распространение пламени и переход к детонации в дисперсных средах

Несущий реагирующий газовый поток

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right) - \frac{\rho_p}{\rho} \frac{u - u_p}{\tau_{St}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho u}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{xx} u}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho \sum_k h_k \frac{dY_k}{dt} \right) - \frac{\rho_p}{\rho} \left(u_p \frac{u - u_p}{\tau_{St}} + c_{P,p} \frac{T - T_p}{\tau_Q} \right)$$

Дисперсная фаза взвешенных в газе микрочастиц

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial u_p}{\partial x} = \frac{u - u_p}{\tau_{St}}$$

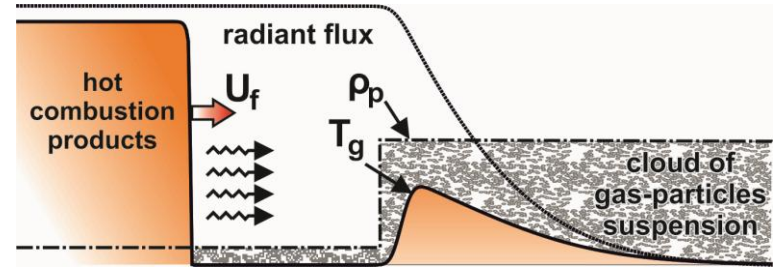
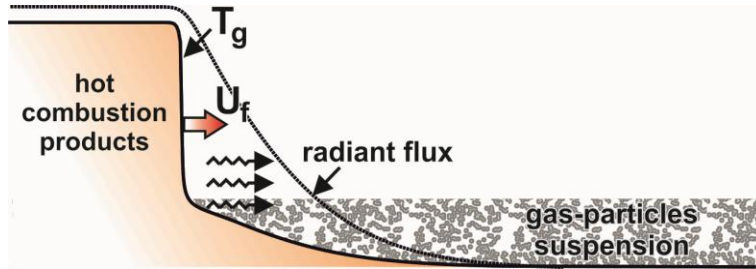
$$\frac{\partial T_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial T_p}{\partial x} = \frac{T - T_p}{\tau_Q} - \frac{\pi d_p^2}{2} \frac{N_p}{c_{P,p} \rho_{p0}} (4\sigma T_p^4 - q_{rad})$$

Перенос излучения

$$\frac{d}{dt} \left(\Lambda \frac{dq_{rad}}{dt} \right) = -\frac{3}{\Lambda} (4\sigma T_p^4 - q_{rad})$$

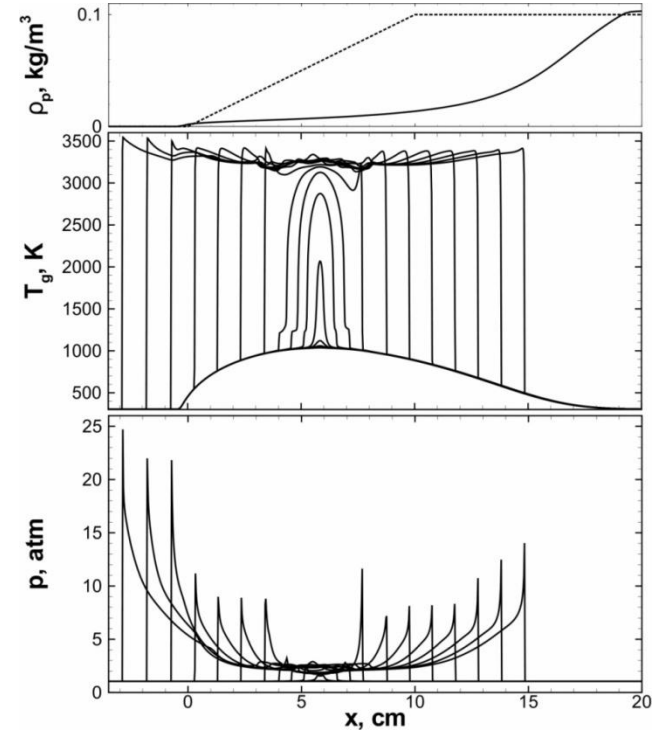
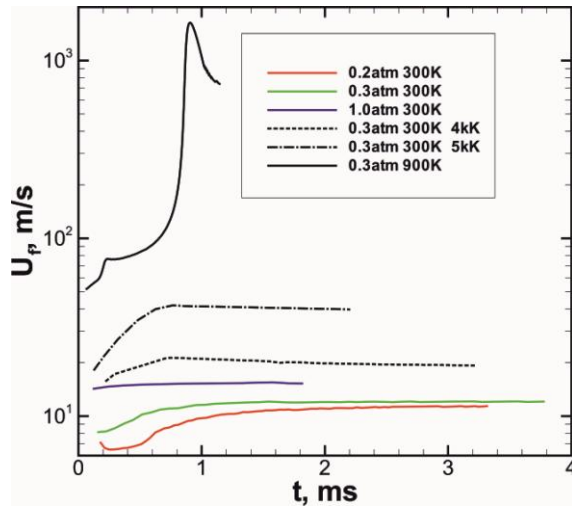
$$\Lambda = 4(\pi d_p^2 N_p)^{-1}$$

Роль лучистого переноса в динамике горения

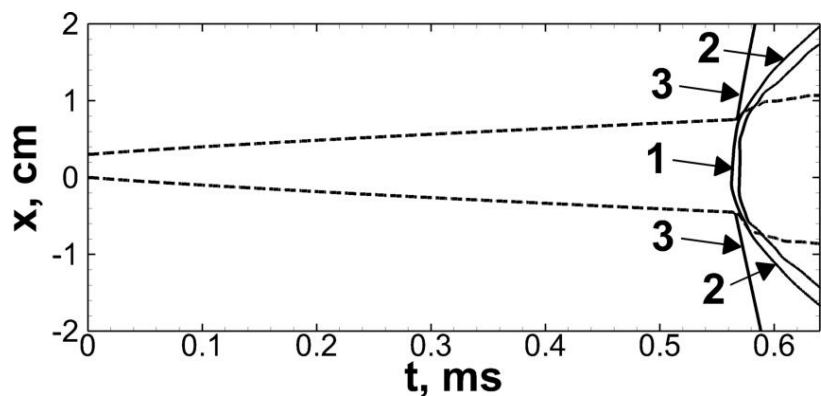
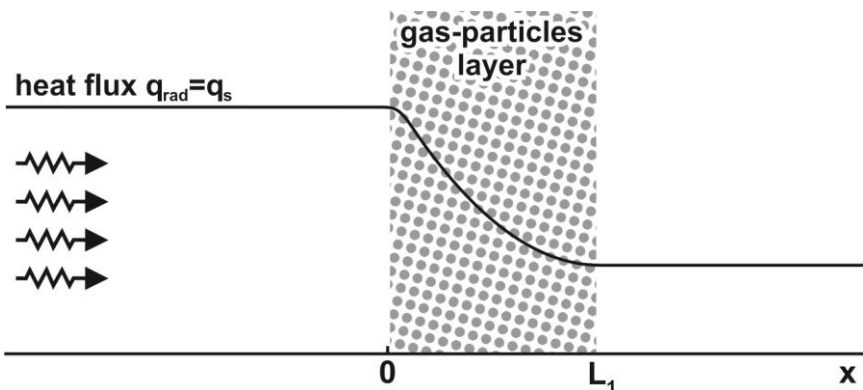


$$U_f = f(T_0 + \Delta T)$$

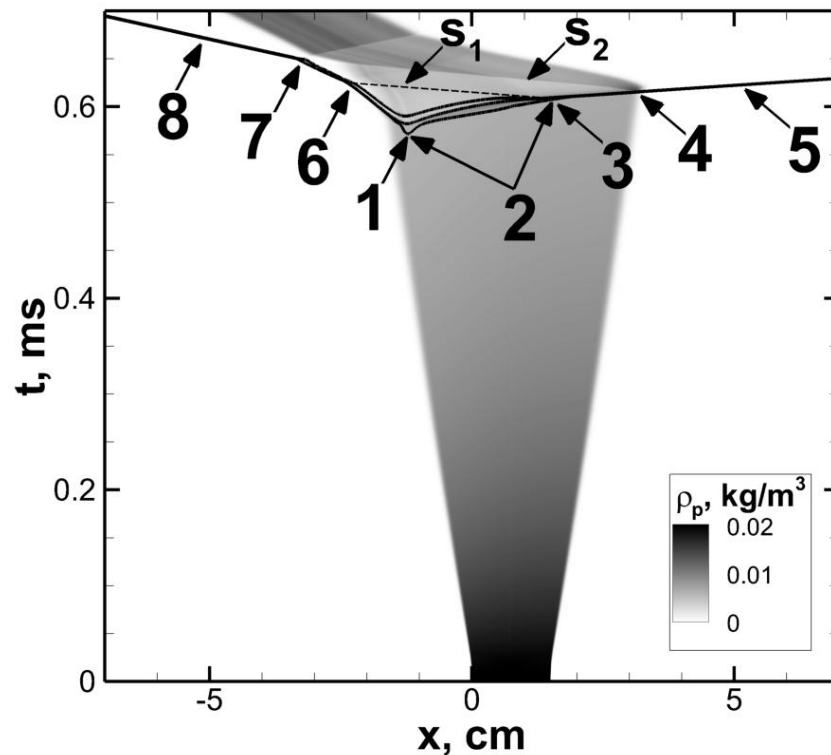
$$\Delta T \approx 0.63 \frac{\sigma T_b^4}{U_f \cdot (\rho_p c_{p,p} + \rho c_{v,g})}$$



Иницирование различных режимов горения путем разогрева слоя частиц от внешнего источника



1 – объемный взрыв внутри нагретого слоя, 2 – фронт горения, 3 – ударная волна

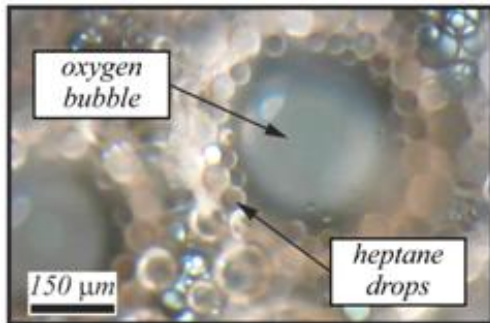
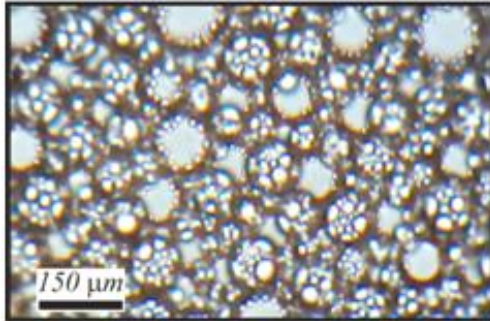


1 – первая точка воспламенения,
 2 – тепловой взрыв,
 3 – формирование детонации,
 4 – выход детонации в холодную смесь
 5 – самоподдерживаемая детонация
 6 и 7 – точки взаимодействия ближнего фронта горения с ударными волнами s_1 и s_2
 8 – волна быстрого горения

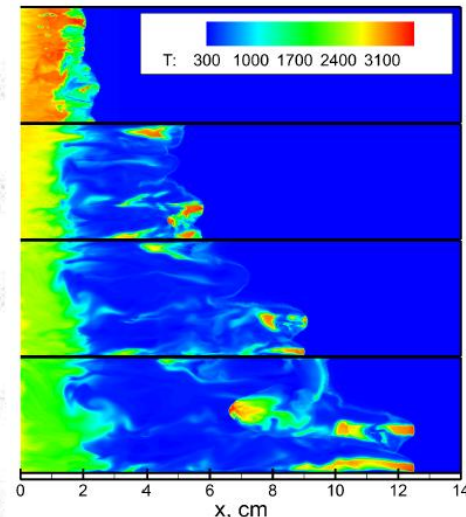
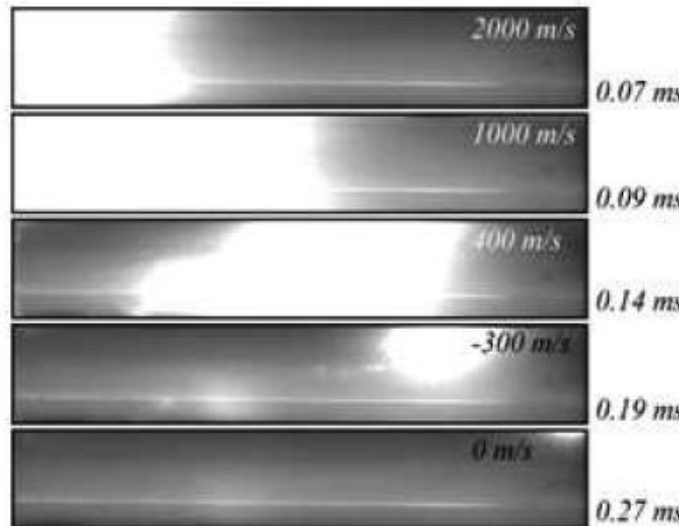
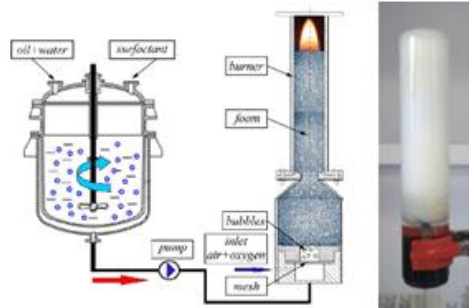
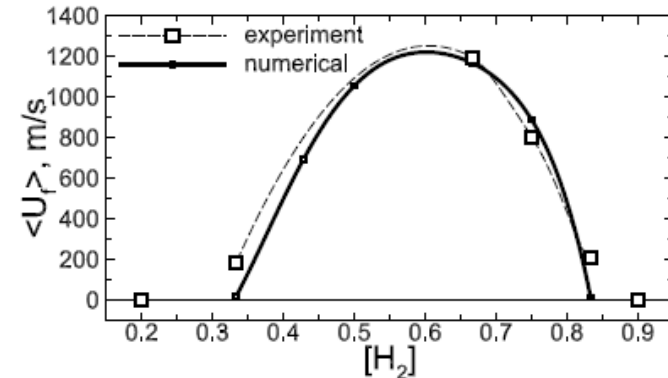
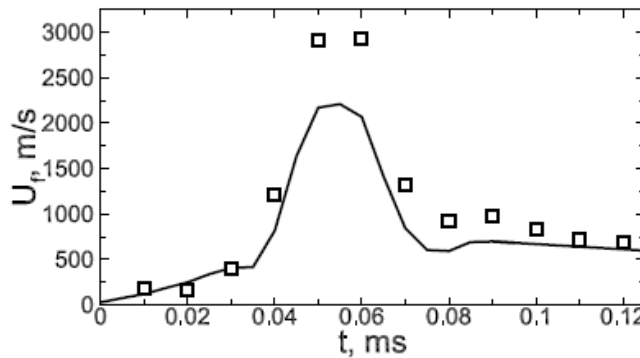
Efremov V.P., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S.//
 Results in Physics 5 (2015) 290

Ефремов В.П., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С.//
 Письма ЖТФ 42(4) (2016) 52

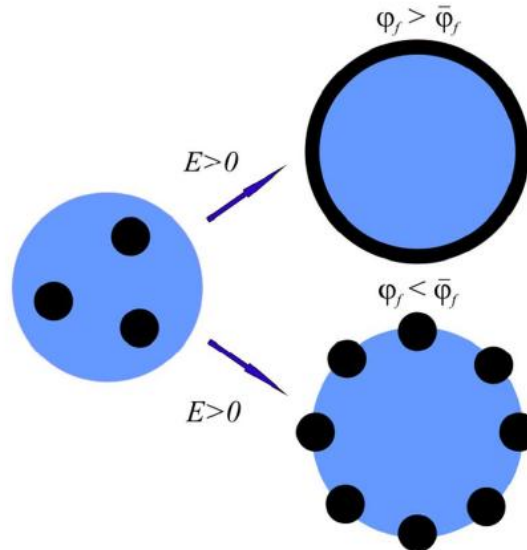
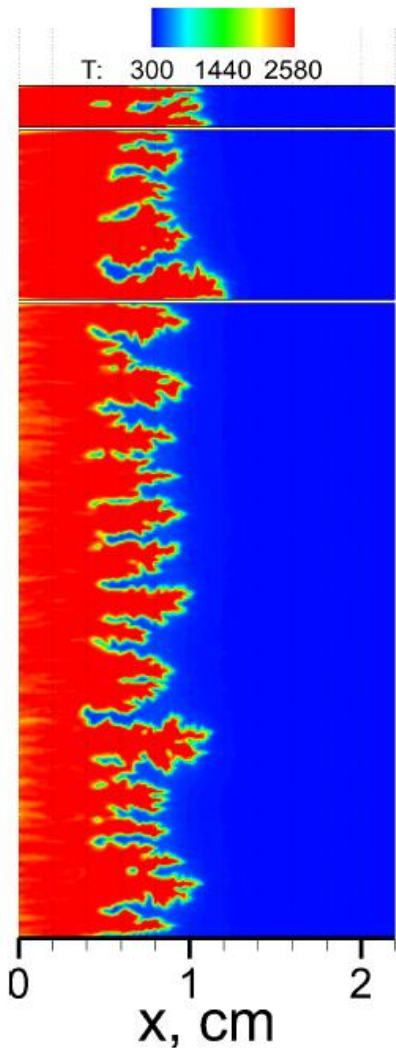
Эмульсия, вспененная горючим газом



Chemically prepared foam: bubbles of 300–400 μm ; oil droplets of ~ 40 μm diameter; foam expansion ratio: 9–10; water mass content up to 95%.

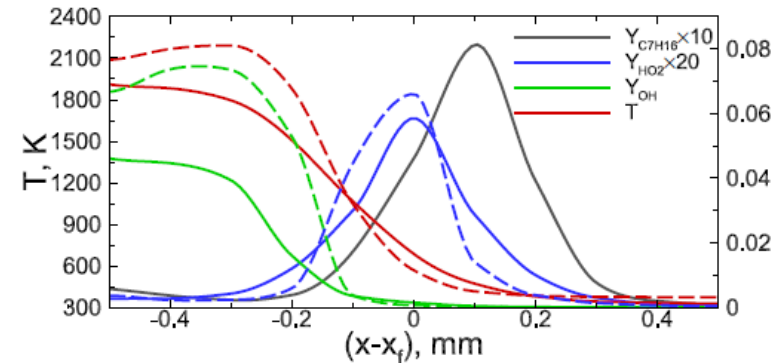
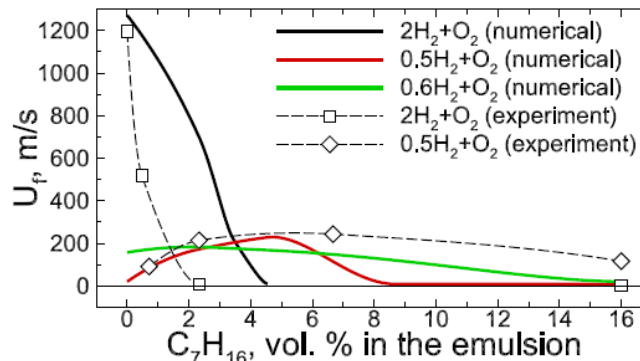


Реактор для изучения процесса ингибирования водородного взрыва



| Substance | Surface tension (m/Nm) |
|---|------------------------|
| Water + detergent | 29.1 |
| <i>Pure hydrocarbon surface tension</i> | |
| n-heptane | 19.5 |
| n-nonane | 22.1 |
| n-dodecane | 25.2 |
| n-tridecane | 25.9 |
| <i>Water + stabilizer/hydrocarbon interfacial tension</i> | |
| Water + detergent/n-heptane | 3.4 |
| Water + detergent/n-nonane | 1.1 |
| Water + detergent/n-dodecane | 1.5 |
| Water + detergent/n-tridecane | 0.2 |

$$E = \sigma_w + \sigma_{w/o} - \sigma_o > 0$$



Всего публикаций ↻

62 Анализировать

1999 2018

h-Index 1

14

Среднее число цитирований документа

8,26

Суммарное количество цитирований 1

512

без самоцитирования

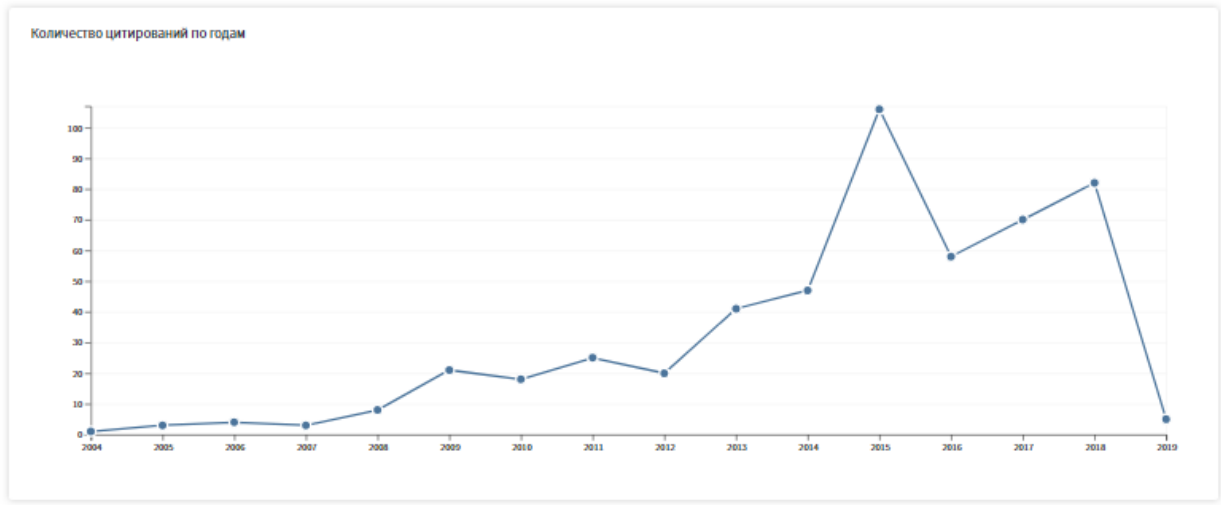
343

Цитирующие статьи 1

291 Анализировать

без самоцитирования

244 Анализировать



Сортировать по: Количество цитирований публ. Больше ▾ ← 1 из 7 →

Выберите документы, которые необходимо удалить из отчета по цитированию

или добавьте ограничение на диапазон дат публикации документов 2003 ▾ и 2019 ▾ Выполнить

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | Всего | Среднее количество цитирований в год |
|---|------|------|------|------|------|-------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | 106 | 58 | 70 | 82 | 5 | 512 | 34.13 |
| <input type="checkbox"/> 1. Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures Автор: Liberman, M. A.; Ivanov, M. F.; Kiverin, A. D.; с соавторами. ACTA ASTRONAUTICA Том: 67 Выпуск: 7-8 Стр.: 688-701 Опубликовано: OCT-NOV 2010 | 14 | 7 | 10 | 9 | 0 | 59 | 6.56 |
| <input type="checkbox"/> 2. Mechanisms of high-pressure hydrogen gas self-ignition in tubes Автор: Golub, V. V.; Baklanov, D. I.; Golovastov, S. V.; с соавторами. Конференция: 1st European Summer School on Hydrogen Safety (ESSHS) Местооположение: Univ Ulster, Belfast, NORTH IRELAND публ.: AUG 15-24, 2006 JOURNAL OF LOSS PREVENTION IN THE PROCESS INDUSTRIES Том: 21 Выпуск: 2 Стр.: 185-198 Опубликовано: MAR 2008 | 4 | 6 | 5 | 2 | 1 | 40 | 3.64 |
| <input type="checkbox"/> 3. Hydrogen-oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls Автор: Ivanov, M. F.; Kiverin, A. D.; Yakovenko, I. S.; с соавторами. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY Том: 38 Выпуск: 36 Стр.: 16427-16440 Опубликовано: DEC 13 2013 | 9 | 7 | 7 | 9 | 0 | 35 | 5.83 |

A large, textured orange sphere, resembling a grapefruit or orange, is centered on a white background. The sphere has a detailed, bumpy texture. Overlaid on the center of the sphere is the text "СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!" in a bold, black, sans-serif font with a white outline. The text is arranged in two lines: "СПАСИБО" on the top line and "ЗА ВНИМАНИЕ!" on the bottom line.

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**