



**Московский Государственный
Университет им. М. В. Ломоносова
«Суперкомпьютерные технологии в
науке, образовании и промышленности»
17:15-18:00, 1 октября, 2019
СКЦ МГУ, Москва**

**Детальное численное моделирование
нестационарных процессов горения газовых смесей и
газовзвесей с использованием суперкомпьютеров**

Яковенко И.С., Киверин А.Д.



**Объединенный И нститут В ысоких
Т емператур
Российской Академии Наук**

Лаборатория Математического Моделирования

Содержание

➤ **Введение.**

Область исследований и конкретные задачи

➤ **Вычислительные технологии и алгоритмы.**

Используемые численные алгоритмы и технологии высокопроизводительных вычислений. Особенности численного анализа и тестирования вычислительных кодов.

➤ **Дефлаграционное и диффузионное горение.**

Механизмы распространения. Теория и эксперимент.

➤ **Нестационарные режимы распространения пламени.**

Ускорение пламени и переход к детонации как яркие примеры нестационарных задач горения.

➤ **Газодинамика воспламенения в рамках эксперимента в ударных трубах**

Особенности структуры течения за падающей ударной волной в канале.

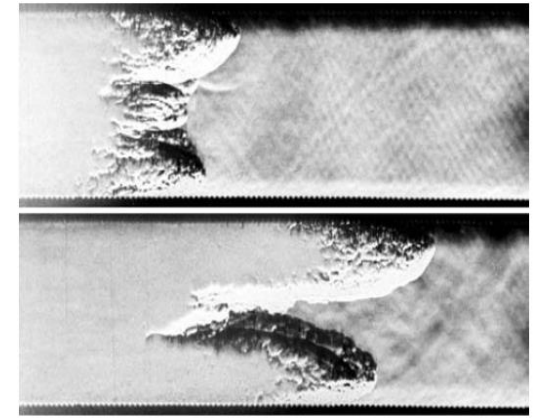
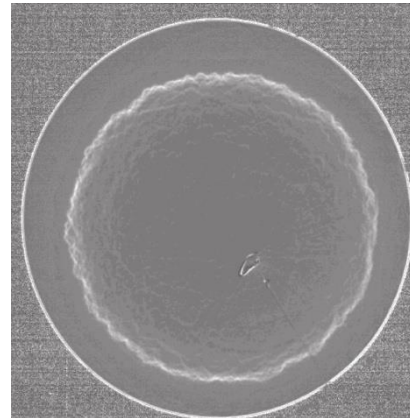
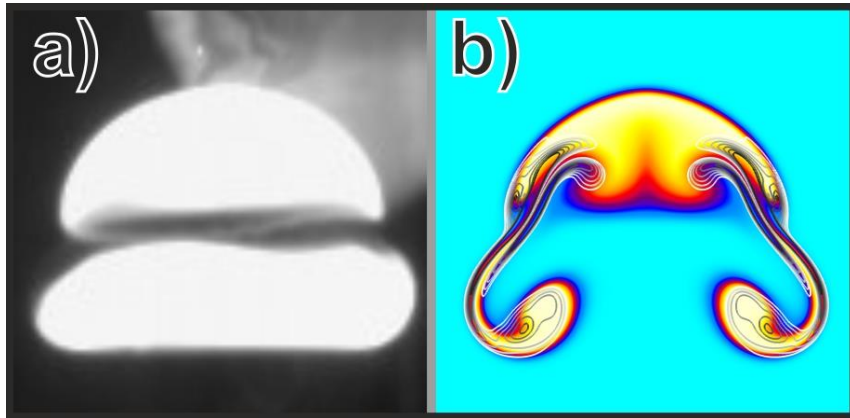
➤ **Влияние дисперсной фазы на процессы воспламенения и развития горения**

Инициирование детонации и интенсификация горения.

Особенности моделирования горения

- Горение – сложный процесс характеризующийся большим количеством пространственно-временных масштабов.
 - Пространственные масштабы: начиная от ширины фронта горения (доли миллиметра), заканчивая размерами реактора (до нескольких метров). Временные масштабы: начиная от времени индукции смеси (десятки микросекунд) заканчивая полным временем сгорания смеси (минуты и выше).
- Детальное моделирование распространения пламени требует использования полных механизмов химической кинетики. В результате в каждой расчетной ячейке необходимо решать систему обыкновенных дифференциальных уравнений моделирующую химические превращения. Данная система уравнений зачастую является жесткой.
- Наиболее интересными с точки зрения фундаментальных и прикладных задач являются нестационарные режимы горения, в ходе развития которых характеристики течения и термодинамические параметры могут меняться в широком диапазоне.

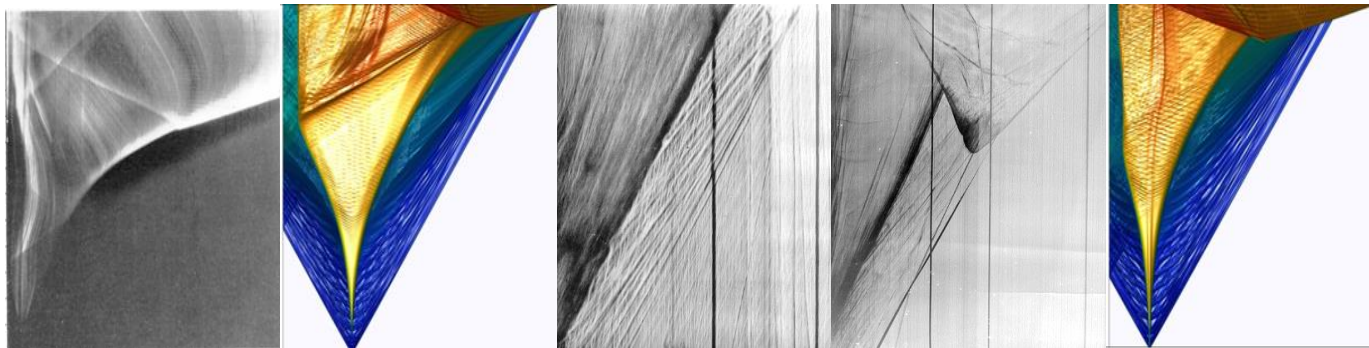
Введение



**Диффузионное горение,
околопредельные пламена**

Эксперимент и расчет (6% H_2 -Воздух), 2018.

Дефлаграционное горение



**Нестационарные и высокоскоростные режимы
распространения пламени**

Математические модели

Многокомпонентная реагирующая газовая смесь с учетом

- Вязкости,
- Многокомпонентной диффузии,
- Теплопереноса
- Химических превращений

Быстрое горение

Медленные, околпредельные пламена

Полная система уравнений Навье-Стокса для реагирующих потоков

Приближение малых чисел Маха



Химия

Детальные схемы химической кинетики или редуцированные схемы.

Термодинамика

Уравнения состояния с учетом температурных зависимостей теплоемкостей, коэффициентов переноса и энтальпий образования

Конденсированная фаза

В случае если присутствуют добавки (твердые частицы, жидкие капли) модель дополняется уравнениями динамики дисперсной фазы в континуальном или Лагранжевом приближении.

Численные алгоритмы

1. Классический Эйлерово-Лагранжев метод (ЭЛМ) (FLIC или метод “крупных” частиц) [Belotserkovsky, 1982].

Плюсы:

- + Устойчив и надежен. Позволяет прямое моделирование сложных газодинамических течений с интенсивными ударными волнами.
- + Вычислительно эффективен. Имеет небольшой вычислительный шаблон.
- + Легко реализовать даже в случае сложных нестационарных реагирующих течений с табличными уравнениями состояния.

Минусы: - Высокая схемная вязкость.

Хорошо для качественных исследований.
Однако некоторые особенности течений сглаживаются благодаря схемной вязкости

Альтернативы ?

Методы высокого порядка (WENO, ENO, TVD)

Спектральные методы

Бездиссипативные методы невысокого порядка

Численные алгоритмы

2. Схема «КАБАРЕ»(CABARET) [Karabasov and Goloviznin, 2009].

- Плюсы:**
- + Процедура решения построена таким образом чтобы полностью исключить схемную вязкость
 - + Наименьший вычислительный шаблон
 - + Монотонность достигается естественными процедурами коррекции

- Минусы:**
- Не так широко распространен
 - Требуется дополнительных исследований, в особенности для решения моделирования многокомпонентных течений

3. Уравнения в приближении малых чисел Маха решаются с помощью явного метода типа предиктор-корректор [McGrattan, 2004].

Вычислительные технологии

GitHub*



Программы - решатели

Газодинамический решатель по методу «**крупных частиц**»

Газодинамический решатель по методу «**КАБАРЕ**»

Теплопроводность

Вязкость

Диффузия

Химическая кинетика

Уравнения состояния

Интерпретатор теплофизических и химических данных в формате **CHEMKIN**

Теплофизические свойства

Свойства механизма химической кинетики

Постпроцессинг в реальном времени

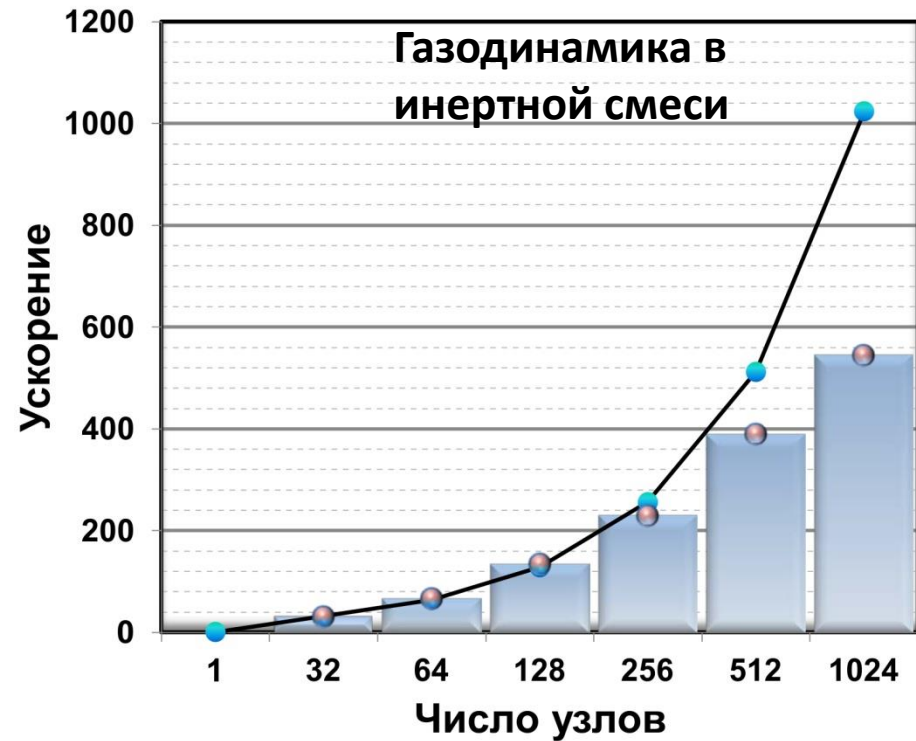
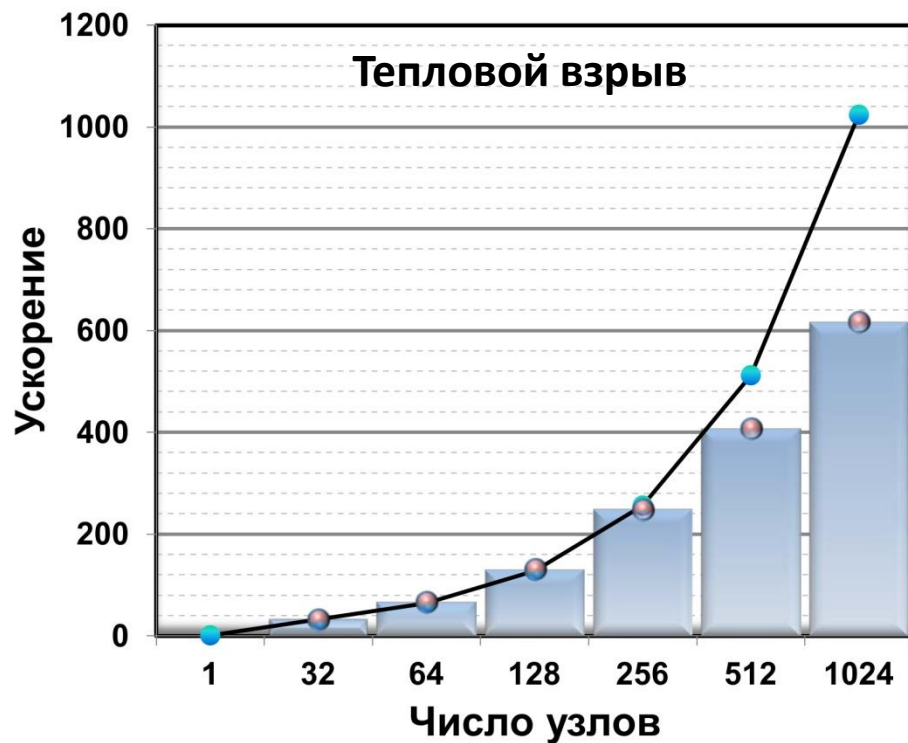
Вывод данных для обработки в сторонних графических пакетах



* Программный комплекс NRG: <https://github.com/yakovenko-ivan/NRG>

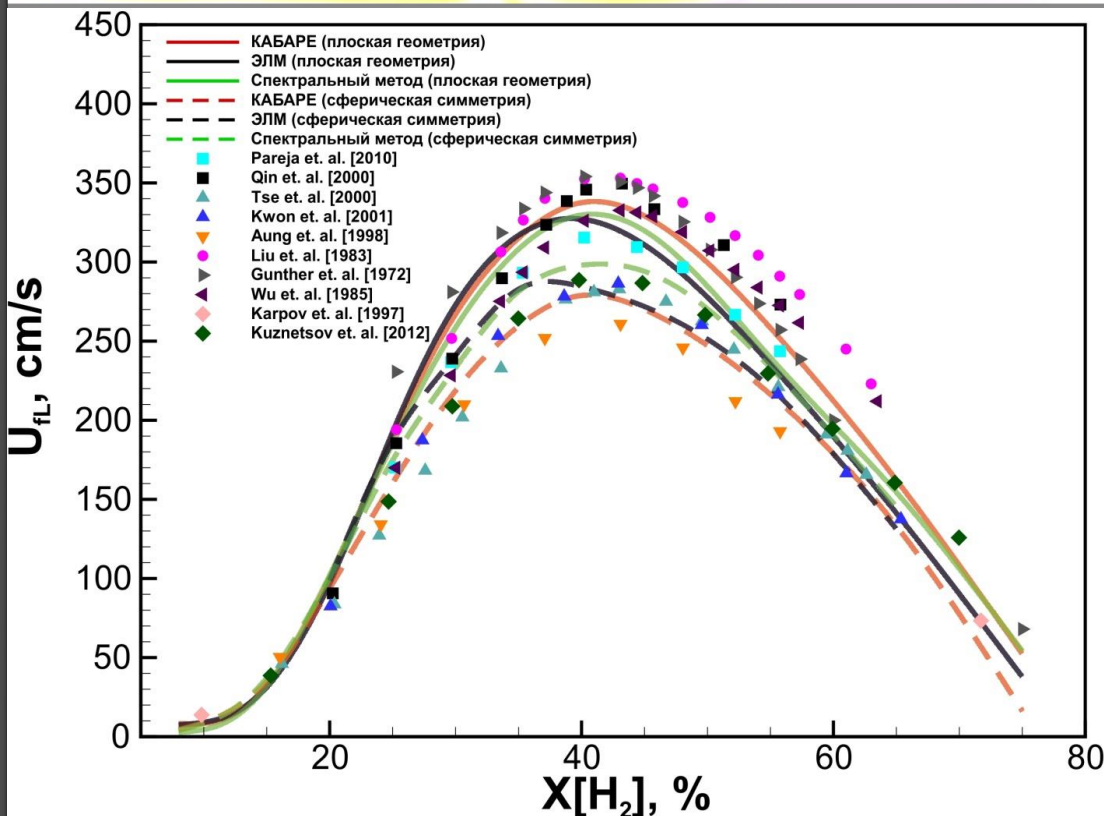


Вычислительные технологии



Характерной особенностью моделирования процессов горения является сильная неоднородность вычислительной нагрузки. Наиболее трудоемкие процедуры решения уравнений химической кинетики выполняются только подобластях с зонами реакции. Два теста – тепловой взрыв и газодинамика инертной смеси представляют собой экстремальные случаи полного отсутствия химических превращений и протекания реакции во всем объеме.

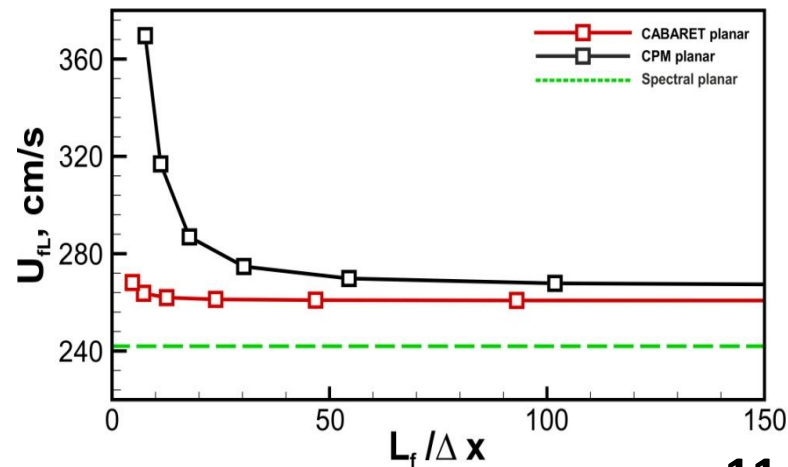
Верификация и валидация вычислительных методик



[Bykov, Kiverin, Koksharov, Yakovenko // *Comp. fluids*, 2019, in print]

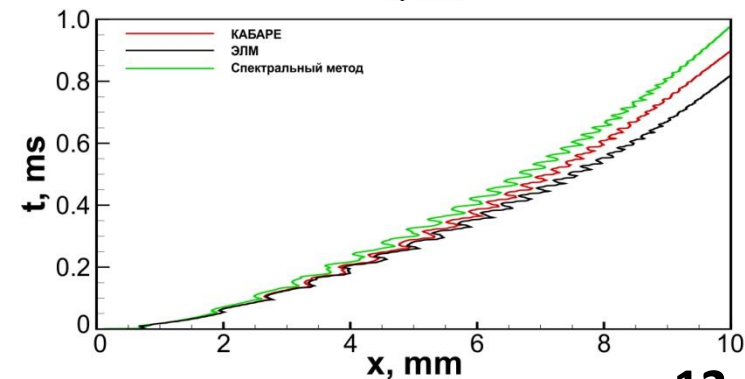
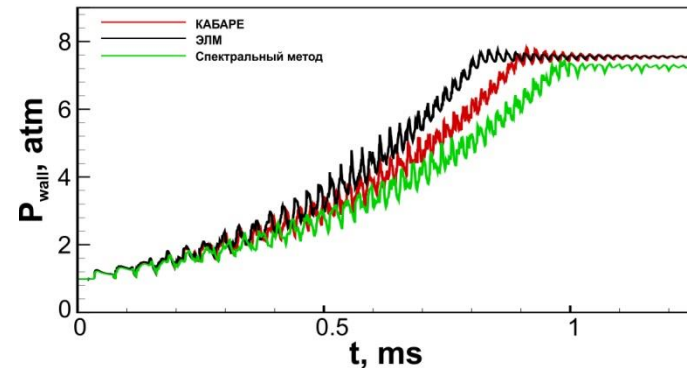
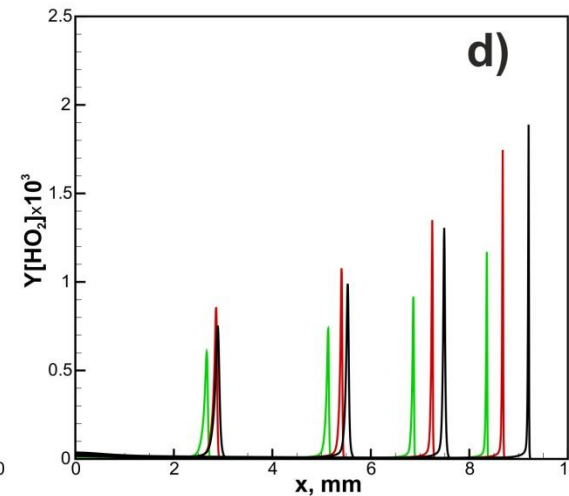
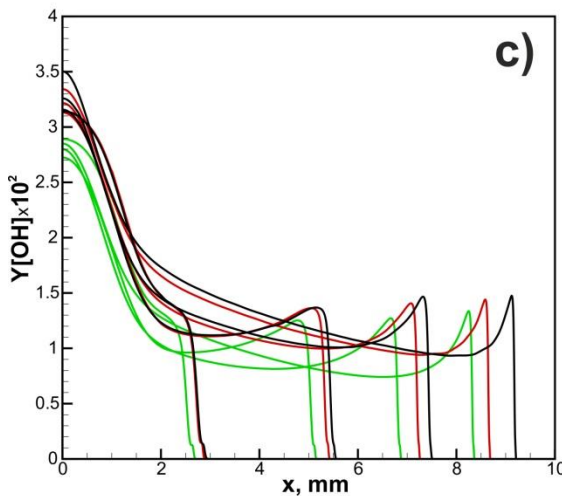
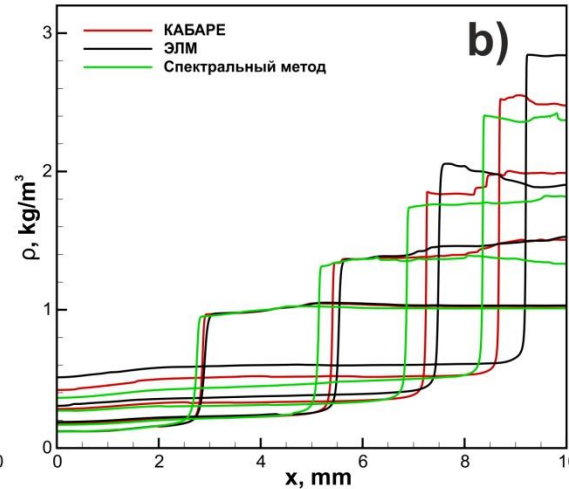
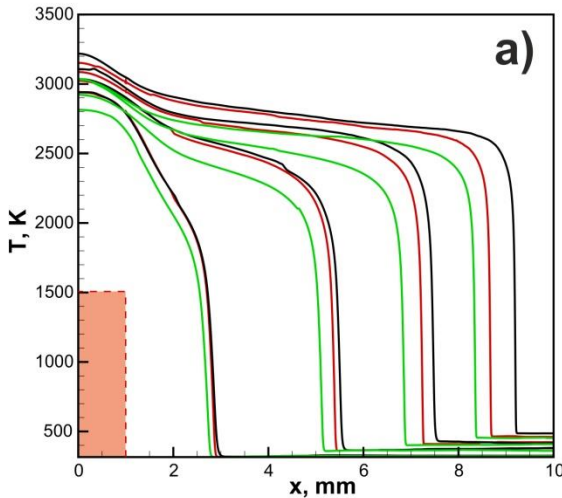
Ламинарная скорость горения и ширина фронта пламени определяют основные пространственно-временные масштабы процесса. Целесообразно оценивать область сходимости численного алгоритма относительно этих величин.

Ламинарная скорость является одним из наиболее важных параметров горения газообразных газовых смесей. Ламинарная скорость горения меняется в широком диапазоне при изменении состава горючей смеси, а также зависит от условий протекания процесса и представляет собой удобную величину для апробации вычислительных методик.



Верификация и валидация вычислительных методик

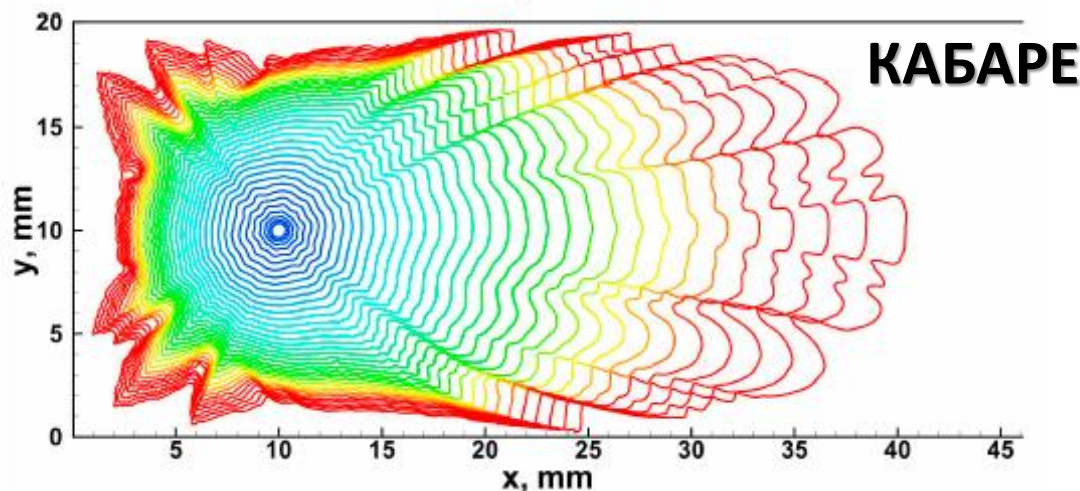
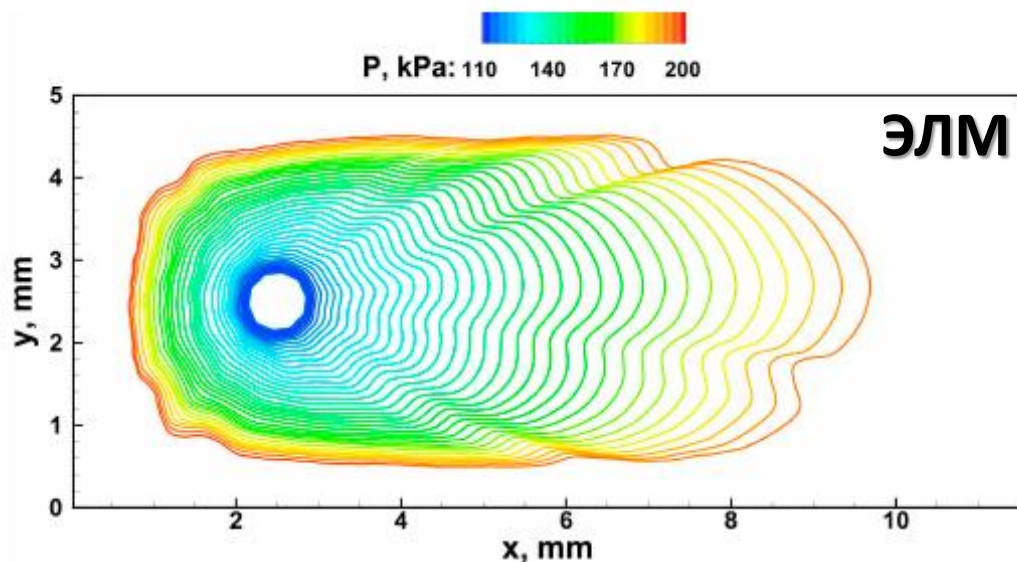
Горение в закрытых резервуарах характеризуется непрерывным ростом давления и взаимодействием между фронтом горения и волнами сжатия



[Bykov, Kiverin, Koksharov, Yakovenko // *Comp. fluids*, 2019, in print]

Дефлаграционное горение в замкнутом объеме заполненном горючей смесью

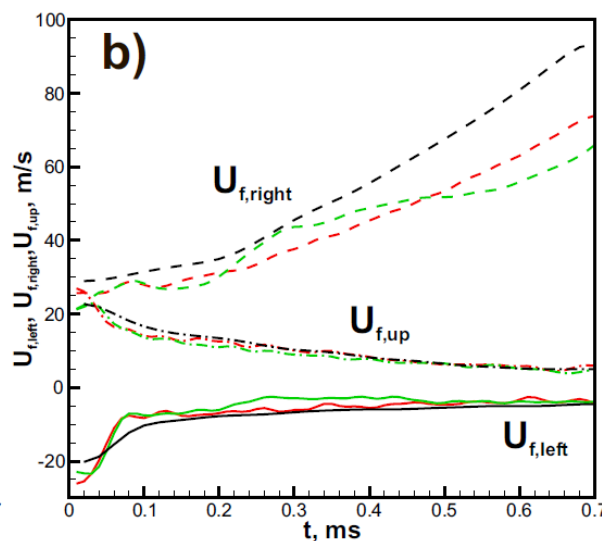
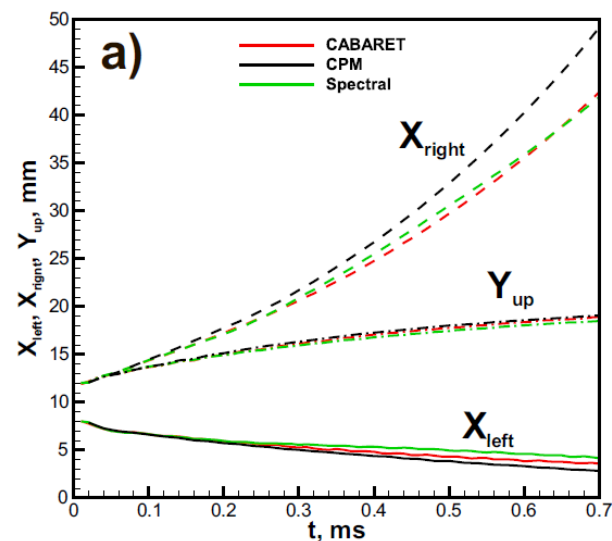
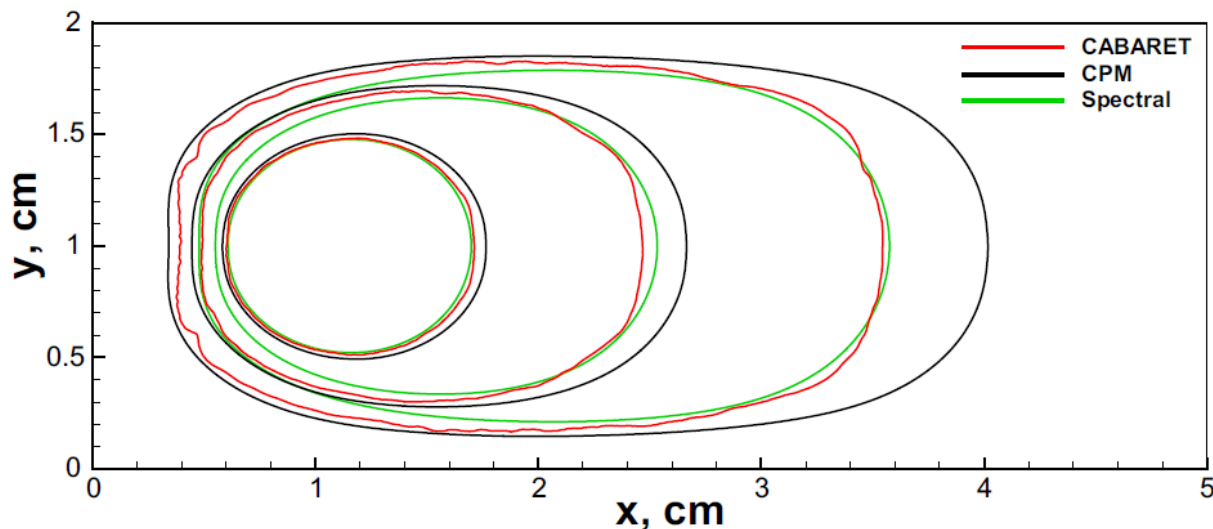
Стехиометрическая смесь H_2-O_2



Бездиссипативные методики, такие как КАБАРЕ позволяют воспроизвести спектр акустических возмущений генерируемых фронтом горения в замкнутых объемах, без их искусственного сглаживания.

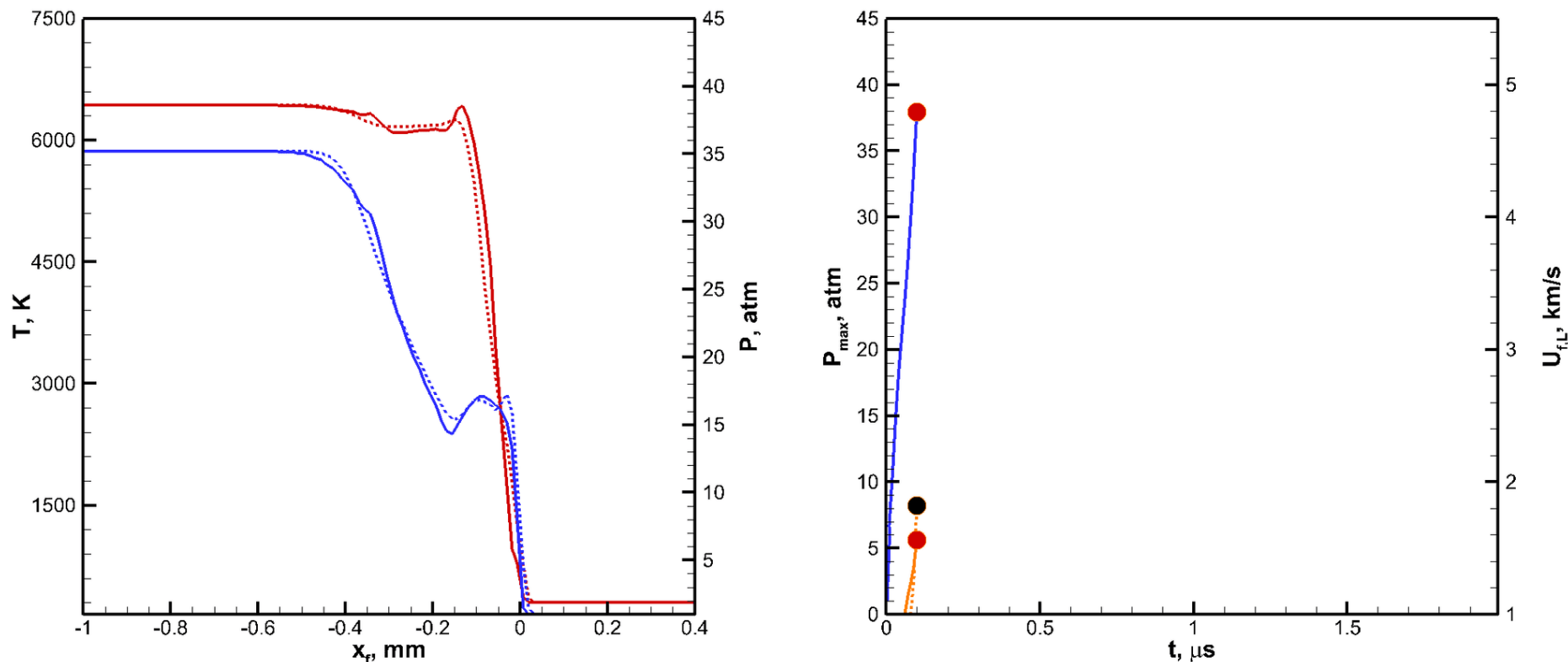
Дефлаграционное горение в замкнутом объеме заполненном горючей смесью

Стехиометрическая смесь H_2 -Воздух



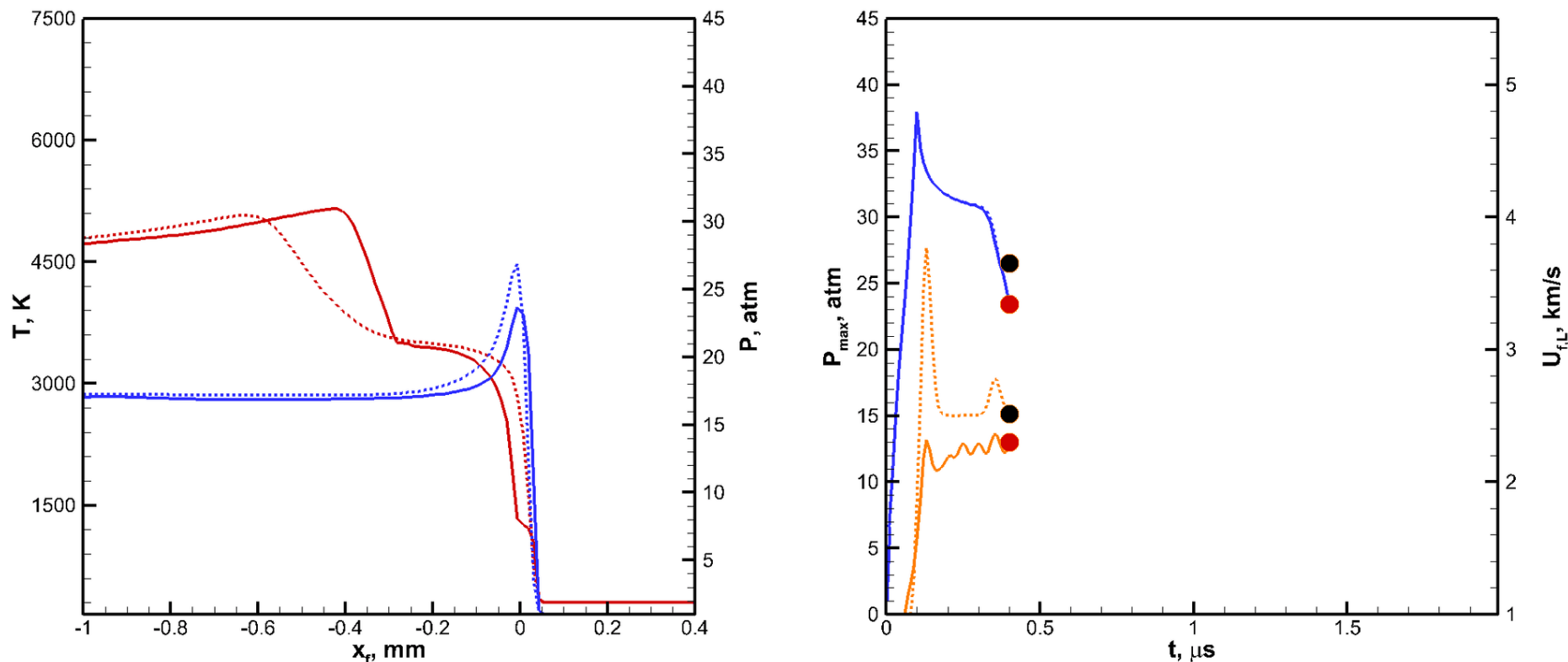
Современные спектральные методы, такие как к примеру APSEM [Koksharov et. al. // ИСК 2018, Выков, et. al. // Comp. fluids, 2019] также представляют большой интерес ввиду того, что точность воспроизведения различных особенностей течения может быть подобрана адаптивно.

Инициирование детонации нестационарным источником энергии



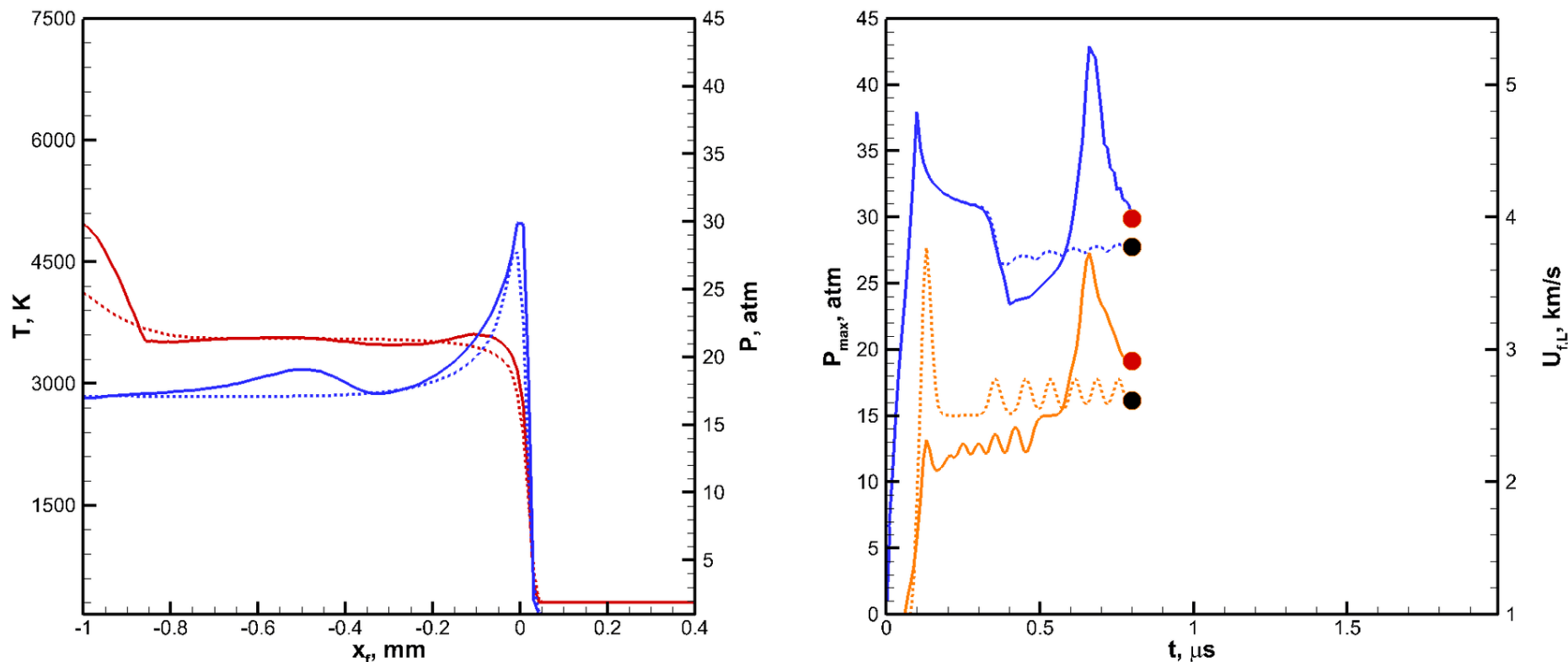
Расчет по методу «крупных частиц» дает искусственное сцепление фронта пламени и ударной волны непосредственно после окончания энерговыделения. Такое поведение решения обусловлено тем что метод крупных частиц дает более широкий фронт пламени при использовании одного размера расчетной ячейки, по сравнению с методом КАБАРЕ.

Инициирование детонации нестационарным источником энергии



В то же время метод КАБАРЕ значительно лучше разрешает фронт реакции и фронт ведущей ударной волны, что определяет последующий нестационарный характер эволюции волны горения. Детонация в данном случае формируется в пересжатом режиме, как результат ускорения пламени за ведущей ударной волной.

Инициирование детонации нестационарным источником энергии



Наконец, решения по обоим методам выходят на стационарные параметры скорости распространения детонации (~ 2730 м/с) и давления в пике Неймана (~ 21 атм).

Дефлаграционные и диффузионные пламена

Экспериментальные факты

- Нижний концентрационный предел распространения пламени в бедных водородно-воздушных смесях составляет величину порядка $\sim 4-6\%$ H_2 при нормальных условиях. При этом переделы распространения пламени вверх и вниз различны.
- При $\sim 10\%$ H_2 происходит смена физических механизмов распространения пламени, режим горения меняется с диффузионного на дефлаграционный.

7.0 %

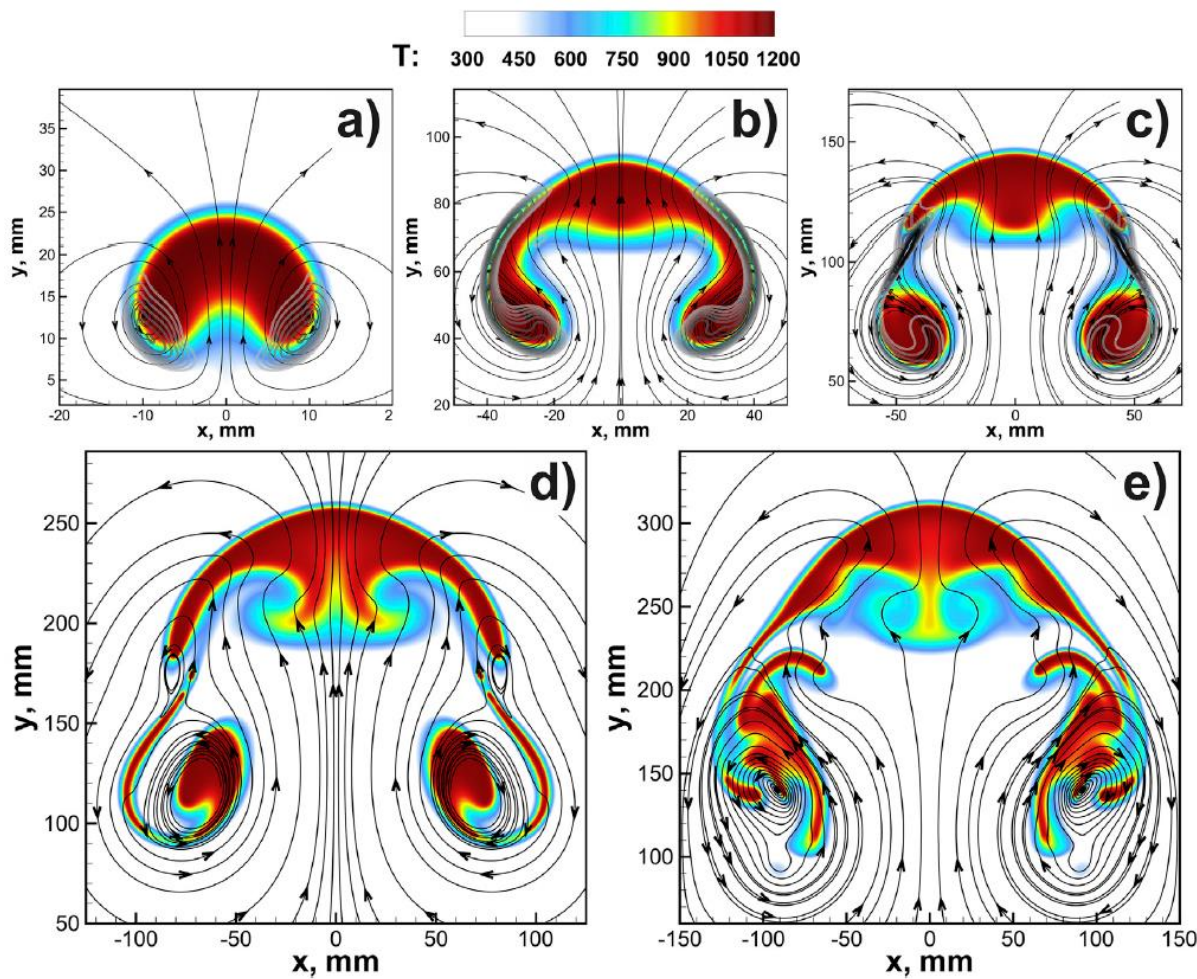
Manoubi et. al. // CNLNR, 2016

$\Delta t = 100 \text{ ms}$

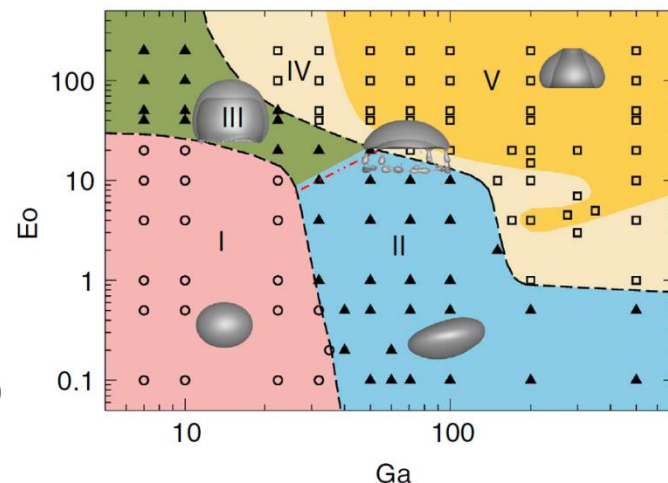
11.9 %

$\Delta t = 44 \text{ ms}$

Особенности развития ультра-бедных пламен в условиях земной гравитации



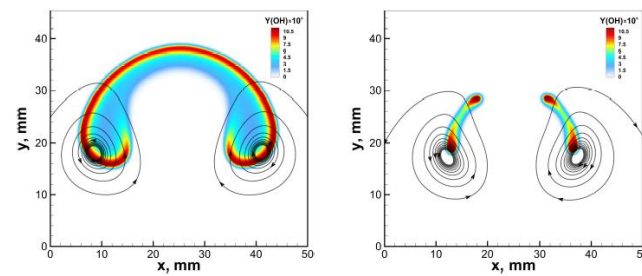
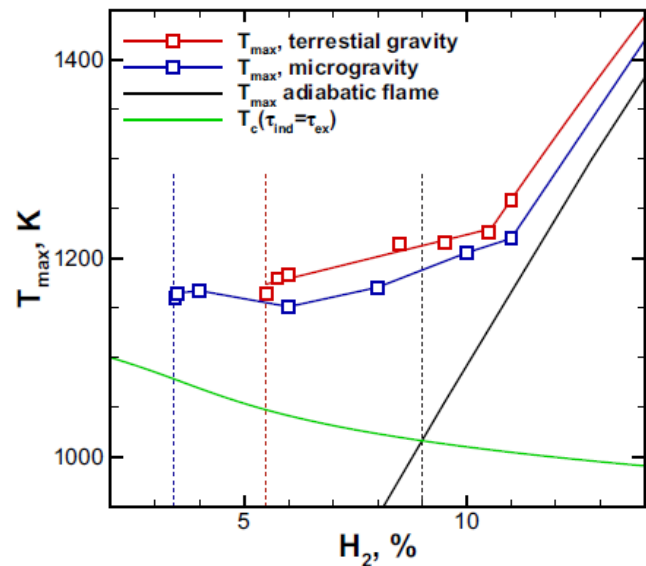
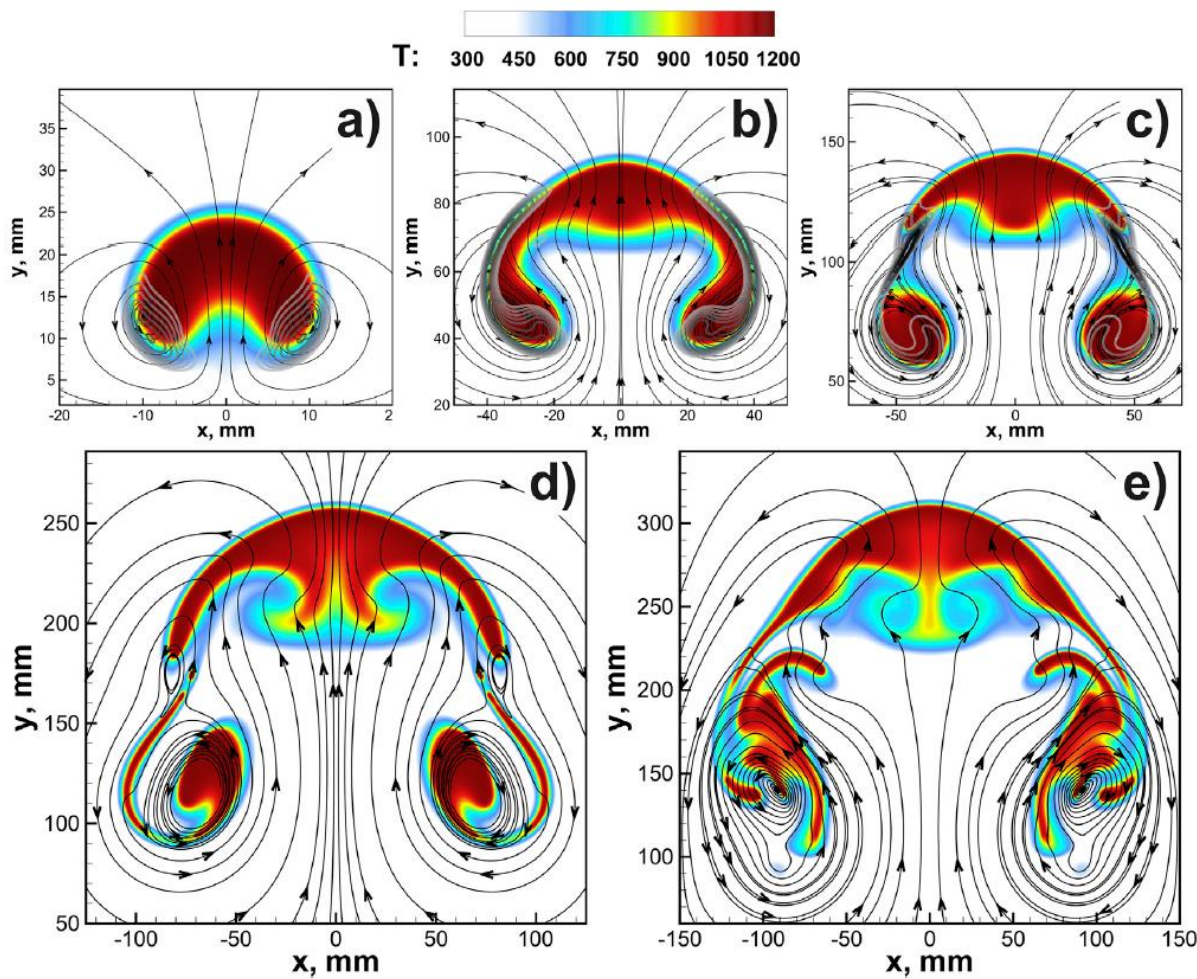
Tripathi et. al. // Nature communications, 2015



[Yakovenko I.S., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Melnikova K.S.// Intl. Journal Hydrogen Energy. 43, 2018. 1894.]

[Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Melnikova K.S.// IOP Conf. Ser. 1147, 2019. 012048.]

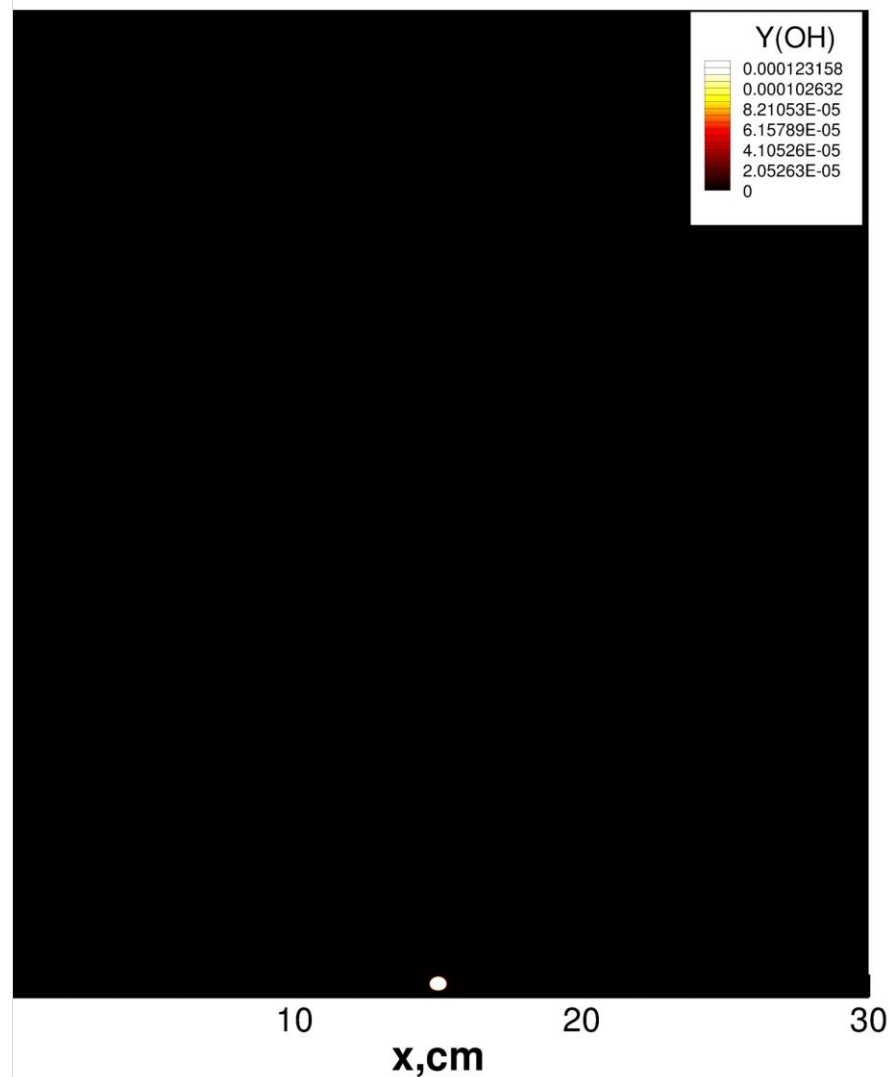
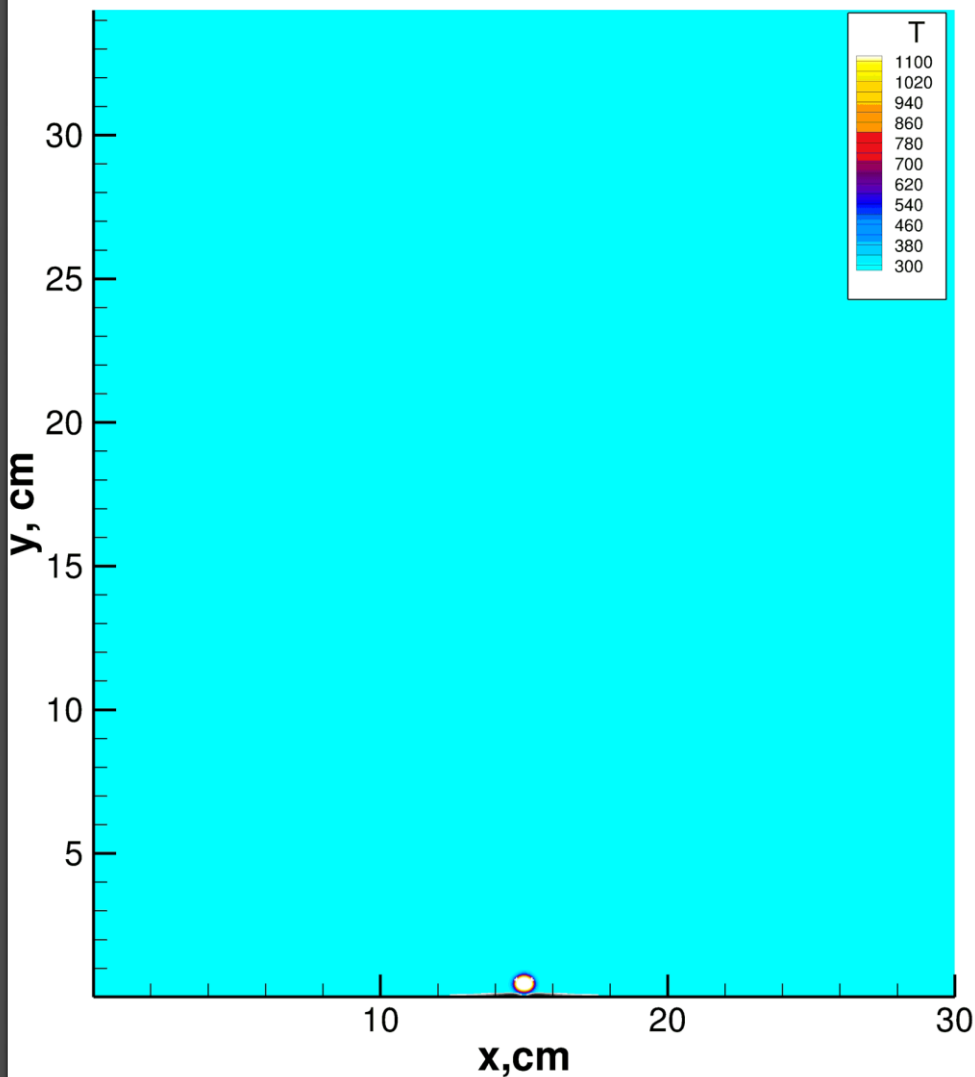
Особенности развития ультра-бедных пламен в условиях земной гравитации



[Yakovenko I.S., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Melnikova K.S.// Intl. Journal Hydrogen Energy. 43, 2018. 1894.]

[Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Melnikova K.S.// IOP Conf. Ser. 1147, 2019. 012048.]

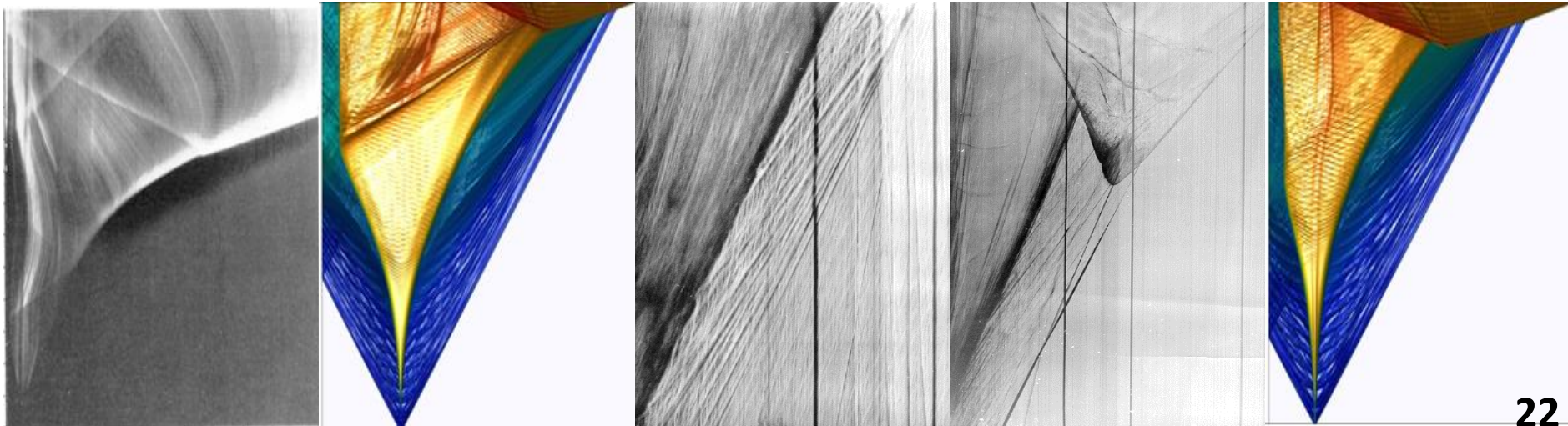
Особенности развития ультра-бедных пламен в условиях земной гравитации



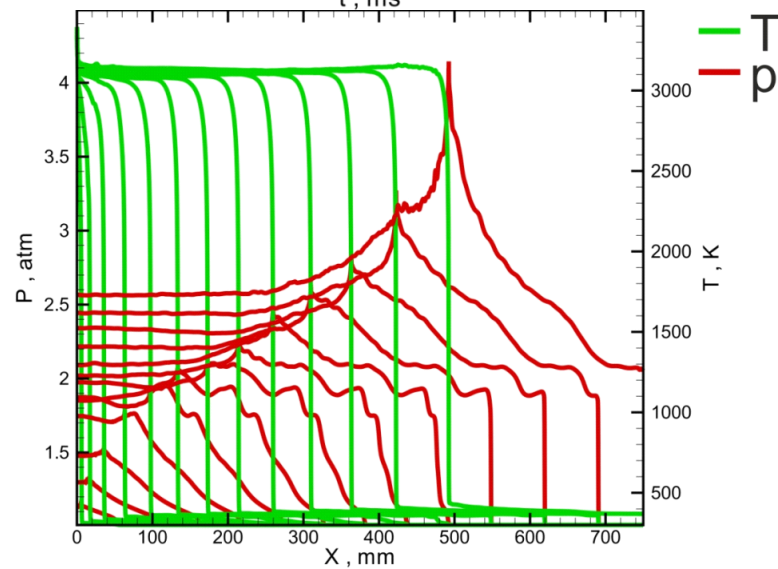
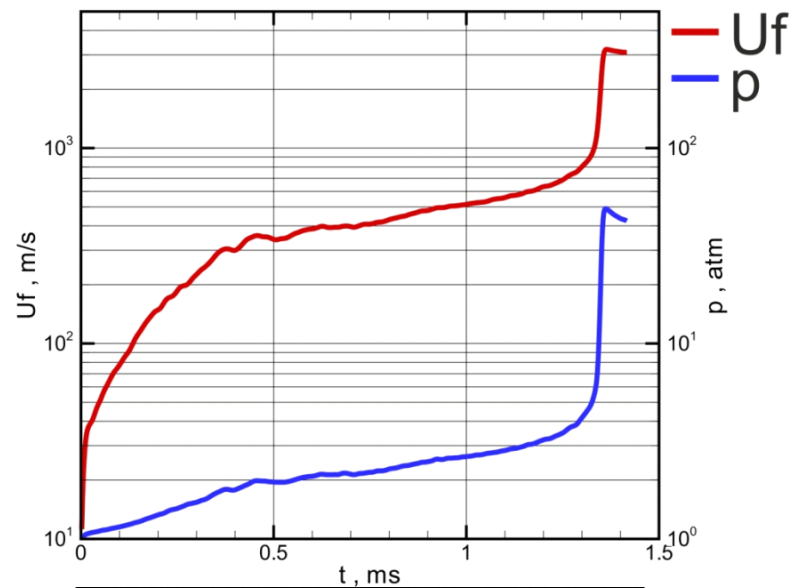
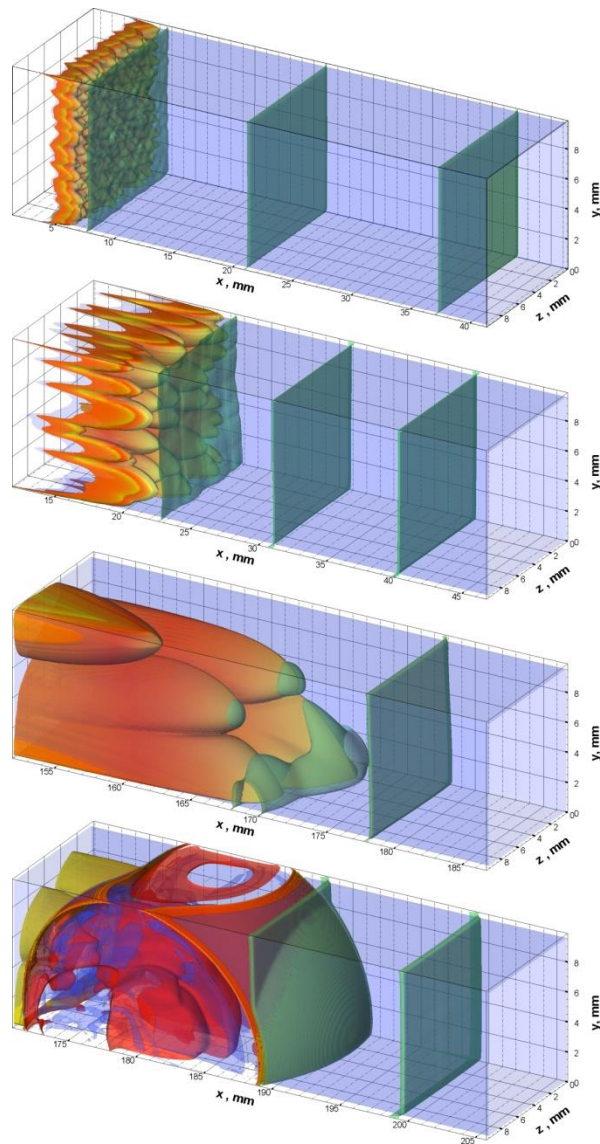
Ускорение пламени

Экспериментальные факты

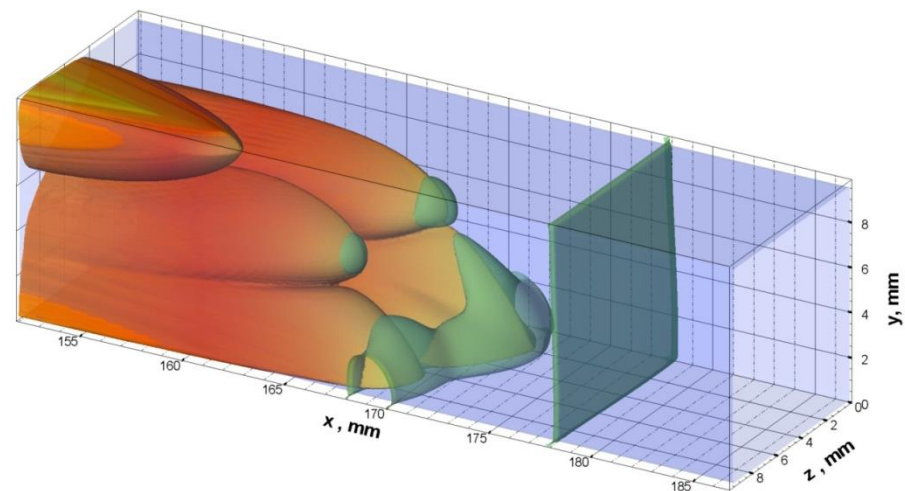
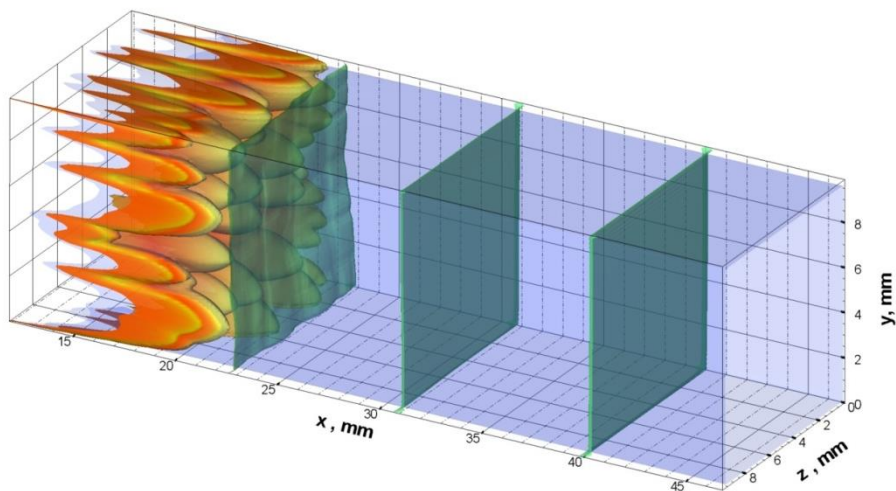
- Ускоряющаяся пламя перед переходом к детонации распространяется в так называемом режиме «запертого» пламени.
- Переход к детонации происходит либо на фронте запертого пламени, либо на контактной границе перед фронтом.
- Переход к детонации происходит только в высокоактивных смесях.



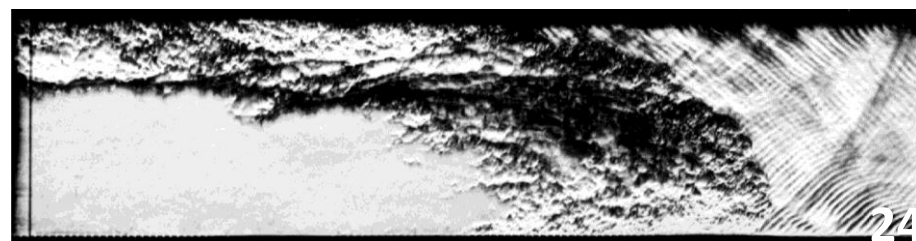
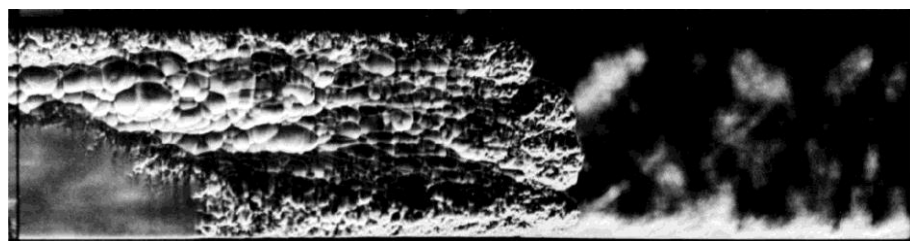
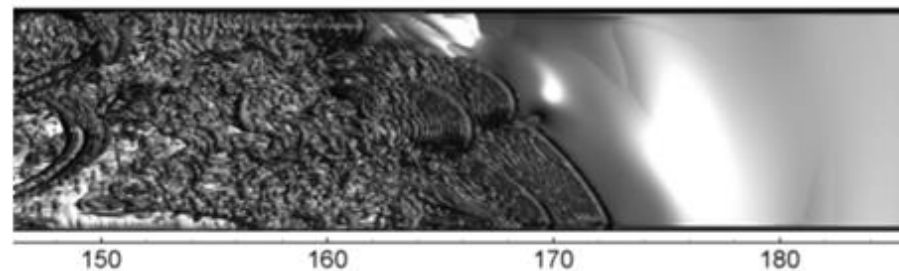
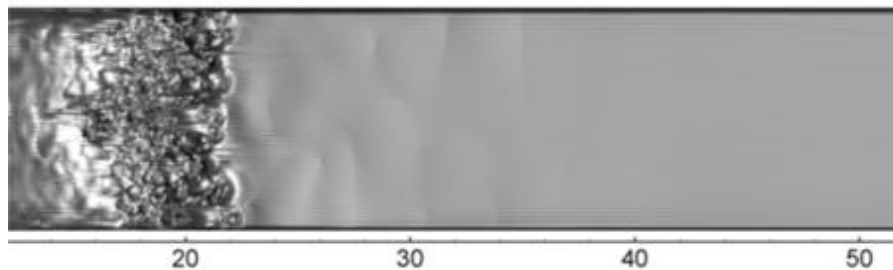
Ускорение пламени и переход к детонации



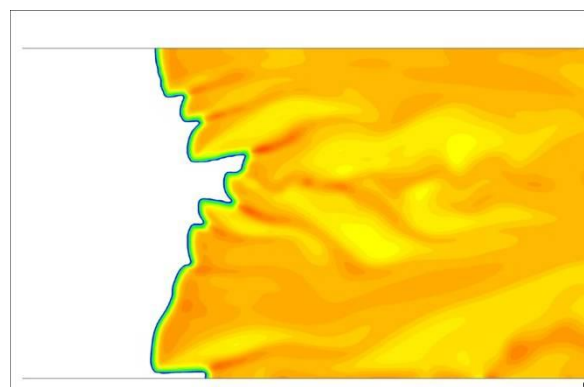
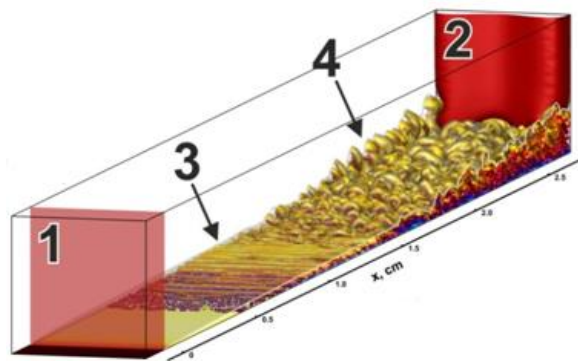
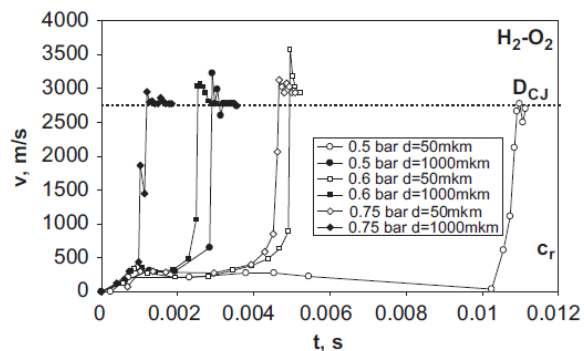
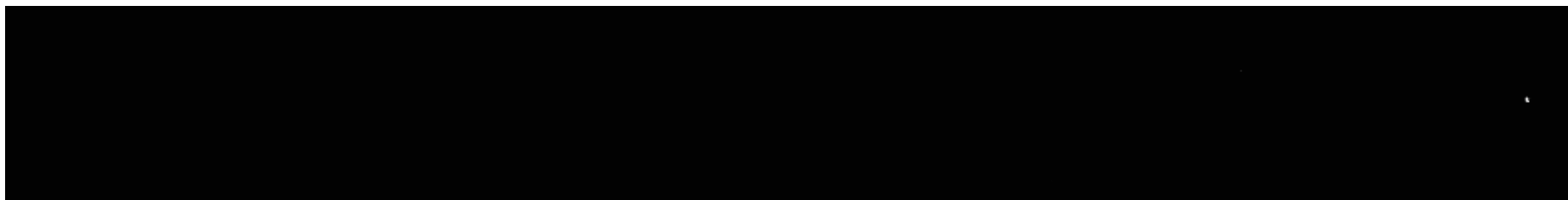
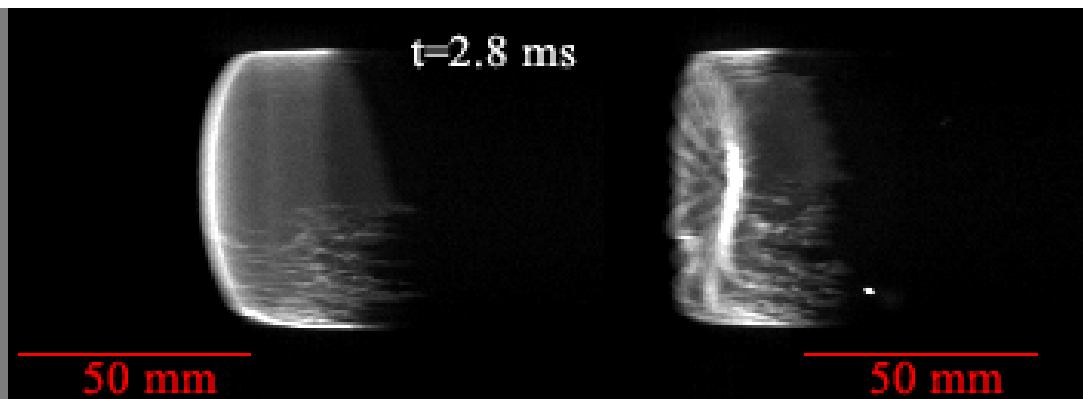
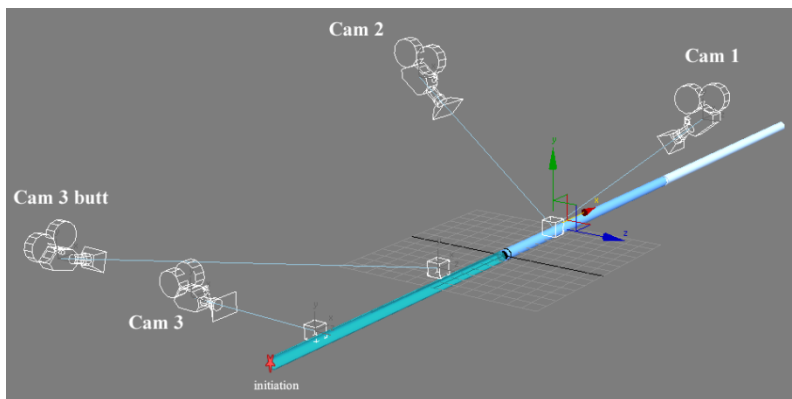
Структуры течения, формируемые ускоряющимся пламенем: Визуализация



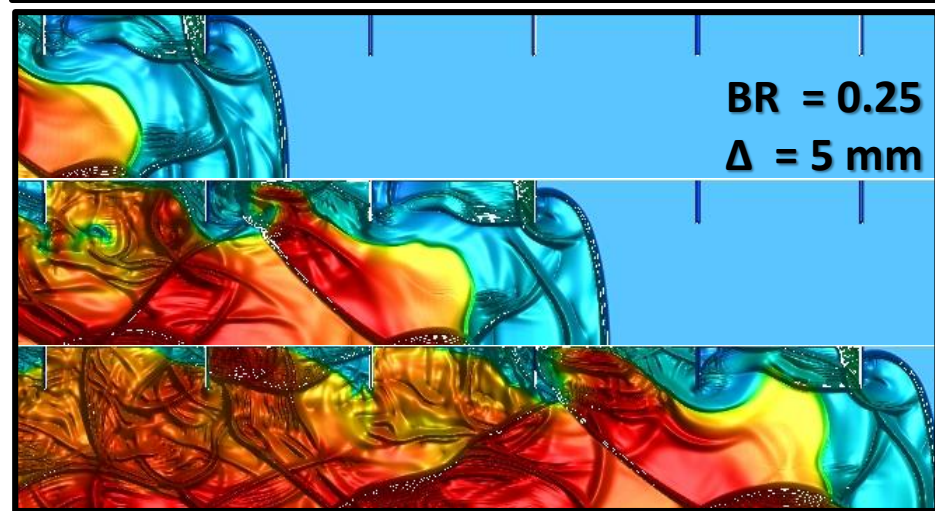
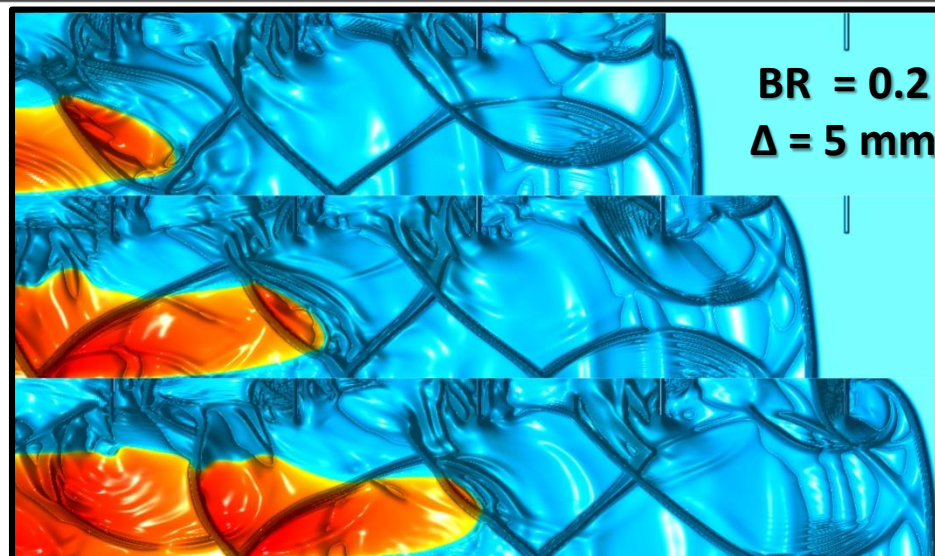
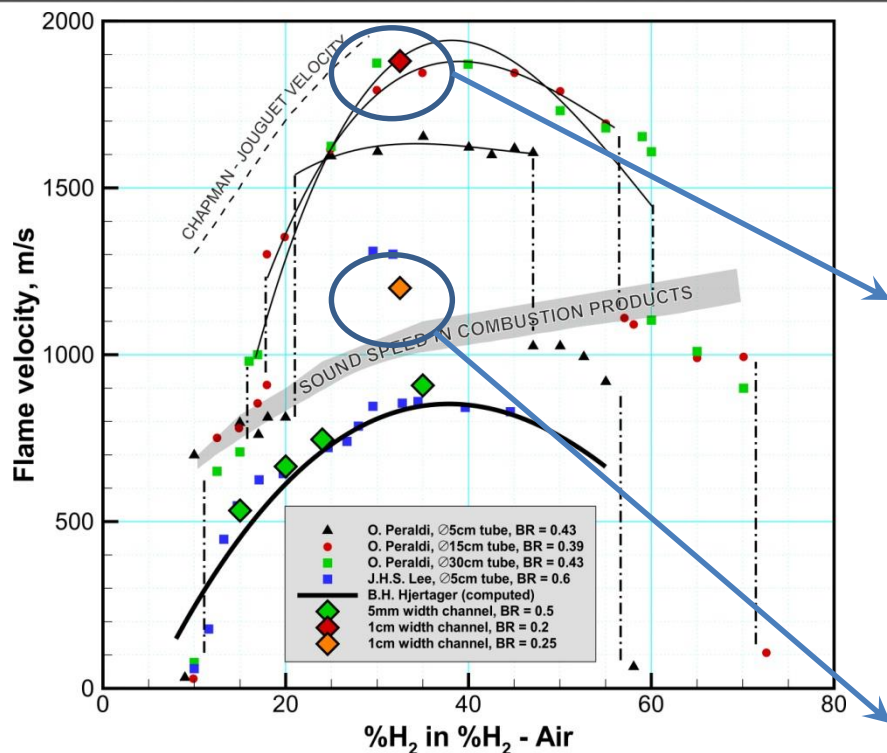
[Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Liberman M.A. // Intl. Journal Hydrogen Energy. 38, 2013. 16427.]



Структуры течения, формируемые ускоряющимся пламенем: Визуализация



Около и сверхзвуковые режимы распространения пламени в загроможденных каналах



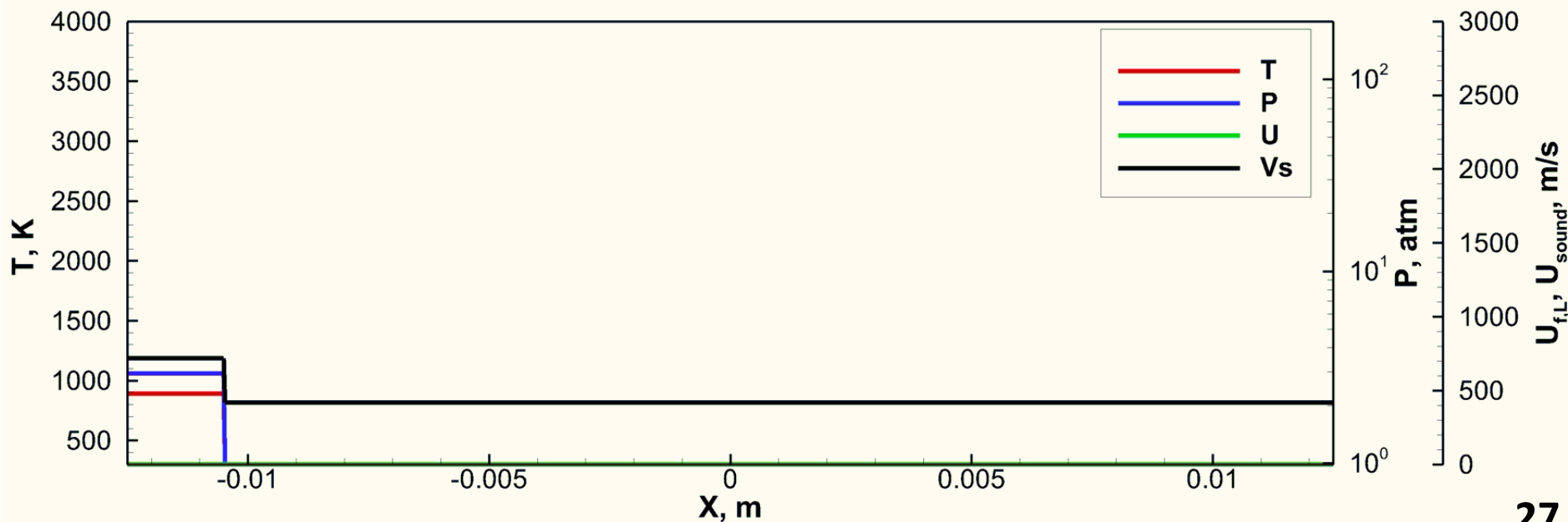
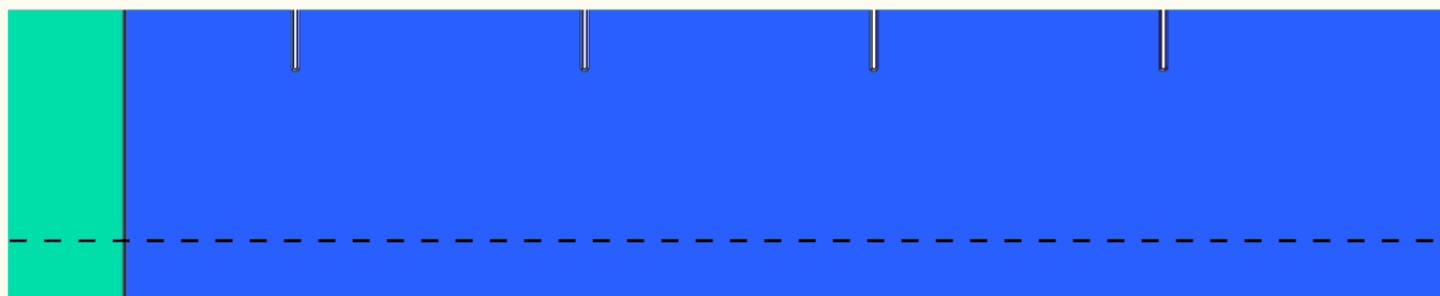
В загроможденных каналах при определенных геометрических условиях ведущая ударная волна и переотраженные от препятствий волны формируют стоячие волны. В таком случае, влияние волн сжатия на фронт горения минимально и режим запертого пламени может быть реализован.

Около и сверхзвуковые режимы распространения пламени в загроможденных каналах

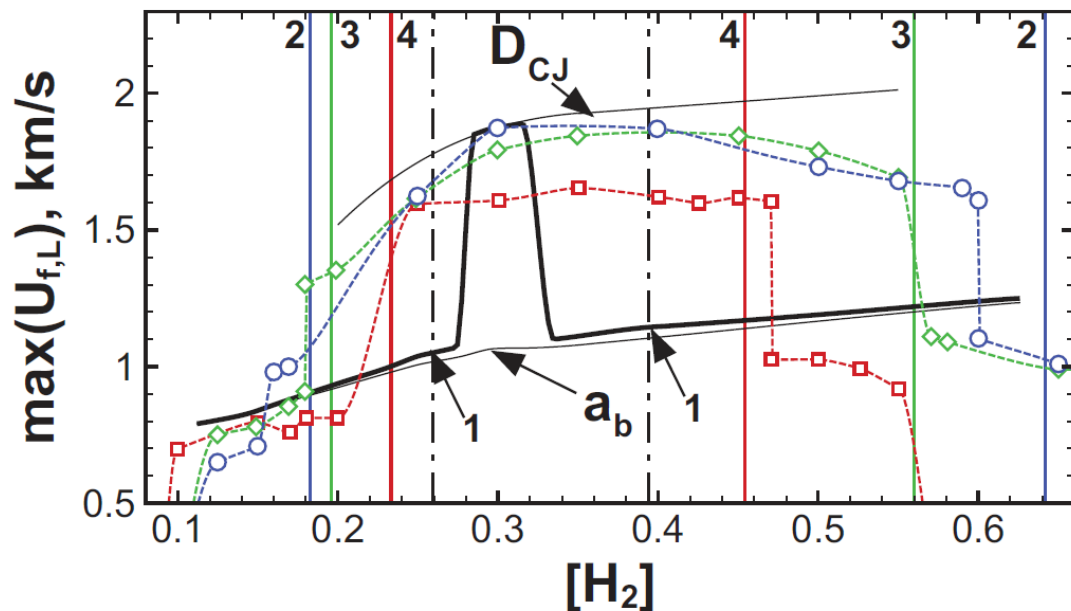
Смесь водород – воздух с 32.5% водорода

Ширина канала: 1 см

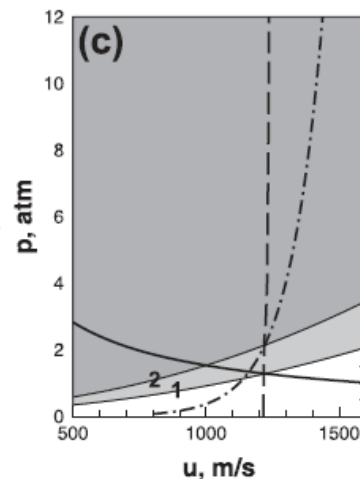
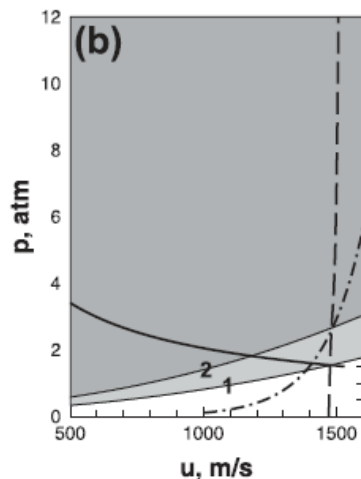
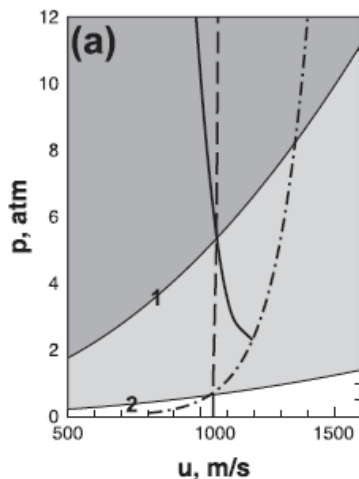
Blockage ratio: 0.2 с расстоянием между препятствиями 5 мм



Классификация высокоскоростных режимов горения и критерии их реализации



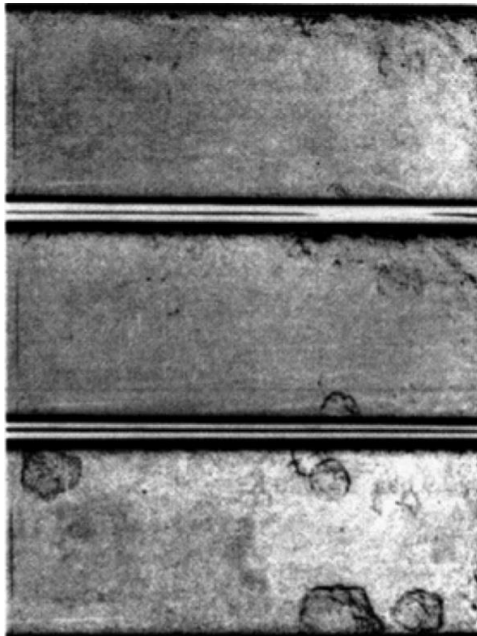
На основе всестороннего анализа физических механизмов формирования высокоскоростных режимов горения и особенностей химической кинетики процесса была предложена классификация режимов горения и разработаны универсальные критерии реализации высокоскоростных режимов горения в предварительно перемешанных горючих газовых смесях.



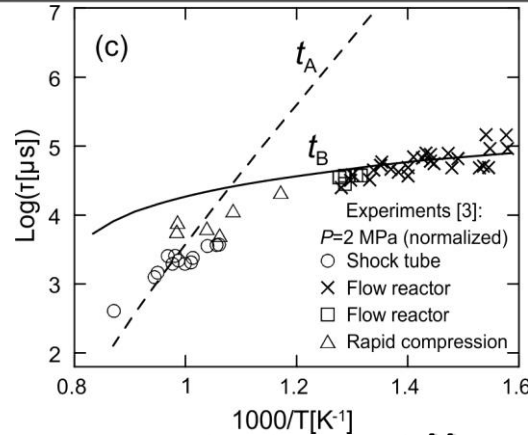
[Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Ivanov M.F. // *Intl. Journal Hydrogen Energy*. 41, 2016. 22465.]
 [Kiverin A.D., Yakovenko I.S.// *Mat. Model. Nat. Phenomena*. 13, 2018. 54.]
 [Kiverin A.D., Yakovenko I.S.// *Comb. Sci. Tech.*, 2018. in print]

Механизмы воспламенения в экспериментах в ударных трубах

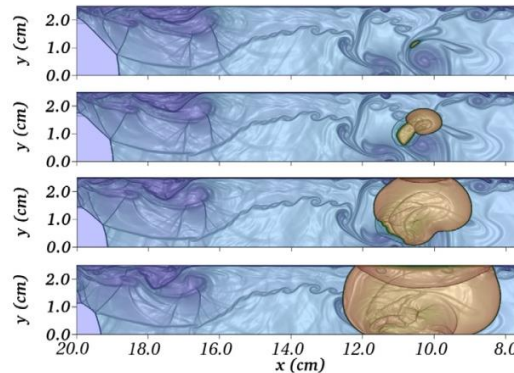
Эксперимент в ударной трубе является одним из наиболее распространенных способов исследования экзотермических реакций в газовых смесях.



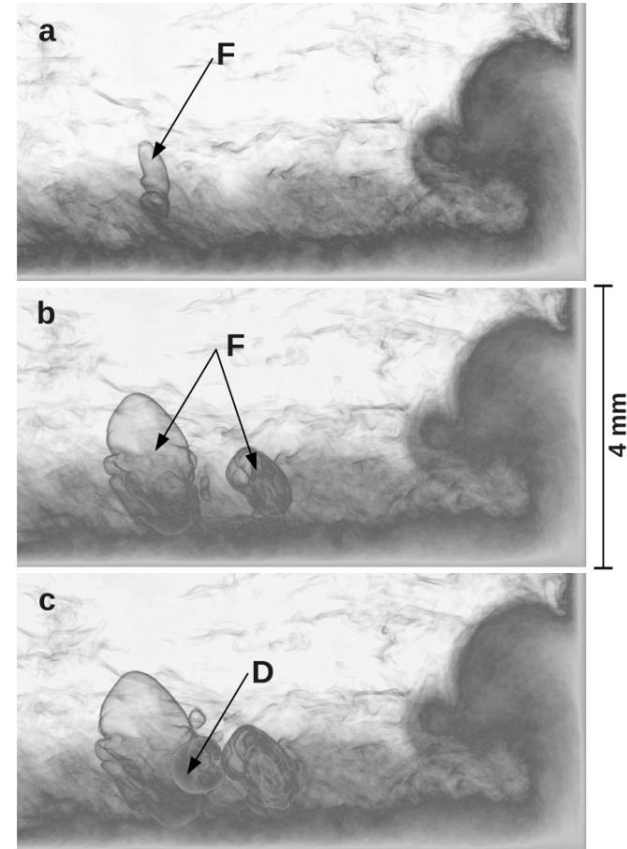
Blumenthal et.al (experiment) // Comb. Sci. Tech. 1996



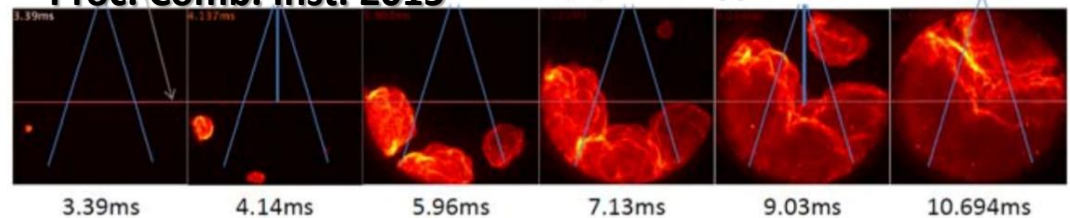
Medvedev et.al // Comb. flame 2010



Grogan Ihme (calculations) // Proc. Comb. Inst. 2015



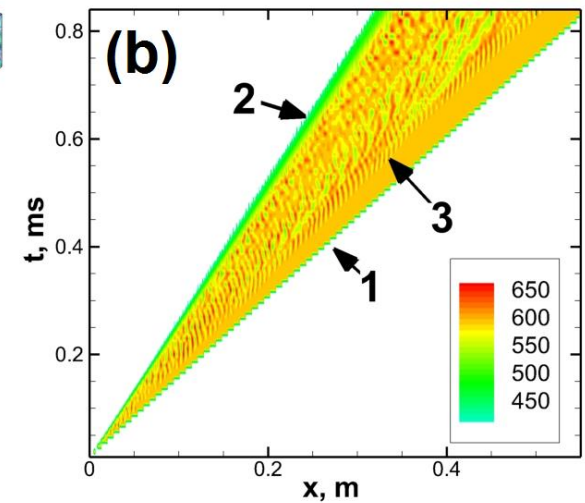
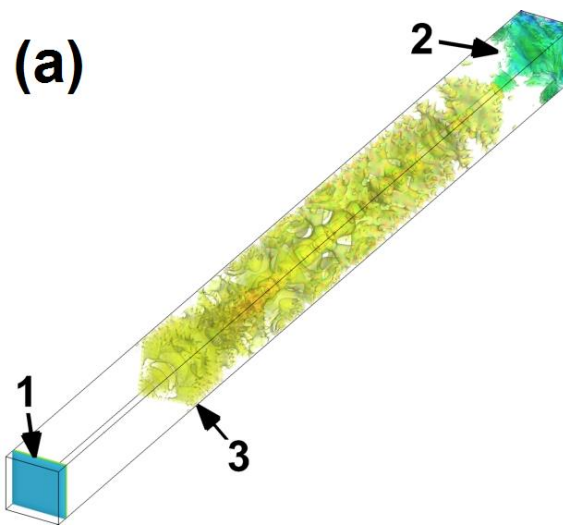
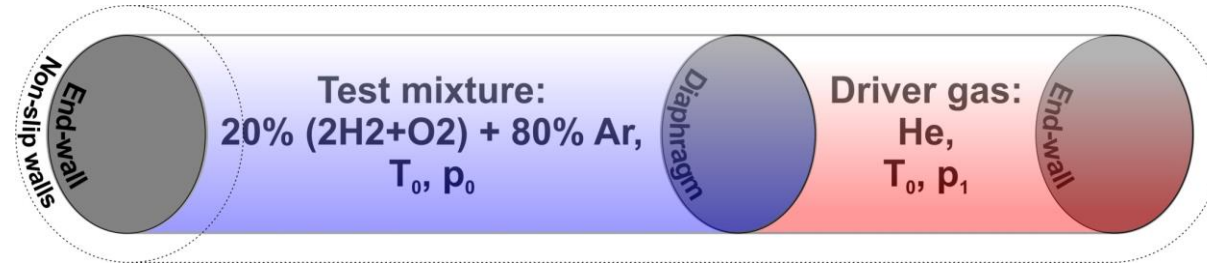
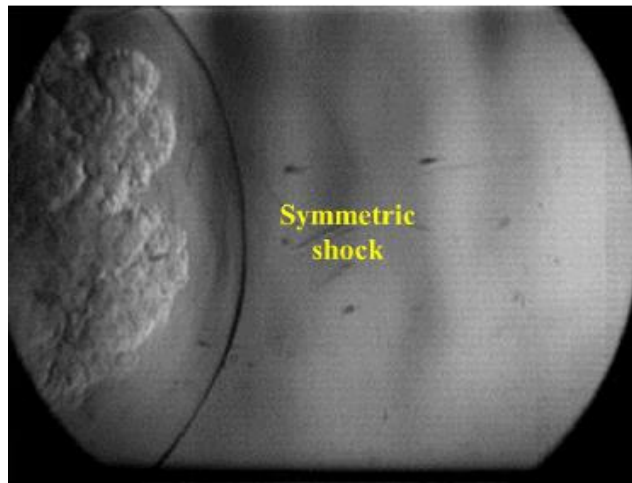
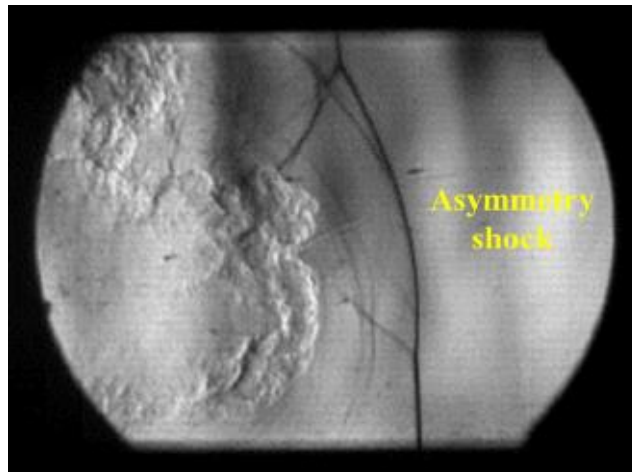
Khochlov et. al. (calculations) // ICDERS 2015



Hanson, Davidson (experiment) // ICDERS 2015

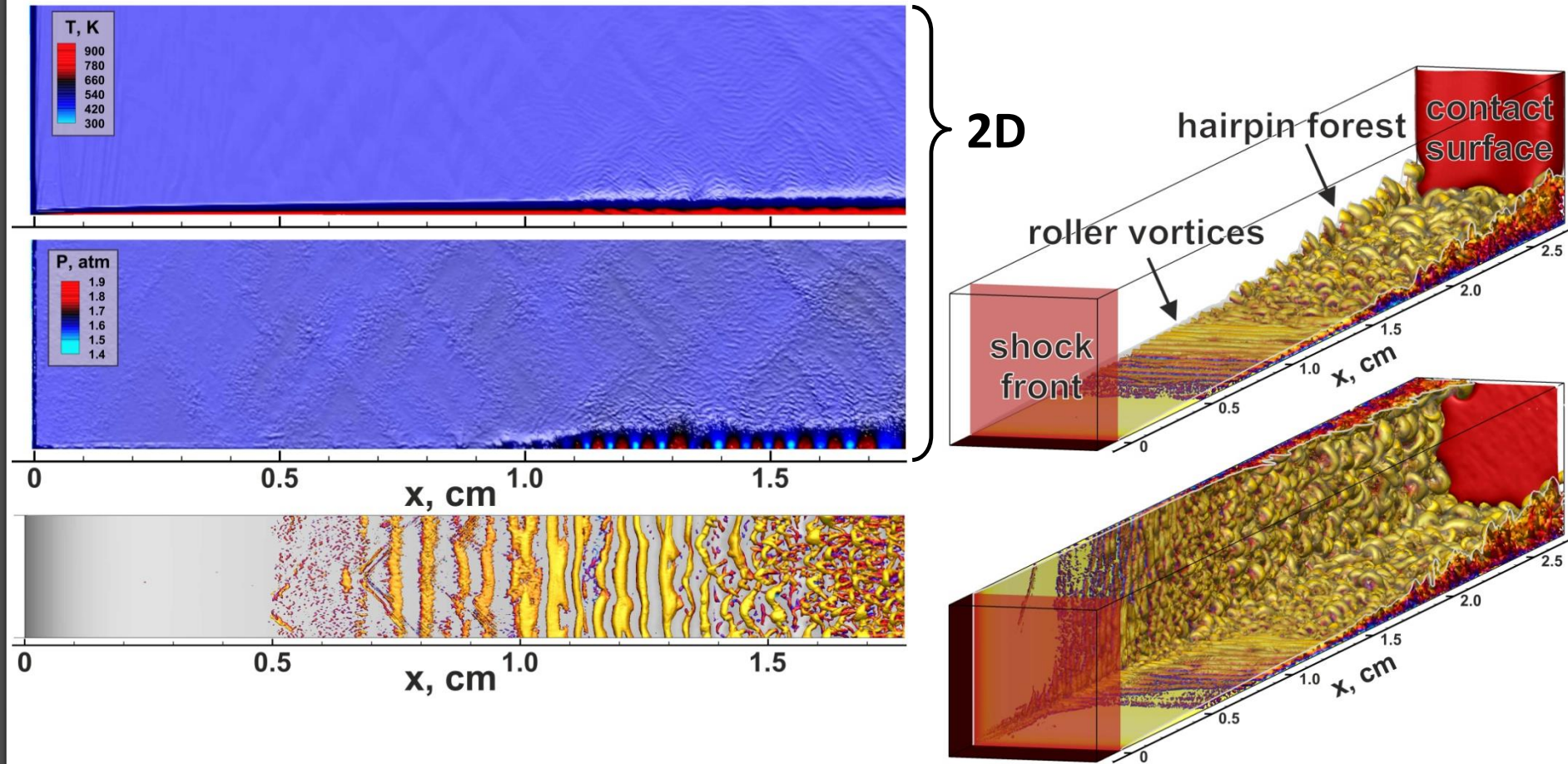
Очаговое воспламенение

Эволюция течения, газодинамическая неустойчивость



Очаговое воспламенение

Эволюция течения, газодинамическая неустойчивость

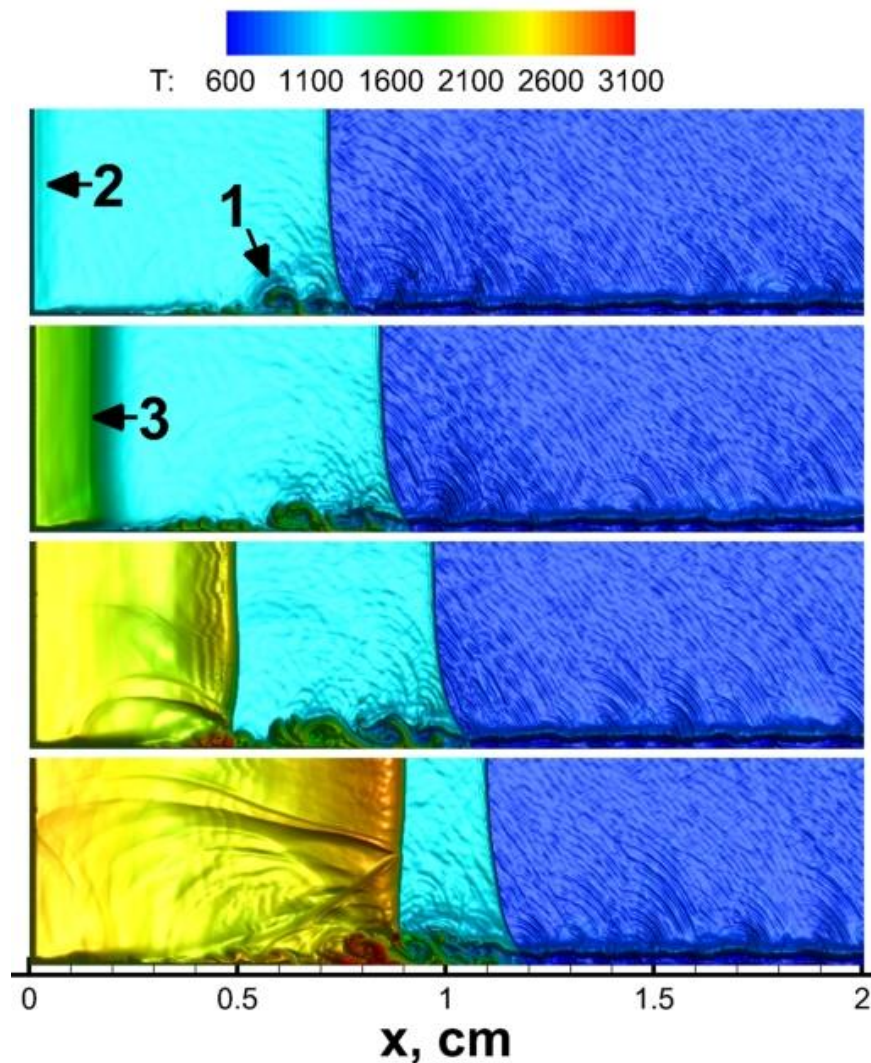
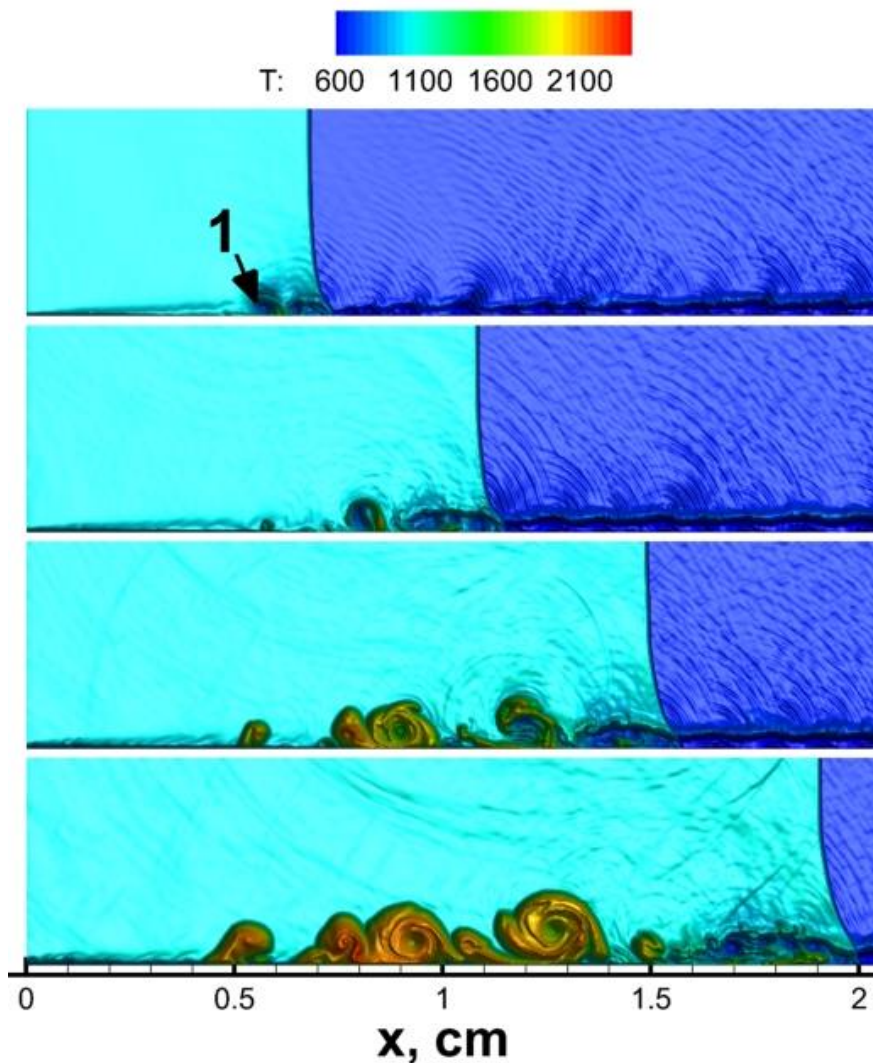


[Kiverin A., Yakovenko I.// *Phys. Rev. Fluids*, 3 (2018) 053201]

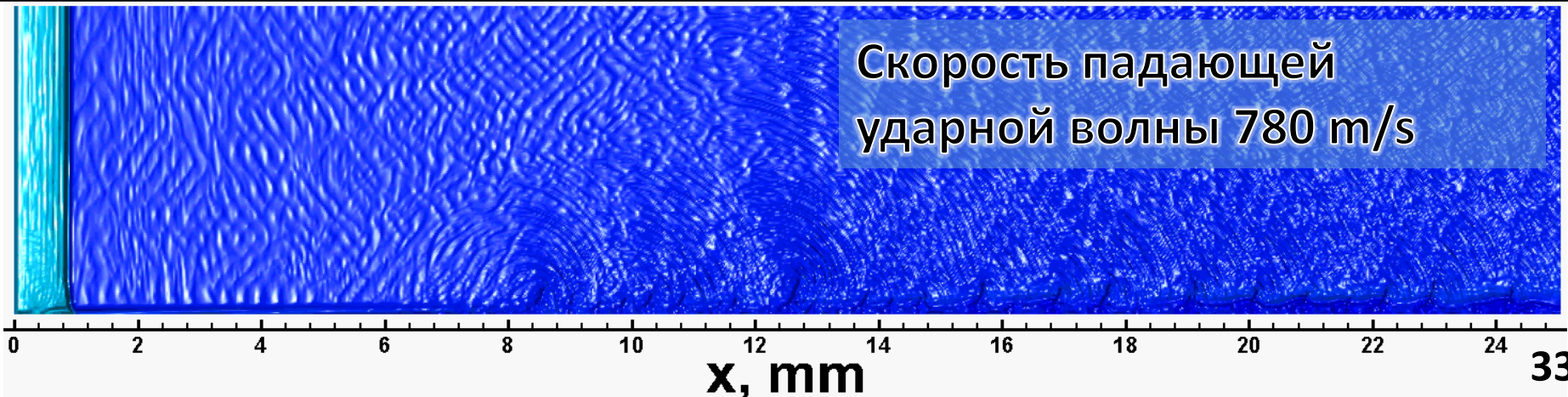
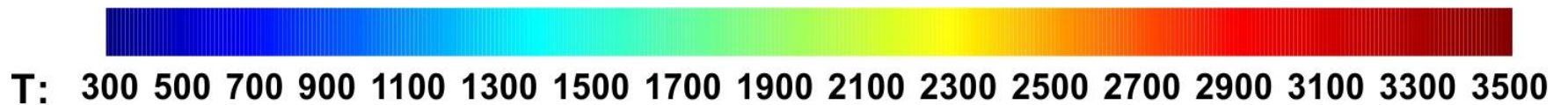
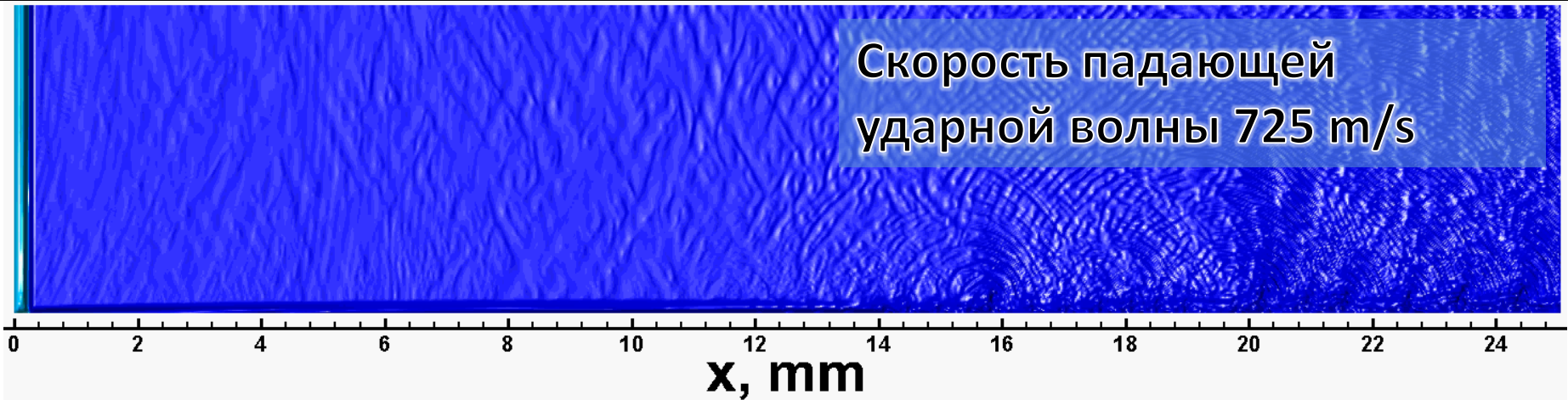
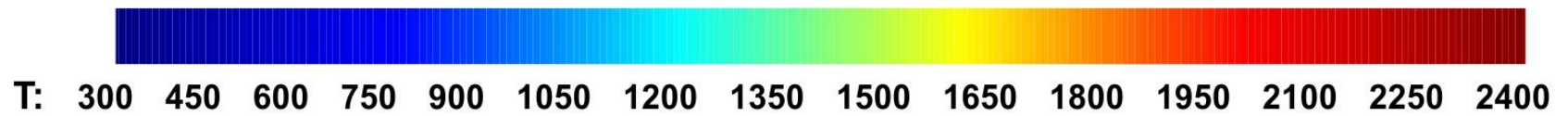
[Kiverin A., Yakovenko I.// *Phys. Lett. A*, 382 (2018) 309]

Очаговое воспламенение

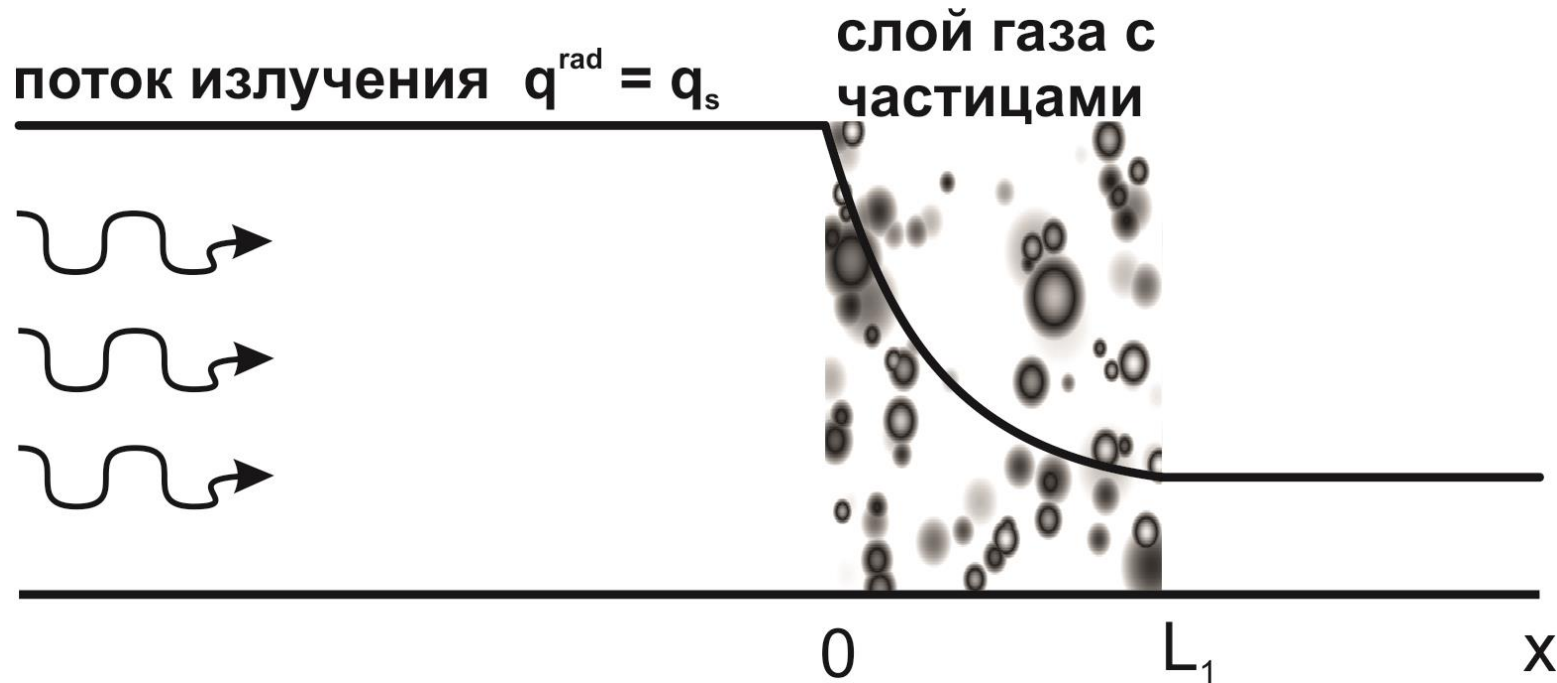
Развитие волны экзотермической реакции



Очаговое воспламенение



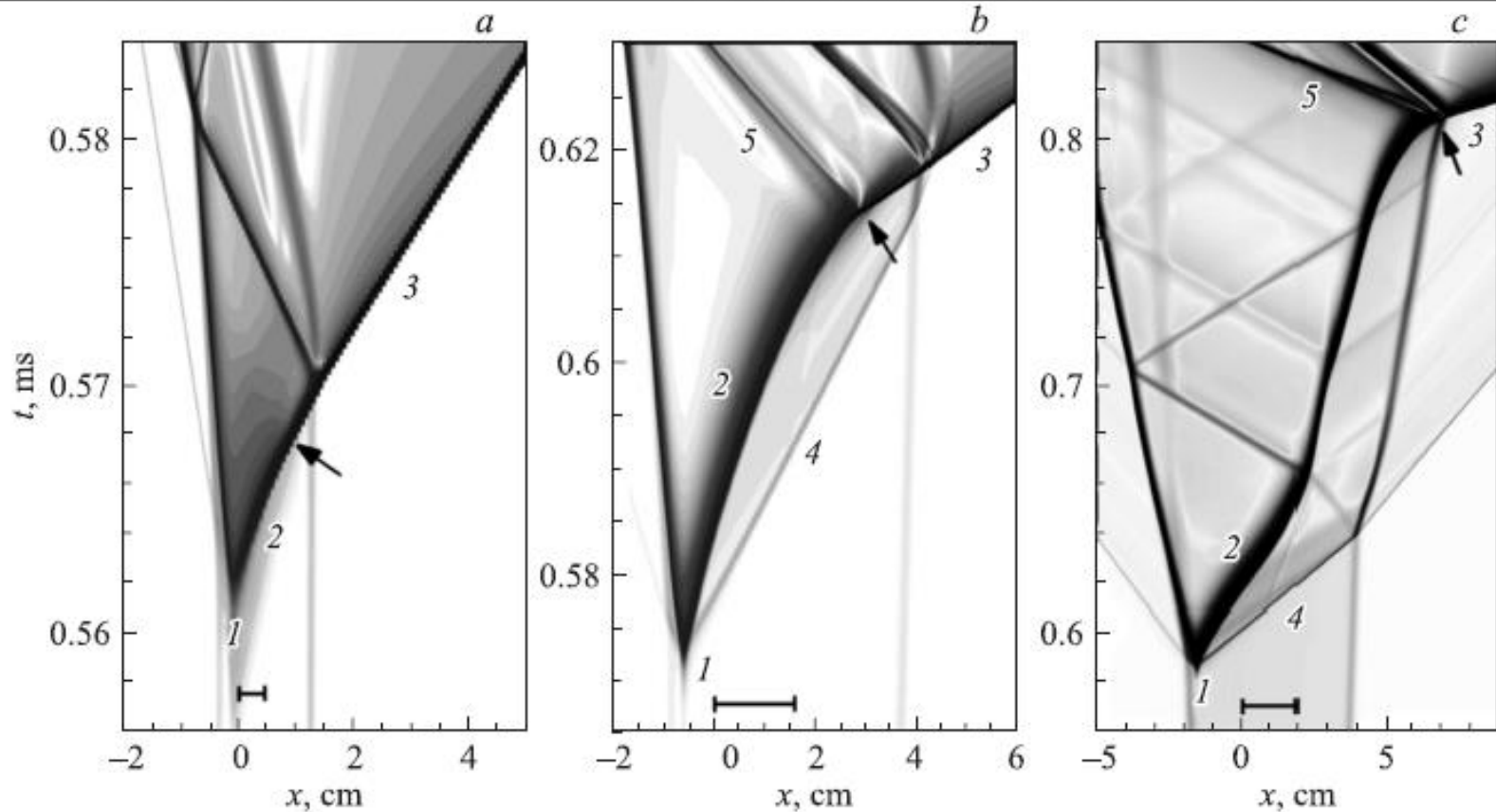
Инициирование детонации в дисперсных средах



Канал заполнен стехиометрической смесью водорода с кислородом при нормальных условиях. В слое шириной L_1 содержатся инертные микрочастицы.

В начальный момент времени мгновенно включается источник излучения на левой стенке канала. Излучение от источника соответствует излучению черного тела с температурой $T_s = 5800$ К [параметры источника заимствованы из Berkowitz et al. 2011].

Режимы формирования детонации в дисперсных средах

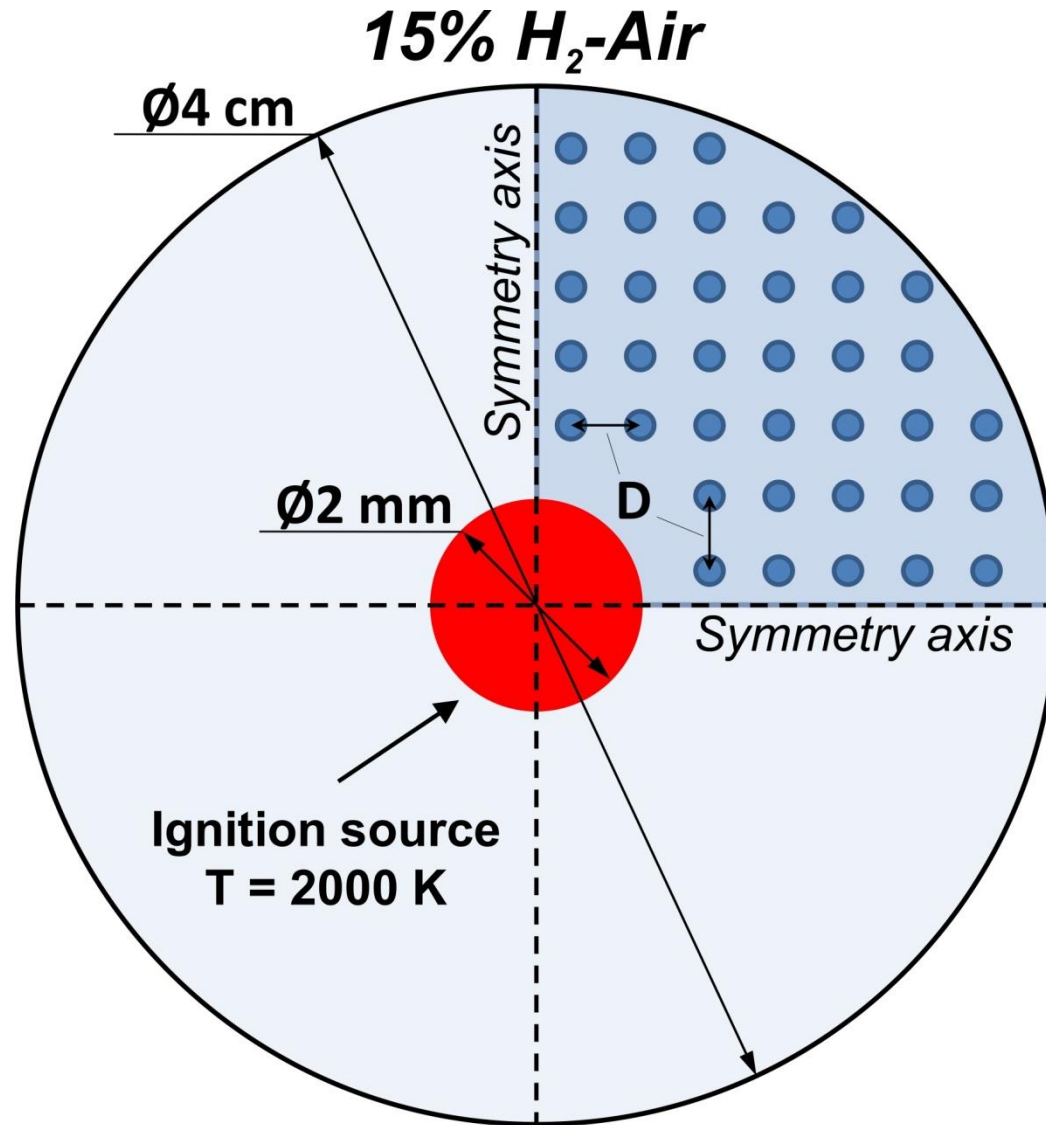


а) Прямое инициирование детонации в слое начальной толщины 0.5 см, б) Инициирование детонации в результате развития нестационарного процесса ускорения пламени в слое толщиной 1.7 см с) инициирование детонации в результате взаимодействия волны горения и переотраженных ударных волн в слое начальной ширины 2.0 см.

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

[Efremov V.P., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S.// *JTPL*, 42 (2016) 194]

Влияние микрокапель воды на распространение обедненного пламени в замкнутом объеме



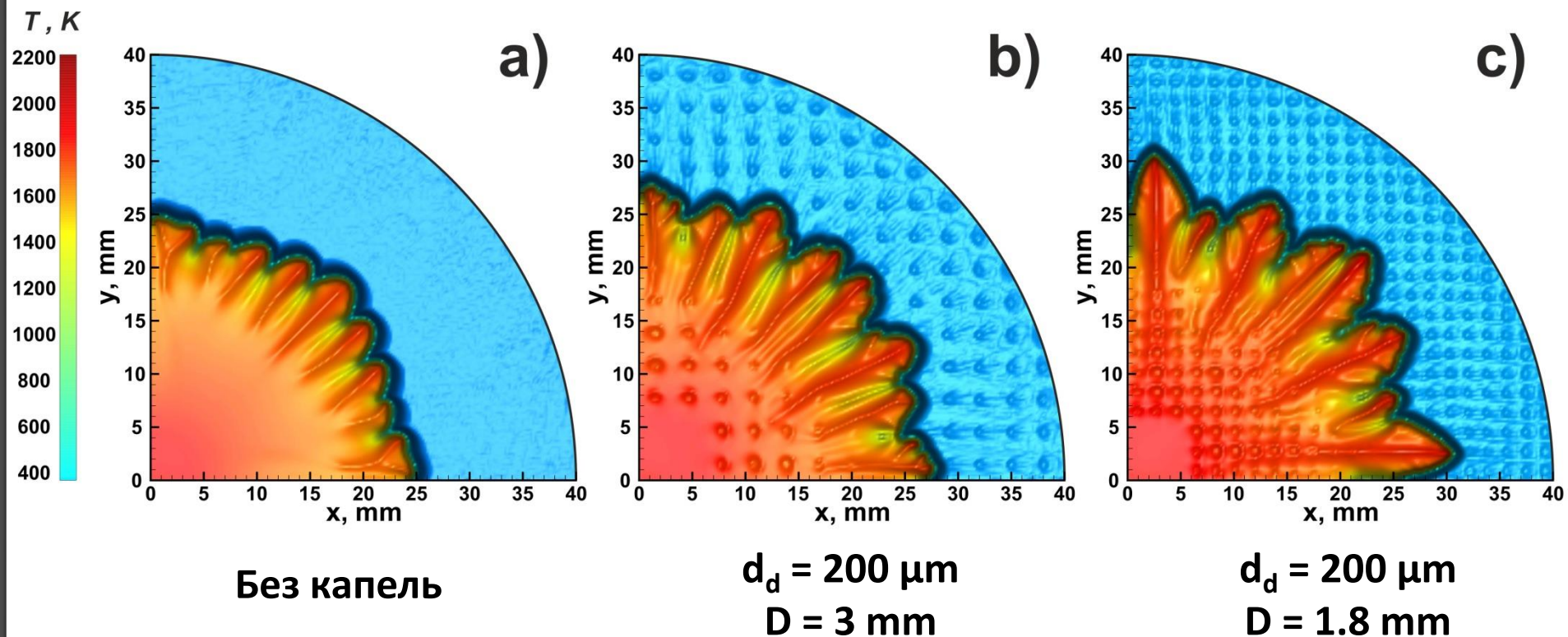
Варьируемые
параметры:

D – расстояние между
каплями

0.4 mm – 3.0 mm

d_d – диаметр капель
25 μ m – 200 μ m

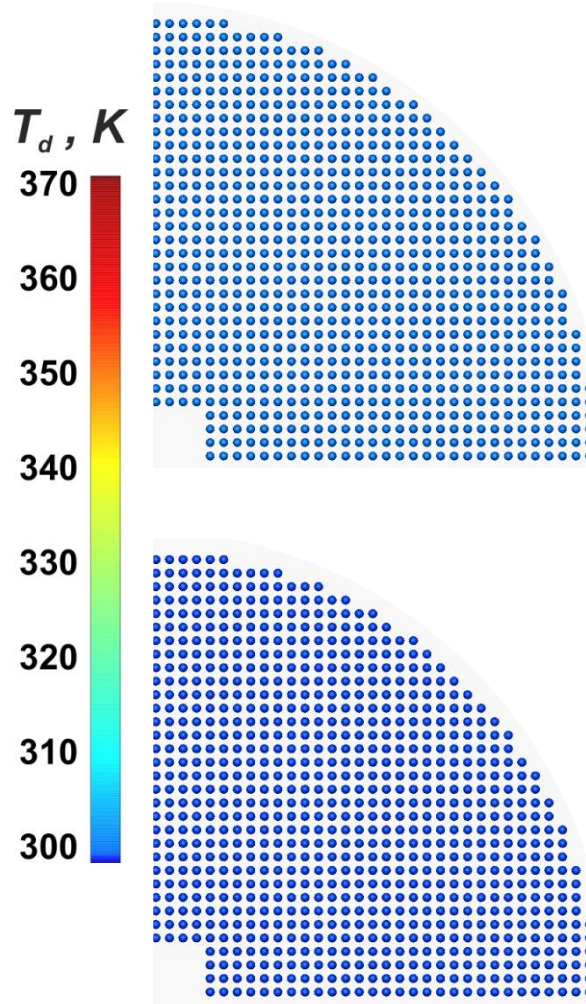
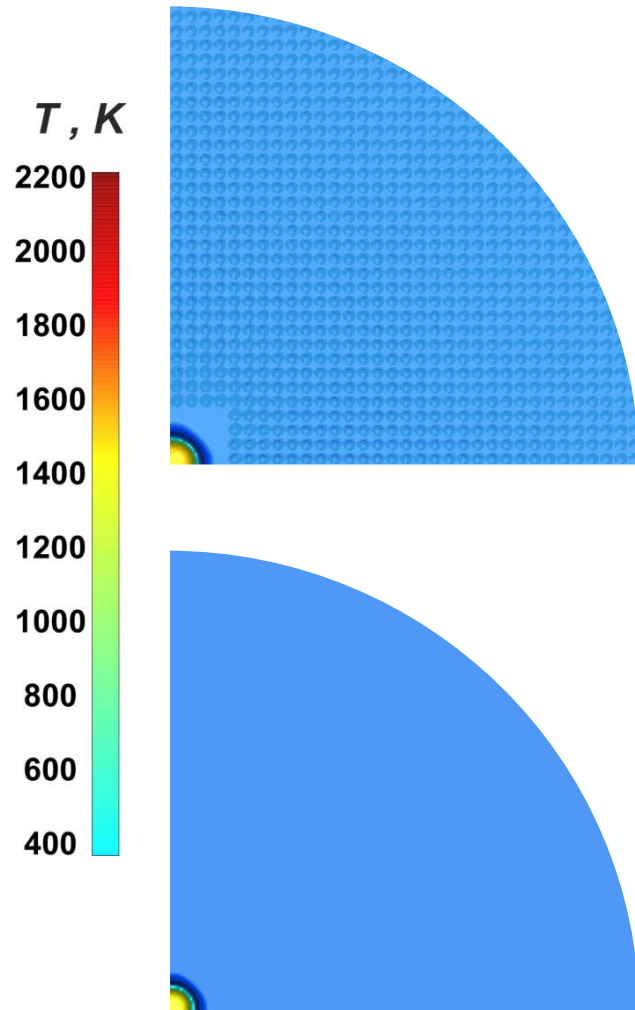
Структура фронта пламени



$t = 10 \text{ ms}$

В присутствии капель воды, структура фронта пламени становится более развитой чем в случае горения чистой газовой смеси. Площадь фронта горения увеличивается с уменьшением расстояния между каплями.

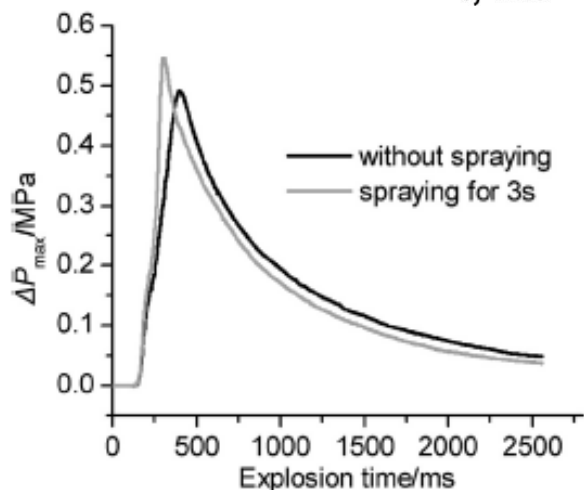
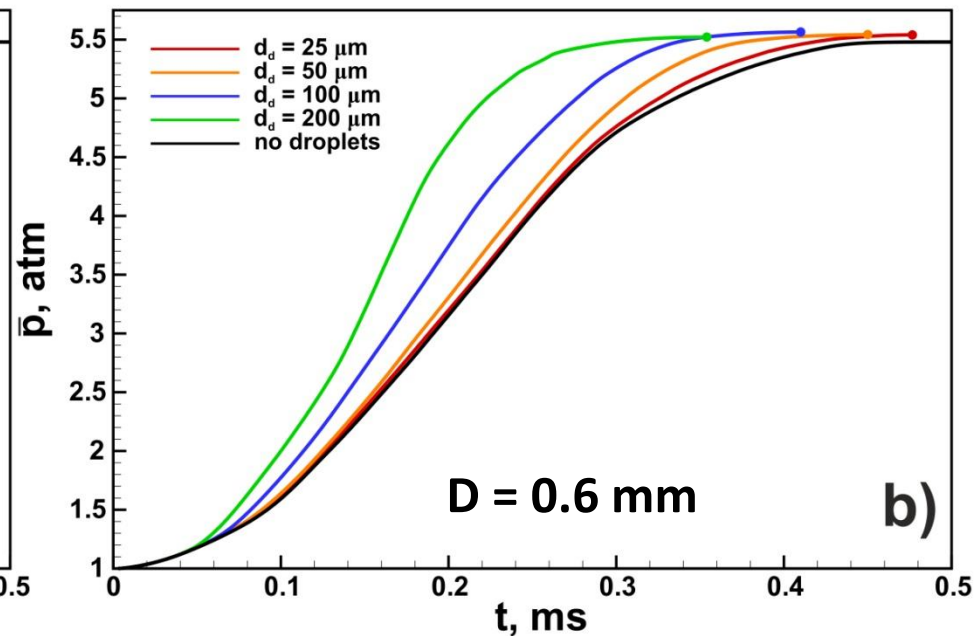
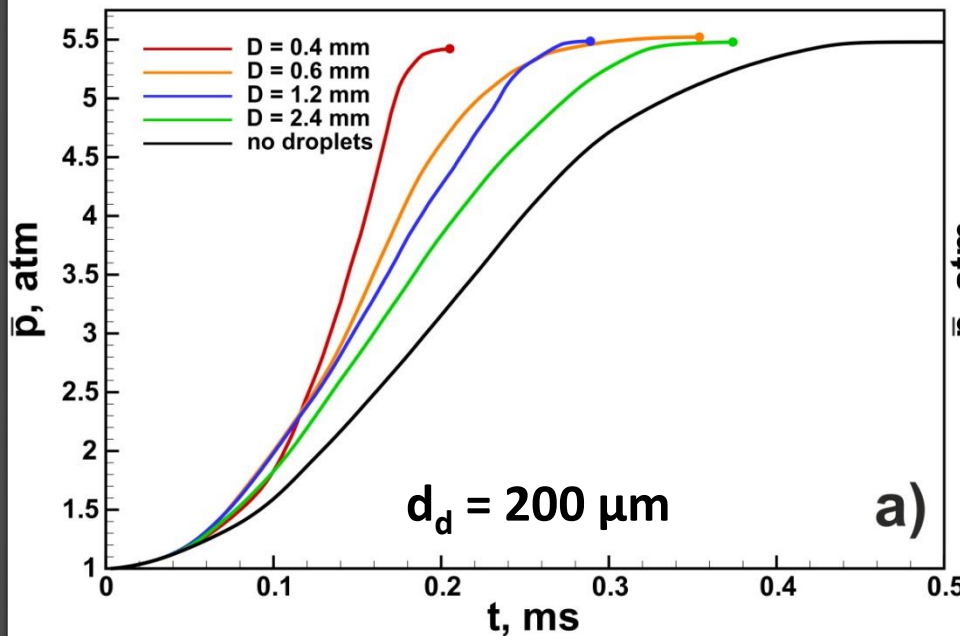
Динамика развития горения



$d_d = 200 \mu\text{m}$
 $D = 1.2 \text{ mm}$

$d_d = 25 \mu\text{m}$
 $D = 1.2 \text{ mm}$

Темпы нарастания давления в замкнутом объеме



Микрокапли воды существенно усиливают процесс горения что может быть продемонстрировано кривыми роста давления от времени. Время сгорания смеси уменьшается с уменьшением расстояния между каплями. Сокращение времени процесса сильнее для более крупных капель.

Заключение

- **Нестационарные процессы горения зачастую сопровождаются формированием сложных газодинамических течений. Для глубокого понимания нестационарного горения необходимы точное воспроизведение и корректная интерпретация газодинамических процессов .**
- **Выбор подходящей вычислительной методики для решения различных задач, связанных с эволюцией реагирующих потоков, является важнейшим этапом процесса математического моделирования горения.**
- **Для точного воспроизведения химических превращений, и следовательно всего процесса горения, необходимо использование детальных механизмов химической кинетики. Это условие определяет высочайшие требования к вычислительным ресурсам и в частности диктует необходимость использования суперкомпьютеров даже для решения фундаментальных задач физики горения и взрыва.**

Наша команда



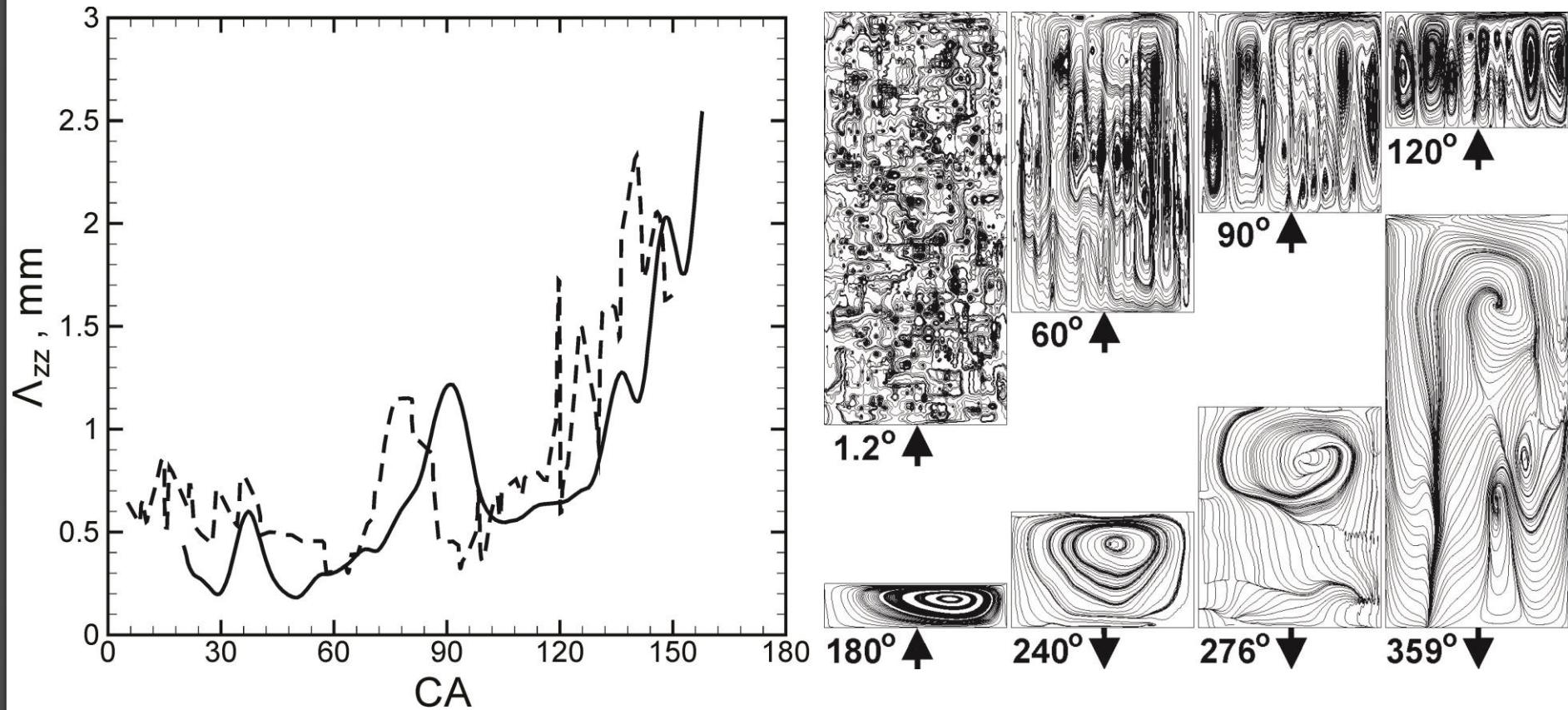
Лаборатория Математического Моделирования Объединенного Института Высоких Температур РАН

- Киверин А.Д. – к.ф.-м.н., Заведующий лабораторией.
- Яковенко И.С. – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник.
Направления: Газовая динамика горения, высокопроизводительные вычисления.
- Смыгалина А.Е. – к.ф.-м.н., научный сотрудник.
Направления: двигатели внутреннего сгорания, апробация механизмов химической кинетики.
- Мельникова К.С. – младший научный сотрудник.
Направления: околопредельное горение, биотопливо.
- Минаев К.О. – студент.
Направления: процессы воспламенения в рамках экспериментов в ударных трубах.

Спасибо за внимание!

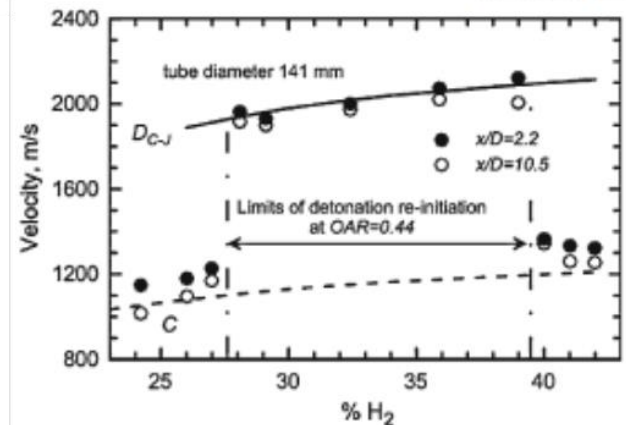
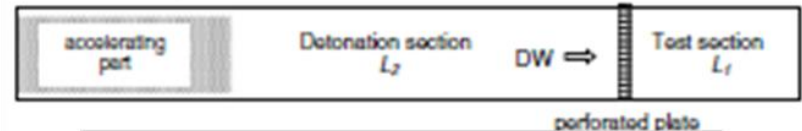
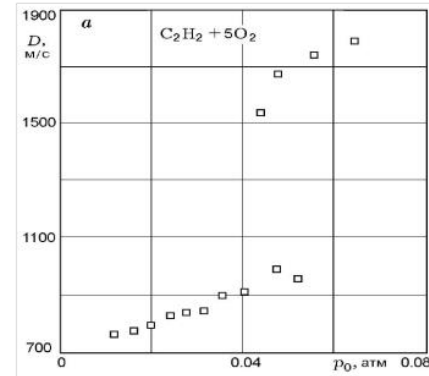
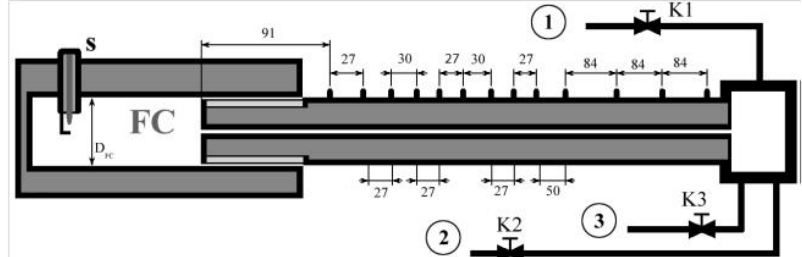
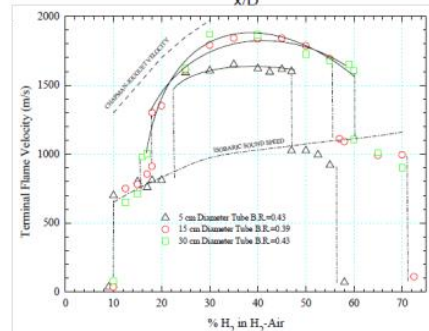
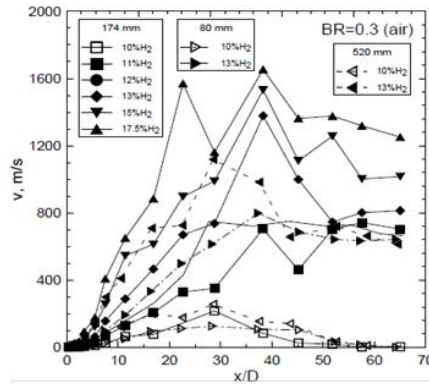
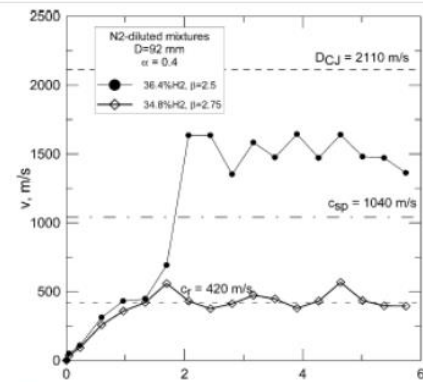
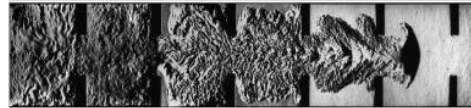
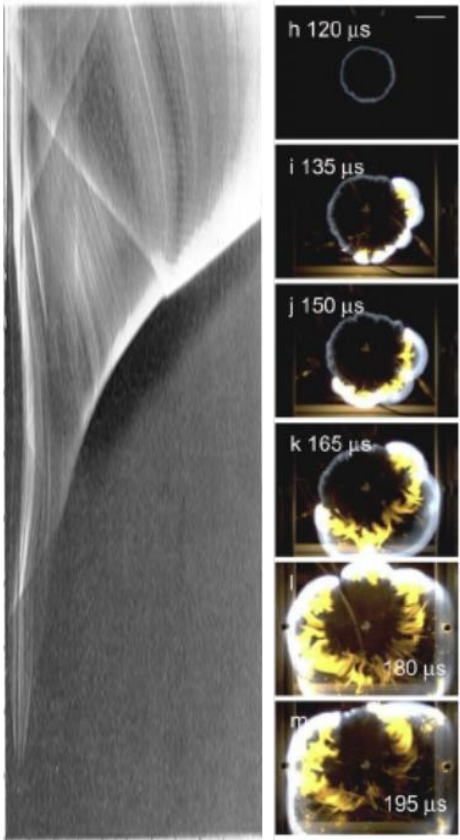
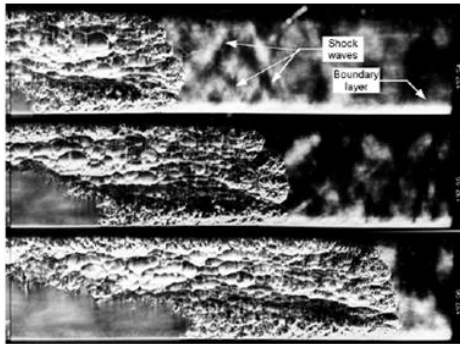


Opportunities for turbulence flows modeling via classical Euler-Lagrange scheme



Evolution of axial integral scale Λ_{zz} with variation in crank angle on the compression stroke. Dashed line – experimental curve [Breuer S. et. al. // Flow, Turbulence and Combustion, 2005]. Solid line – calculations via CPM approach [E.N. Ivanov, M.F. Ivanov // Math. Model., 2010]. Stroke frequency – 2000 rpm.

Введение

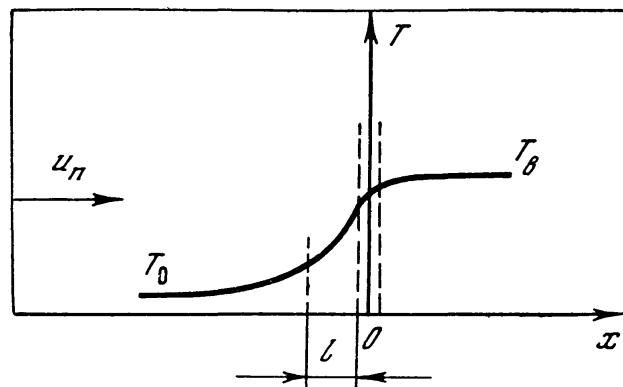


Дефлаграционные и диффузионные пламена

Дефлаграционное пламя

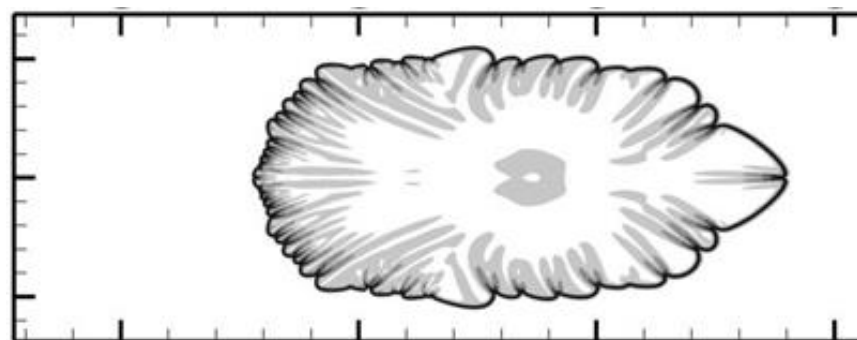
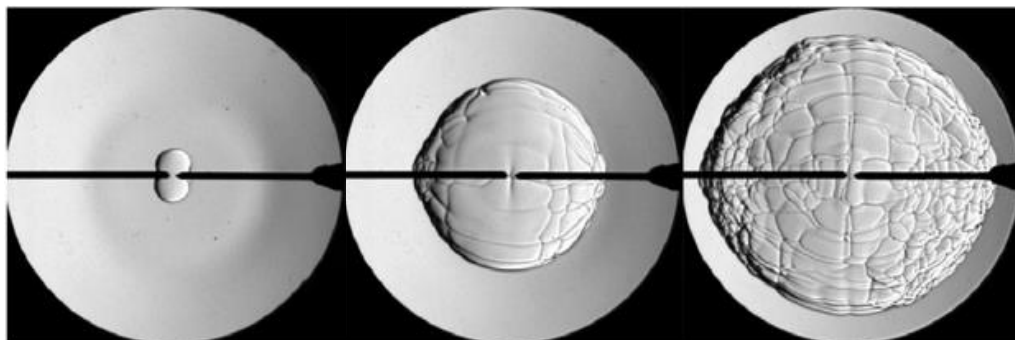
Основными механизмами распространения классической дефлаграционной волны горения являются перенос тепла и активных радикалов из зоны горения к предпламенной зоне.

Я.Б. Зельдович «Математическая теория горения и детонации», М.: Наука, 1980.



$$T = T_0 + (T_b - T_0) e^{u_n x / l}$$

Распределение температуры на фронте горения. l – ширина предпламенной зоны, зона реакции выделена штриховыми линиями, $x < 0$ несгоревшая смесь, $x > 0$ продукты горения



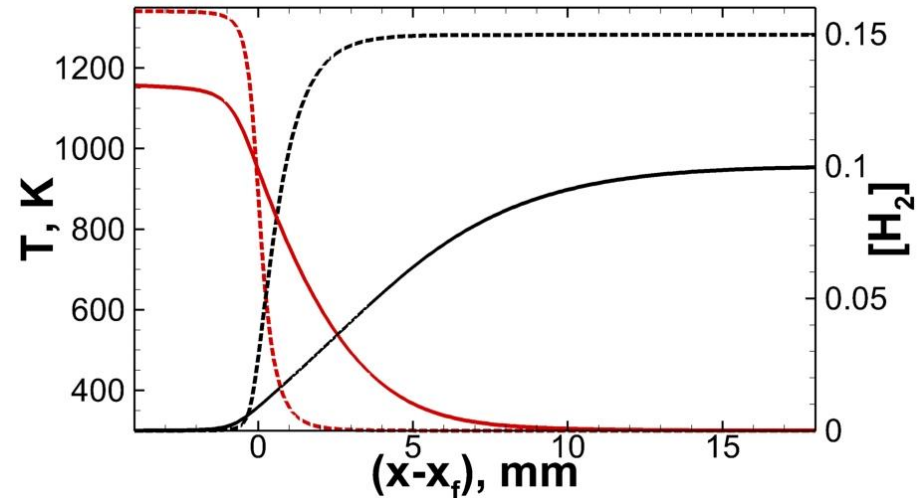
Дефлаграционные и диффузионные пламена

Диффузионное горение

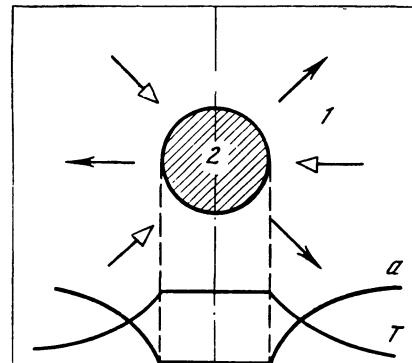
В случае избытка окислителя легкий водород диффундирует в зону горения устойчивого сферического очага горения – «шарика» пламени.

В условиях микрогравитации весь доступный водород сгорает в локализованном очаге горения.

$$T_1^0 = T_0 + (T_b' - T_0) r_0 / r, \quad T_2^0 = T_b'$$
$$a_1^0 = a_0 (1 - (r_0 / r)), \quad a_2^0 = 0.$$



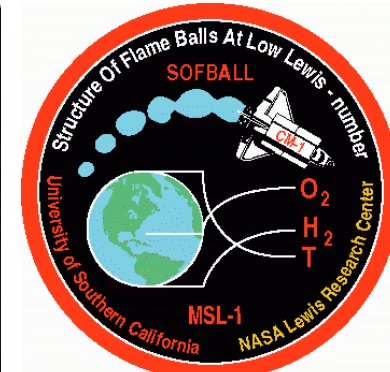
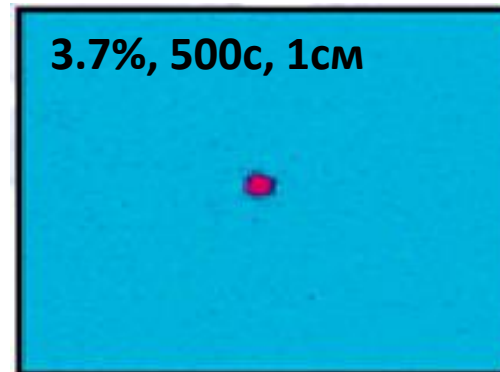
Я.Б. Зельдович
«Математическая теория
горения и детонации», М.:
Наука, 1980.



Р и с. 4.18

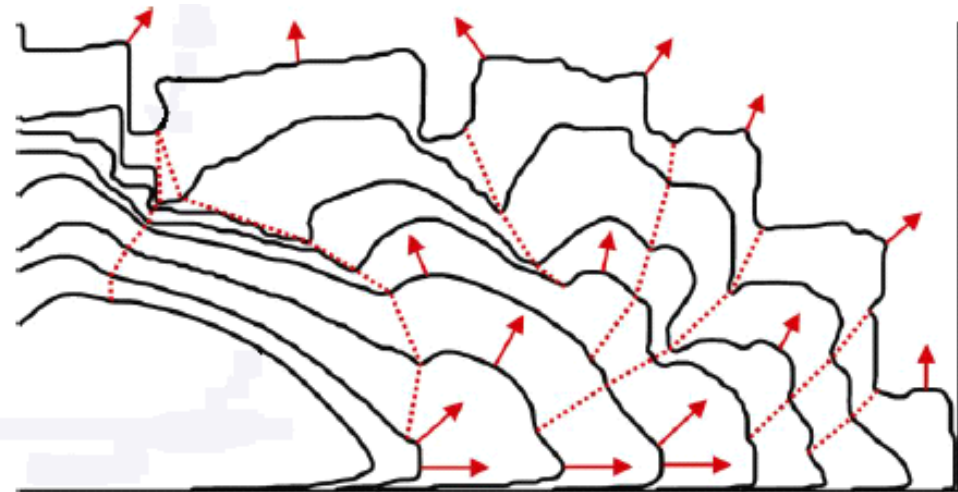
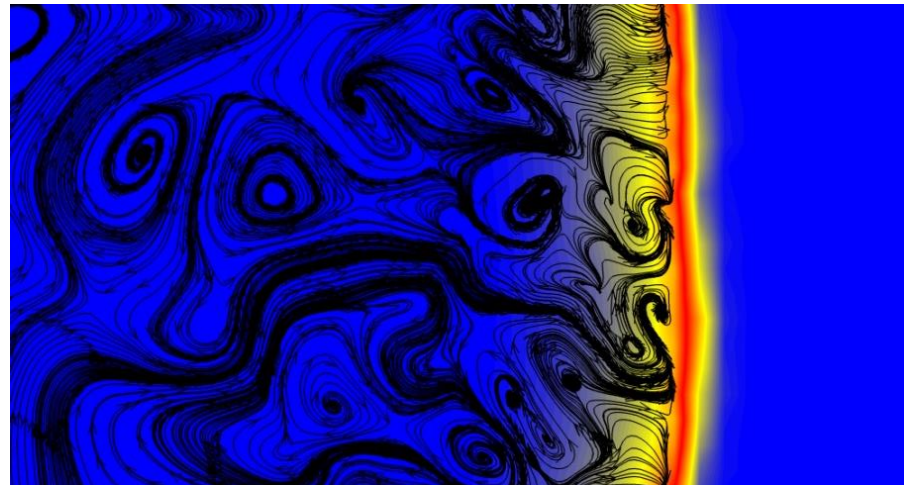
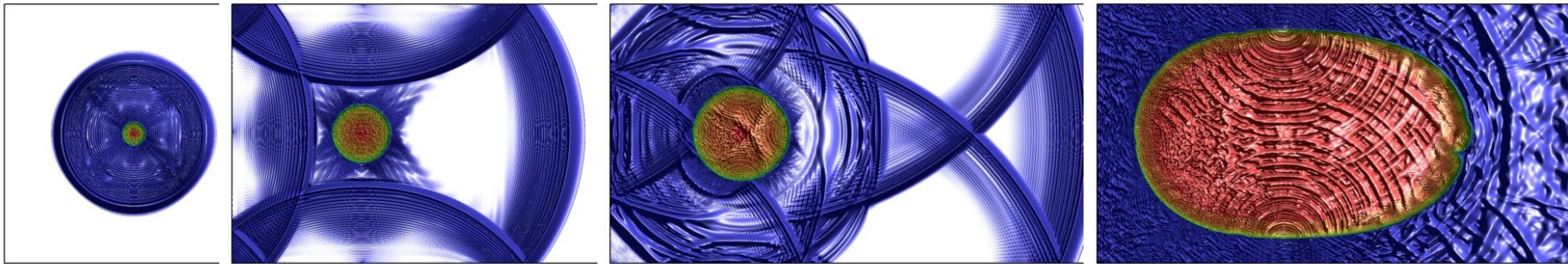
Неподвижный относительно горючей смеси шарик, на поверхности которого происходит сгорание по диффузионному механизму. Белые стрелки показывают подвод горючих веществ, черные стрелки — отвод тепла и продуктов сгорания. Внизу показаны распределения температуры и концентрации в радиальном направлении.

Ronney P.D. et. al. NASA Lewis Research Center, 1997

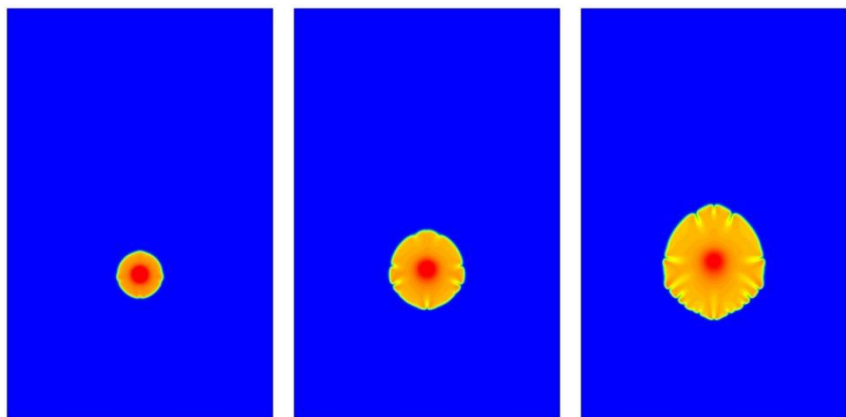


Дефлаграционное горение внутри камеры заполненной предварительно перемешанной горючей смесью

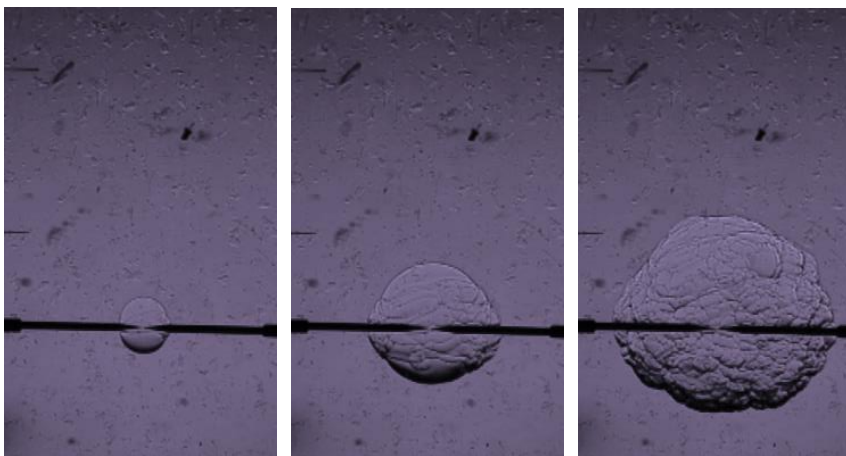
Взаимодействие между фронтом горения и акустическими полями, формируемыми в результате расширения продуктов горения является одним из важнейших механизмов определяющих структуру фронта горения и скорость его распространения



Дефлаграционное горение внутри камеры заполненной предварительно перемешанной горючей смесью



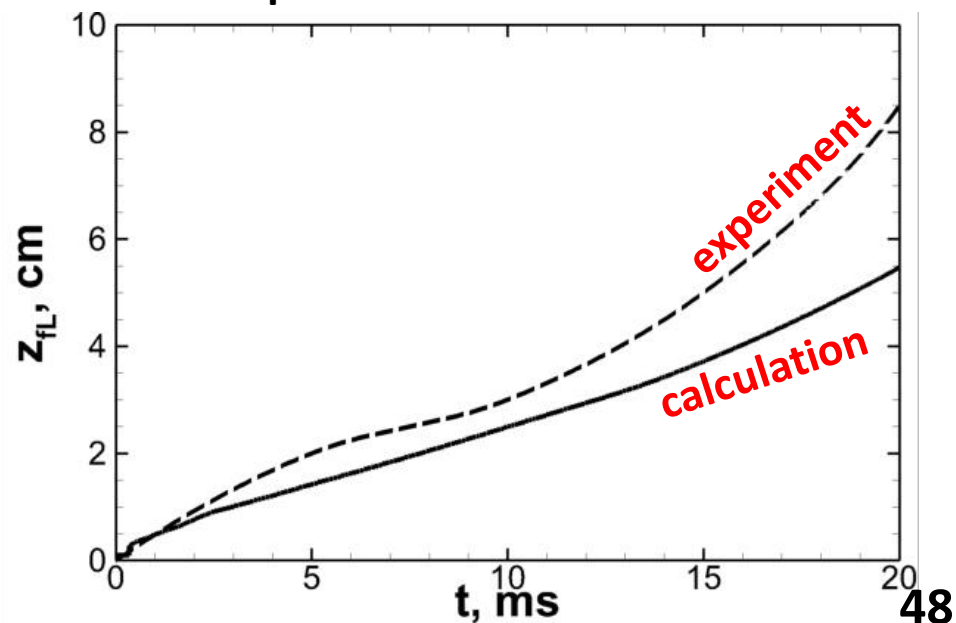
Расчеты ОИВТ РАН (16% H_2 - Воздух), 2015.



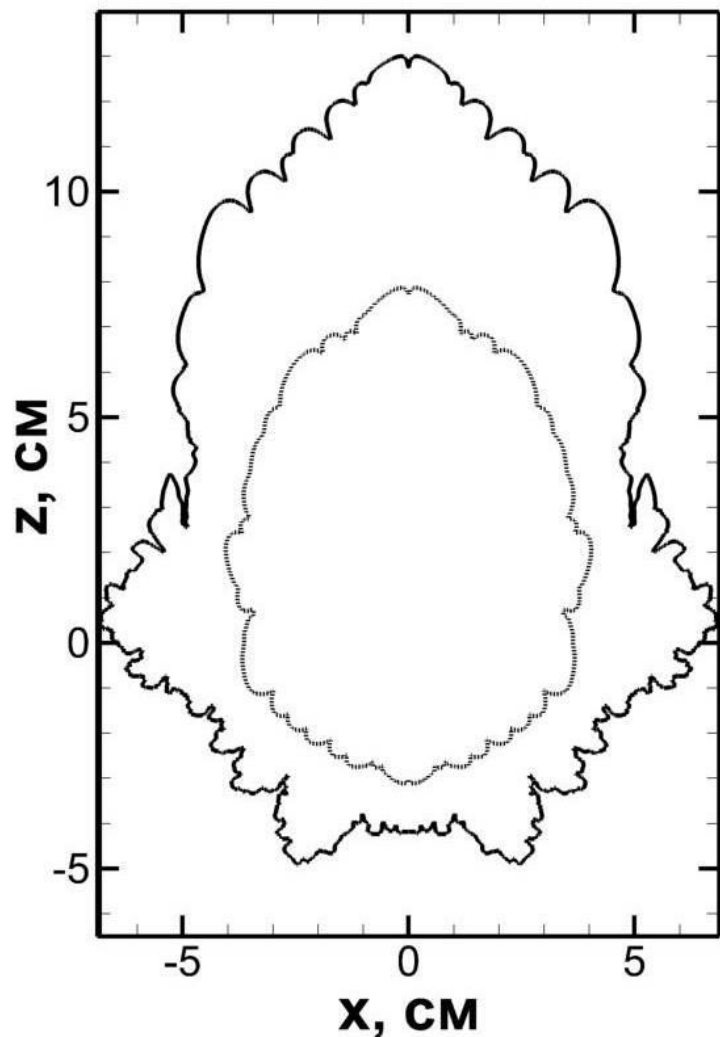
Эксперимент (16% H_2 - Воздух), 2015.

Использование классической вычислительной методики для решения уравнений динамики реагирующих потоков приводит к занижению интенсивности процесса развития пламени по достижению пламенем стенок канала.

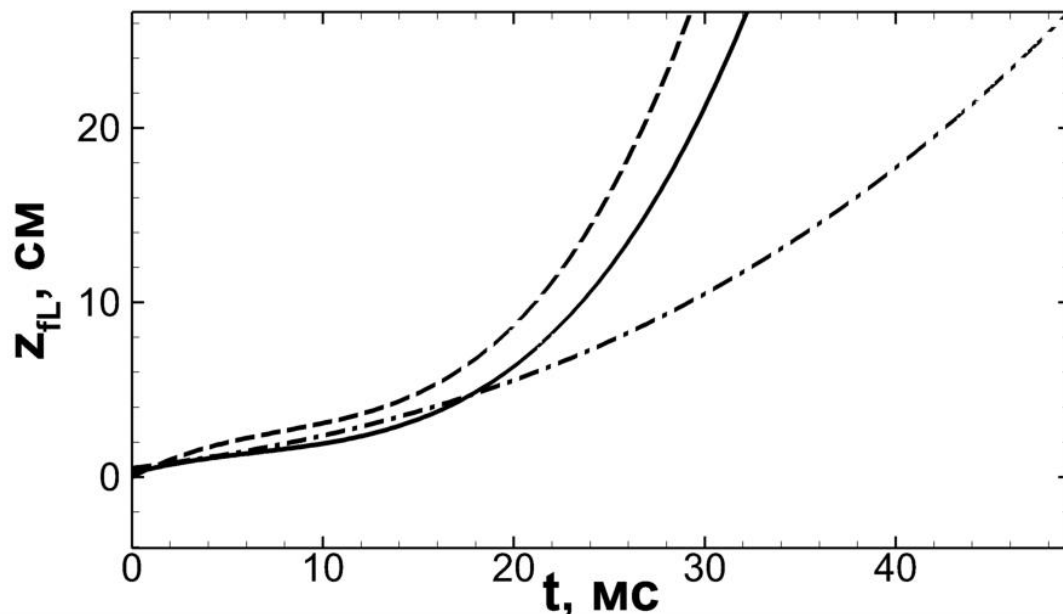
Причиной этому является недостаточная точность воспроизведения акустических колебаний формируемых между пламенем и стенками камеры.



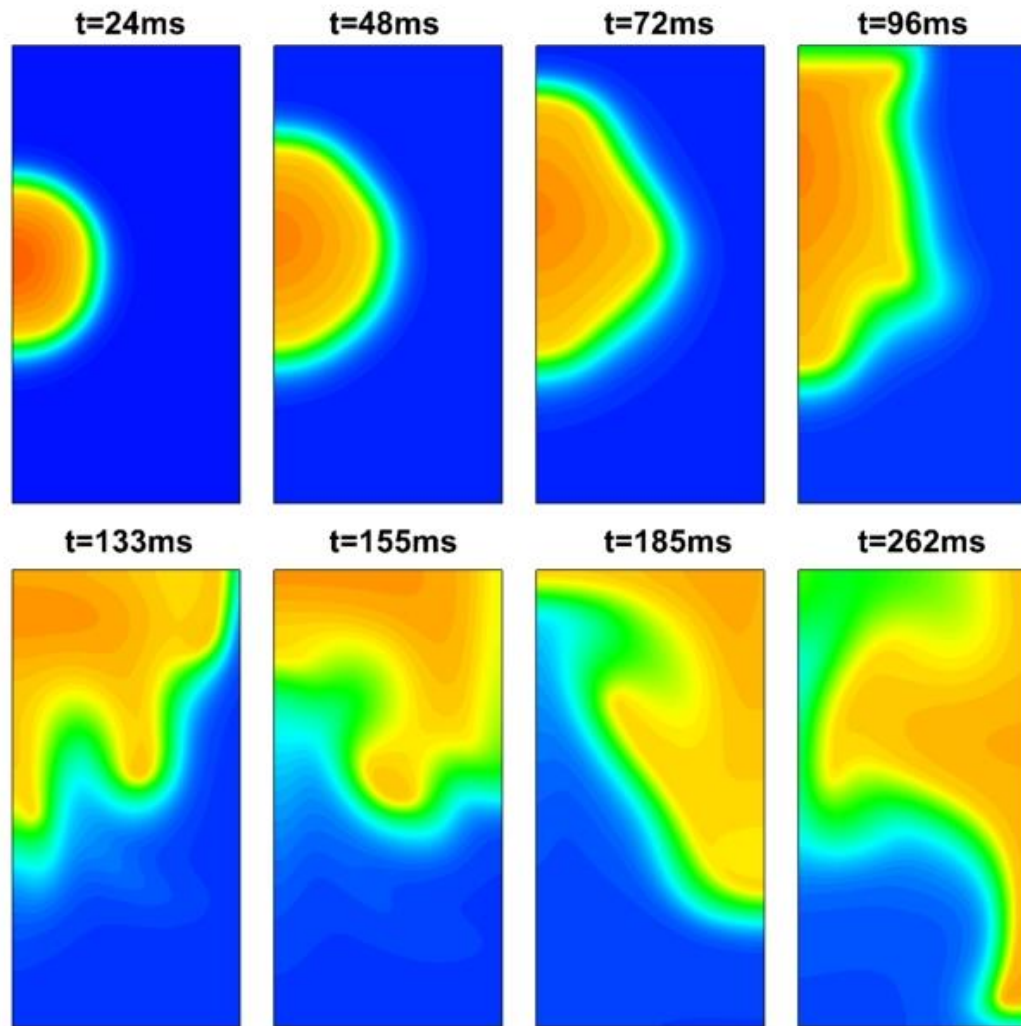
Deflagration inside closed vessel filled with premixed combustible mixture



Расчеты с учетом поглощения импульса акустических волн при взаимодействии со стенками канала позволило получить деформацию спектра пульсаций давления, что привело к более интенсивному росту мелкомасштабных структур на поверхности пламени и ускорению его движения к стенкам в целом.



Горение бедных составов в замкнутых объемах в условиях нормальной гравитации

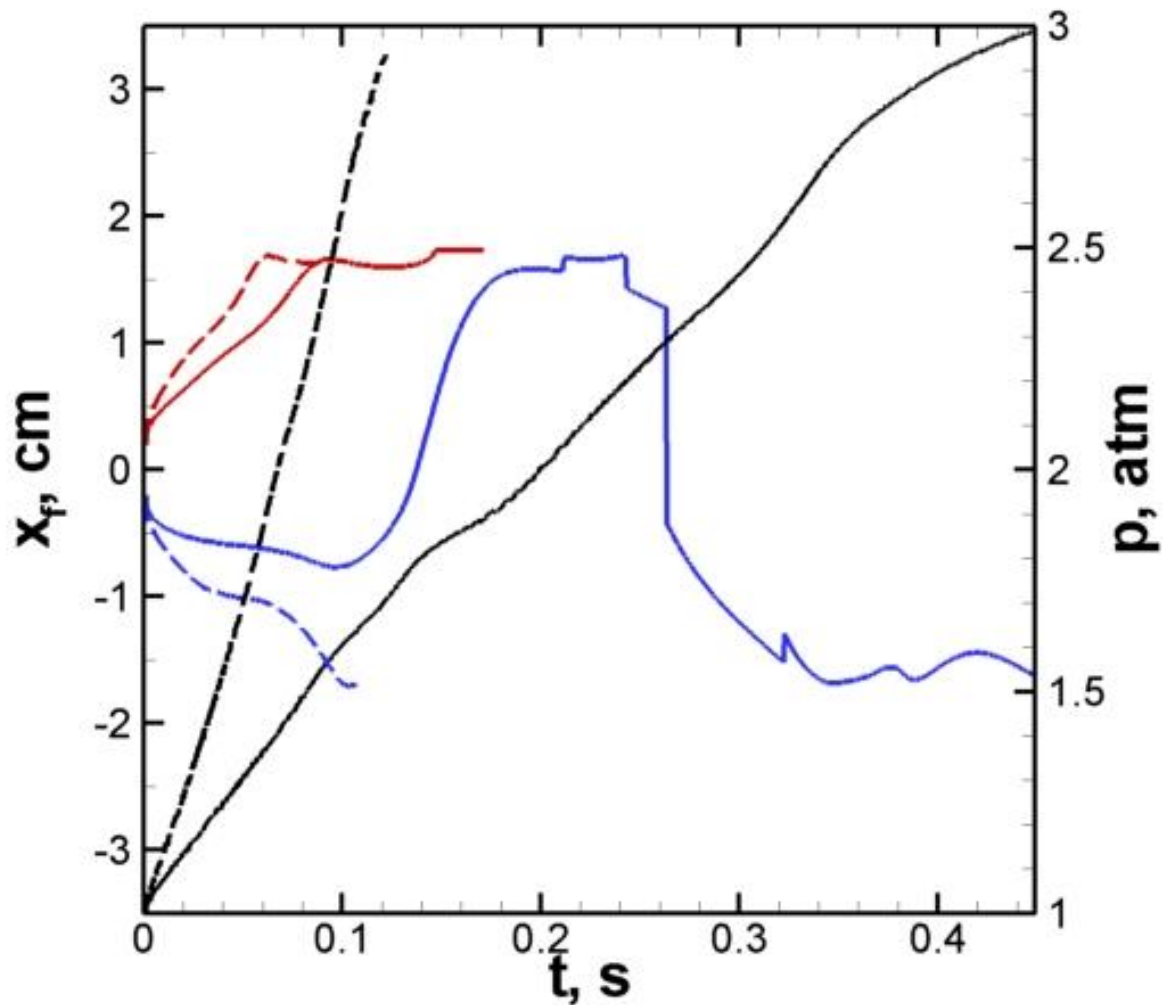
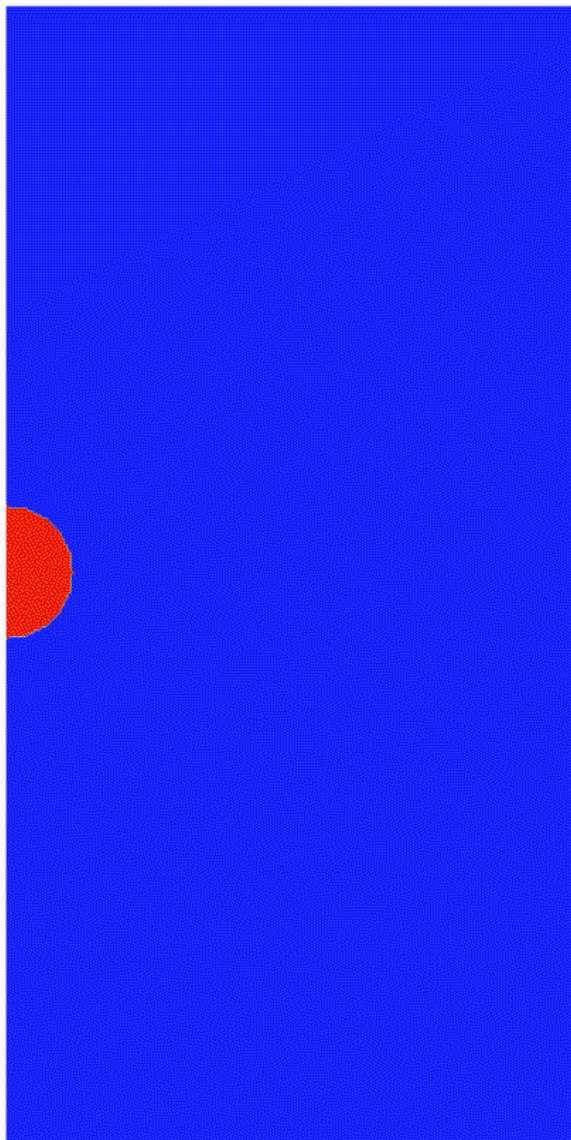


Rectangular volume filled with 8% H₂-Air mixture .

Стадии медленного горения в замкнутых объемах

- Изотропное расширение пламени Isotropic flame expansion;
- Подъем пламени в гравитационном поле и стратификация Flame rising in gravitational field and stratification;
- Развитие термодиффузионной неустойчивости и неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на поверхности пламени;
- Взаимодействие с волнами сжатия отраженными от стенок объема;
- Догорание вниз;
- Догорание обедненных областей.

Горение бедных составов в замкнутых объемах в условиях нормальной гравитации



Структуры течения, формируемые ускоряющимся пламенем:

Сжатие свежей смеси

Silvestrini et. al. // JLP, 2008

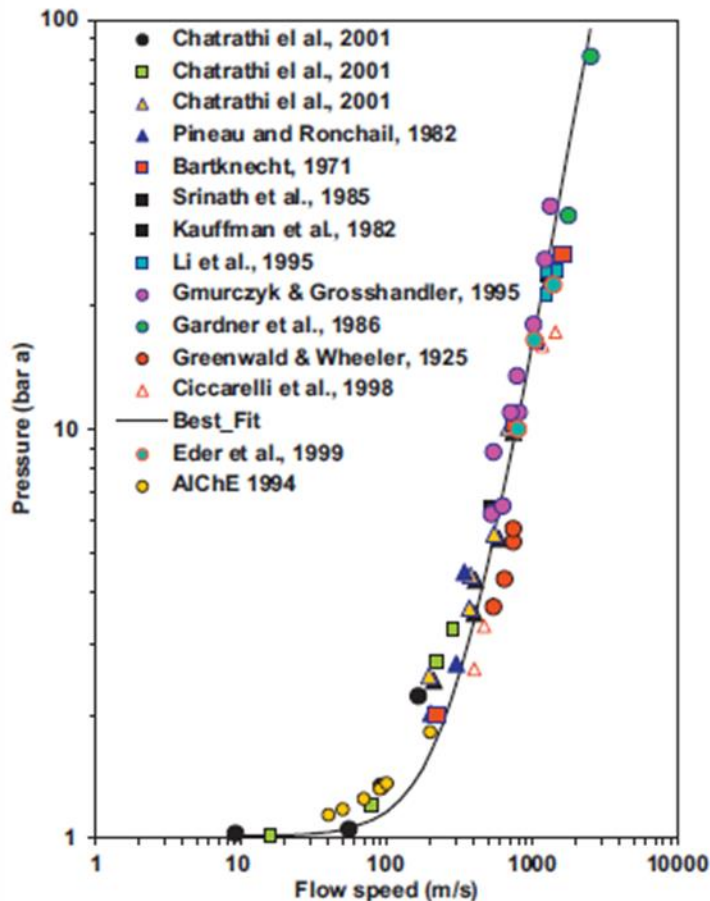
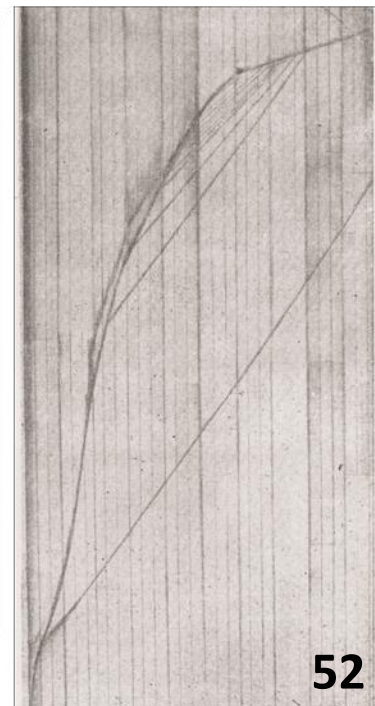
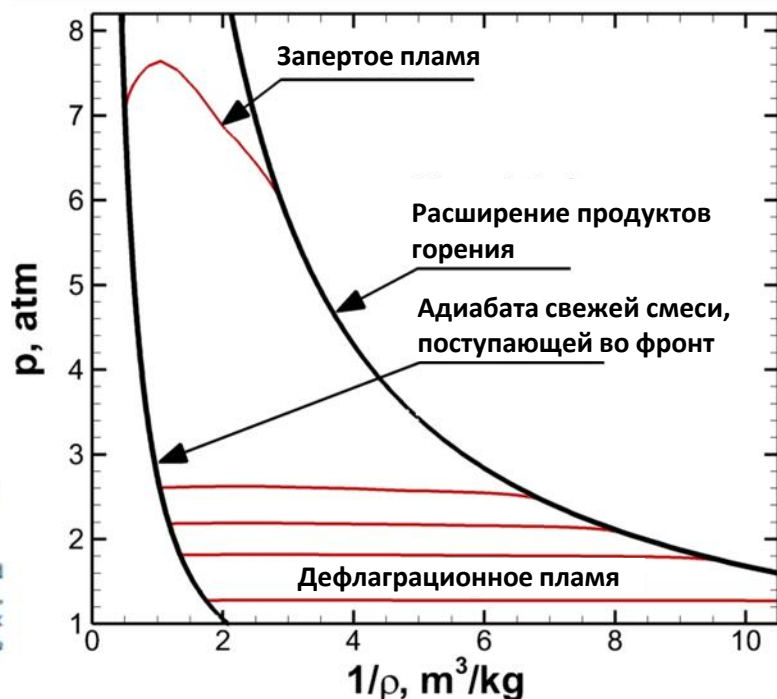


Fig. 4. Correlation between flow speed and pressure build-up inside elongated enclosures (e.g. tubes and galleries) for gas-air and dust-air mixtures. (AIChE, 1994; Eder, Gerlach, & Mayinger, 1999; Gardner, Winter, & Moore, 1986; Gmurczyk & Grosshandler, 1995; Greenwald & Wheeler, 1925; Kauffman et al.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

Свежая смесь сжимается в результате воздействия серии волн сжатия излучаемых движущимся источником энергии (фронтом горения). Характер сжатия соответствует условиям на адиабате Гюгонио.



Два механизма сжатия смеси при распространении пламени

- Продукты горения расширяются в замкнутом объеме и толкают газ вперед по каналу. Именно этот процесс определяет ускорение пламени на начальных стадиях процесса.
- Энергия, выделяемая в зоне реакции передается акустическими волнами свежей смеси.

Распространяющаяся пламя
 \updownarrow
 движущийся источник энергии



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

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

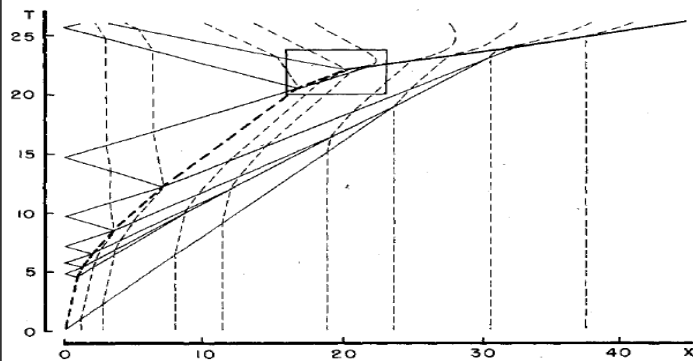
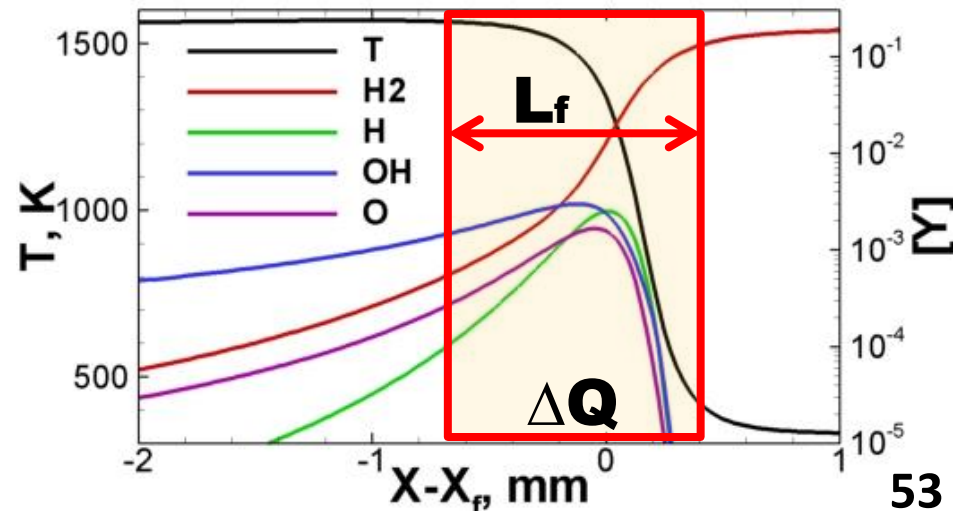


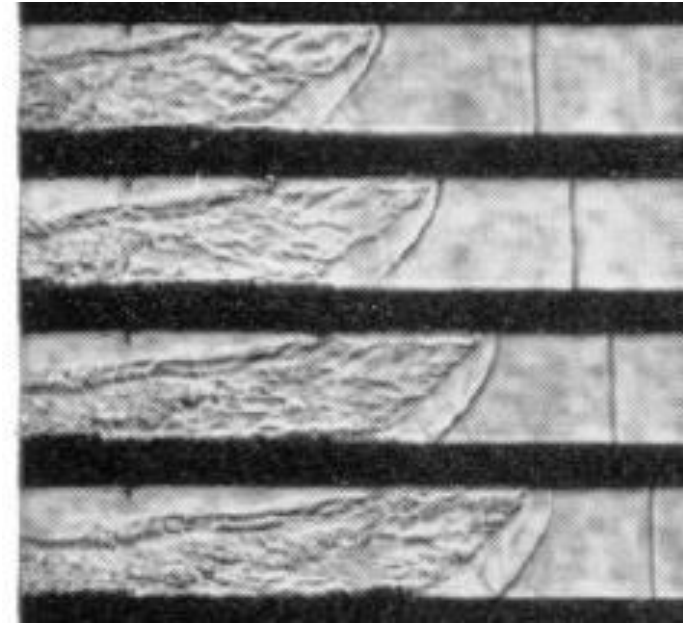
Fig. 7 Wave diagram of unstable solution obtained in the case of supercritical burning speed increment.



Два механизма сжатия смеси при распространении пламени

- Продукты горения расширяются в замкнутом объеме и толкают газ вперед по каналу. Именно этот процесс определяет ускорение пламени на начальных стадиях процесса.
- Энергия, выделяемая в зоне реакции передается акустическими волнами свежей смеси.

Распространяющаяся пламя
⇕
движущийся источник энергии



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

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

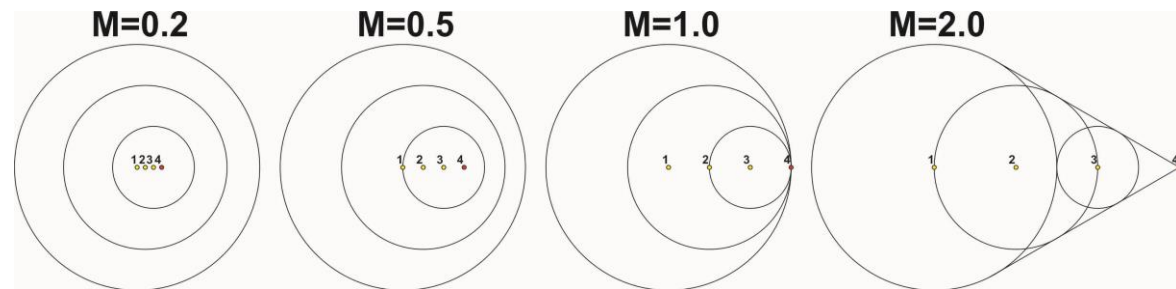
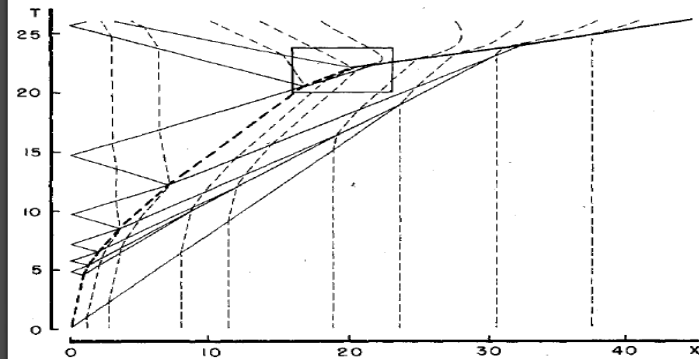
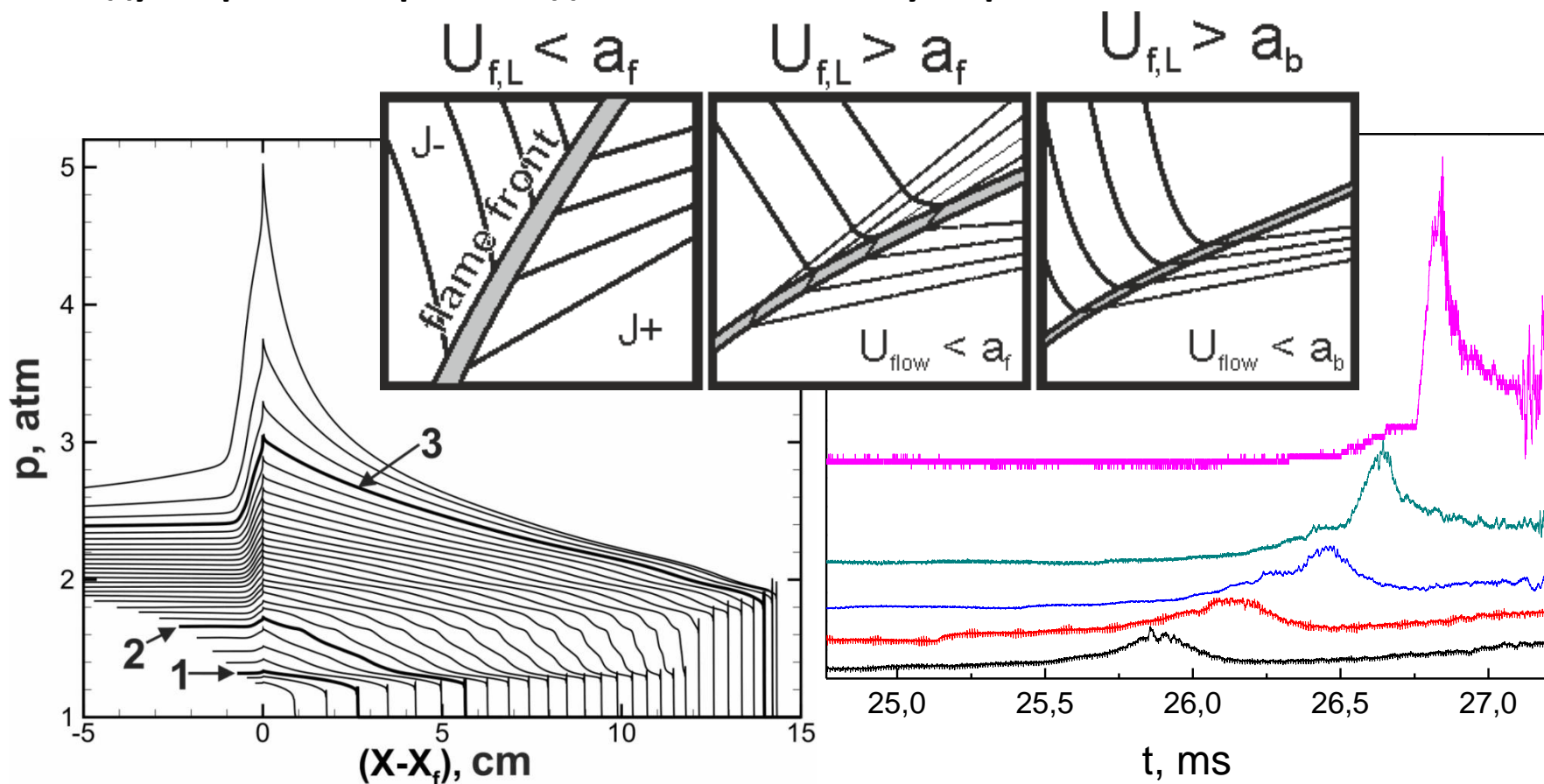


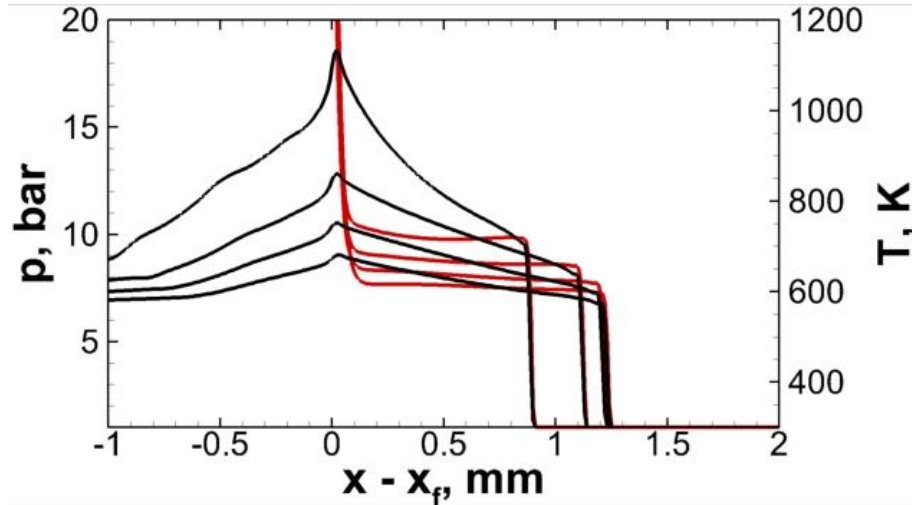
Fig. 7 Wave diagram of unstable solution obtained in the case of supercritical burning speed increment.

Структура пламени на финальной стадии ускорения

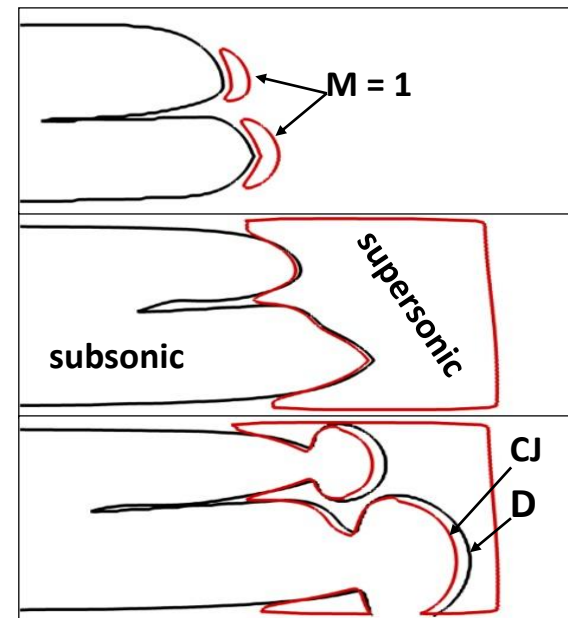
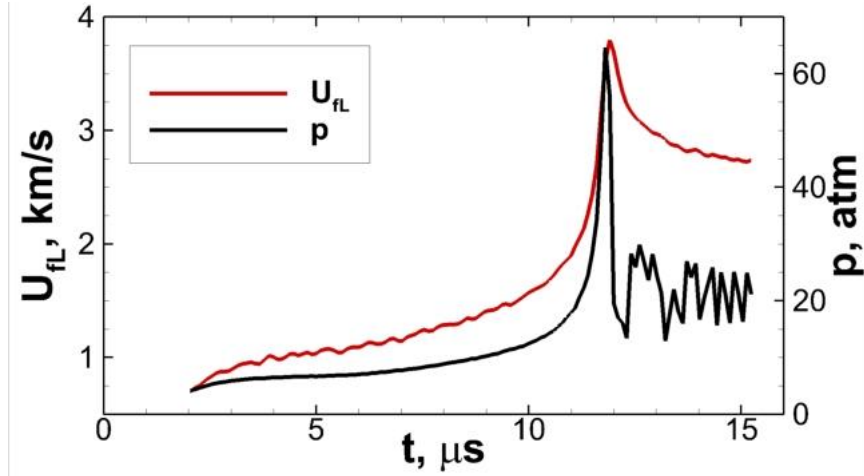
Когда пламя достигает локальной скорости звука, волны излучаемые зоной энерговыделения оказываются запертыми сверхзвуковым потоком. Это определяет непрерывное сжатие в зоне реакции. В случае положительной обратной связи между скоростью горения и давлением, пламя ускоряется.



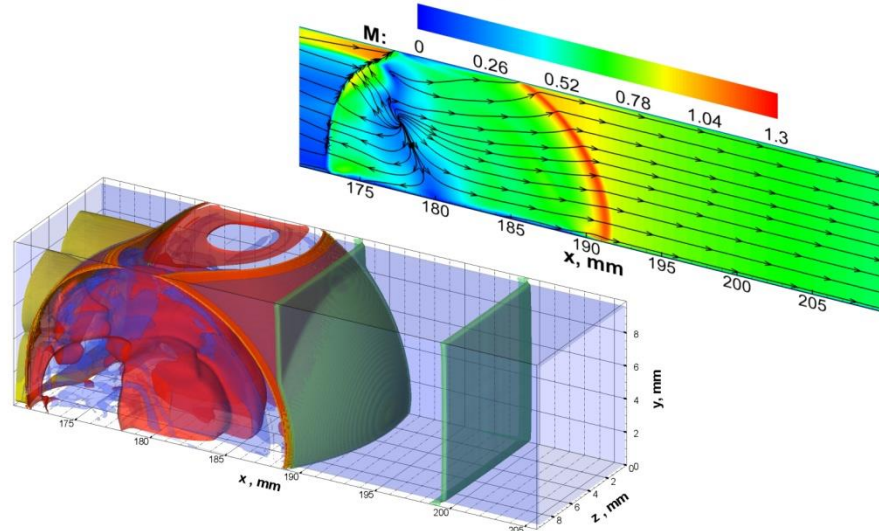
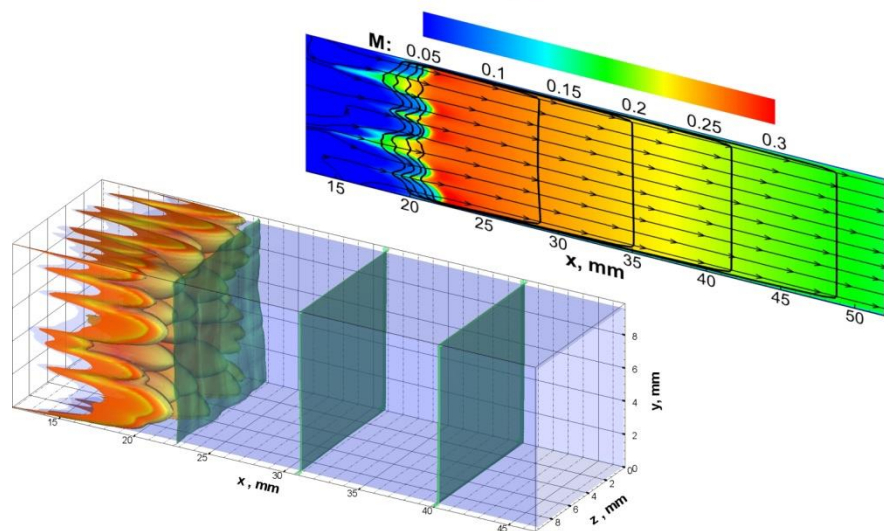
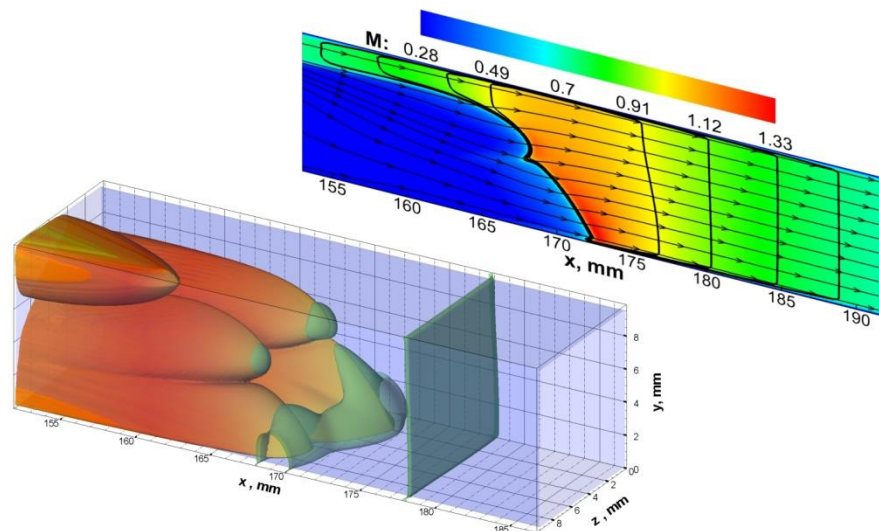
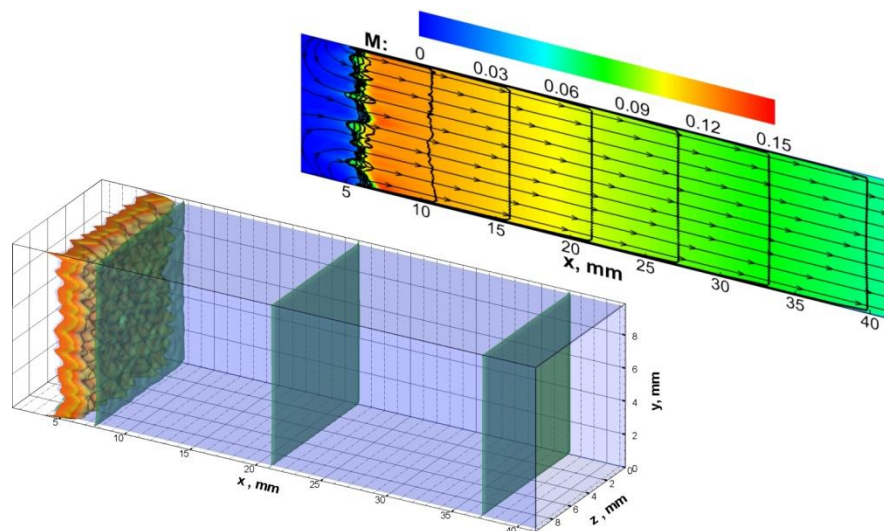
Переход к детонации в результате роста скорости горения с давлением



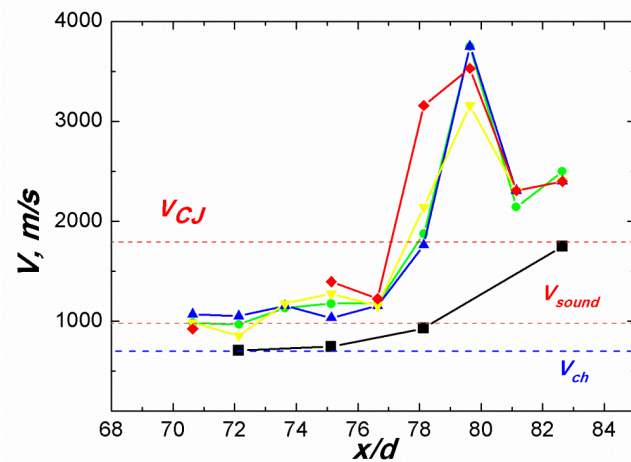
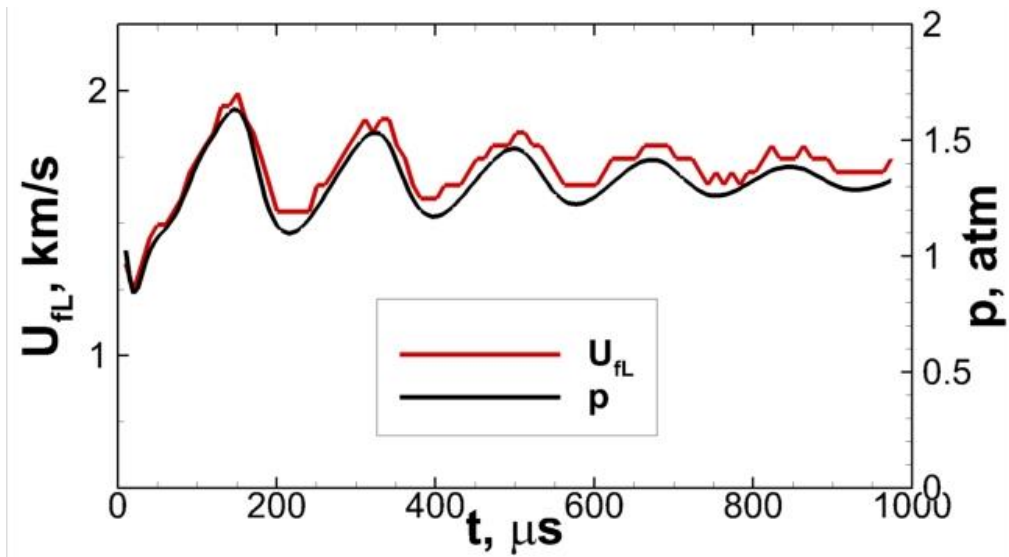
Непрерывное сжатие и ускорение реакций во фронте горения приводит к формированию ударной волны на масштабах фронта горения. Взаимодействие между фронтом и ударной волной ведет к формированию детонации [Ivanov M.F. et. al.// DAN, 2010]



Переход к детонации в результате роста скорости горения с давлением



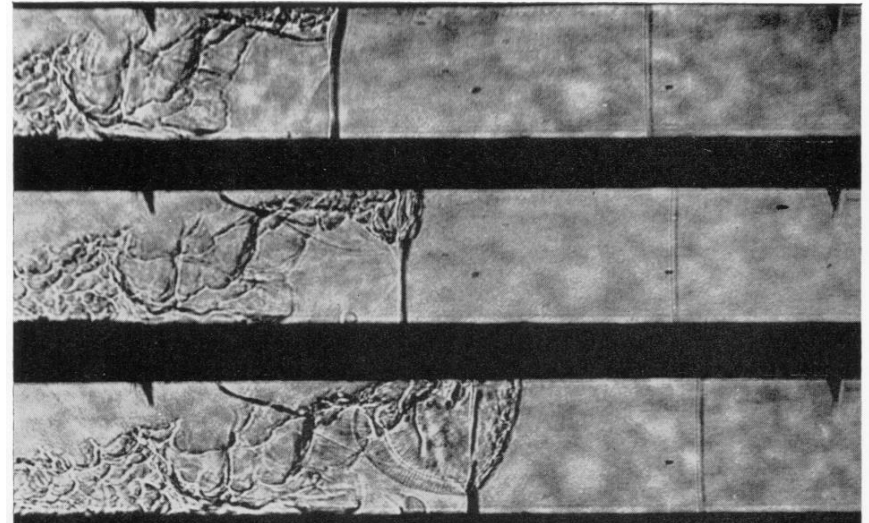
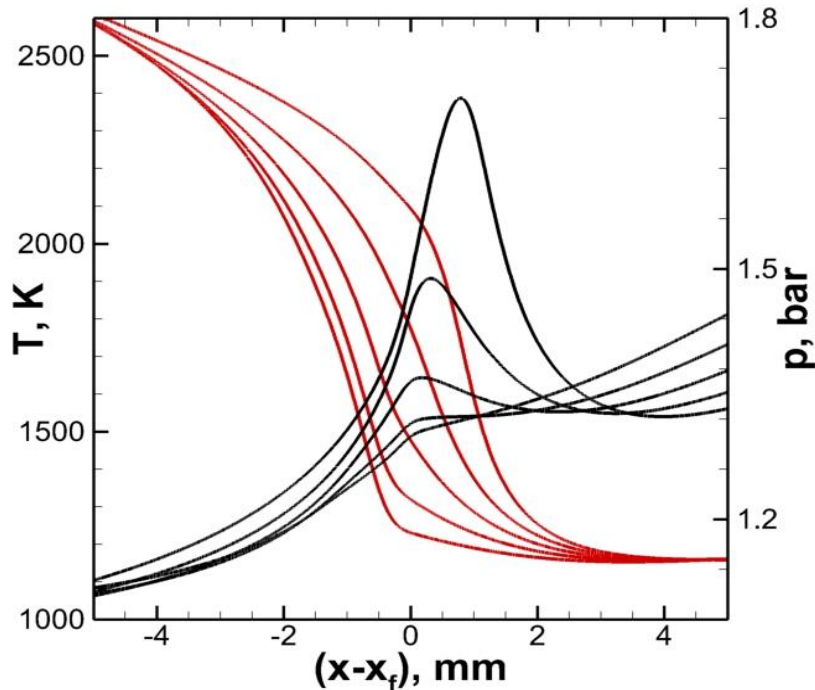
Квази-стационарное высокоскоростное пламя



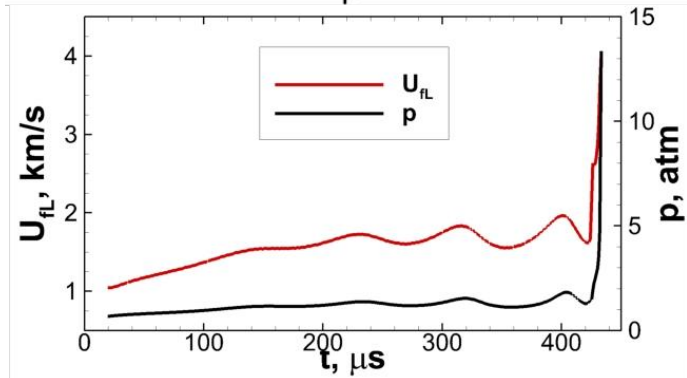
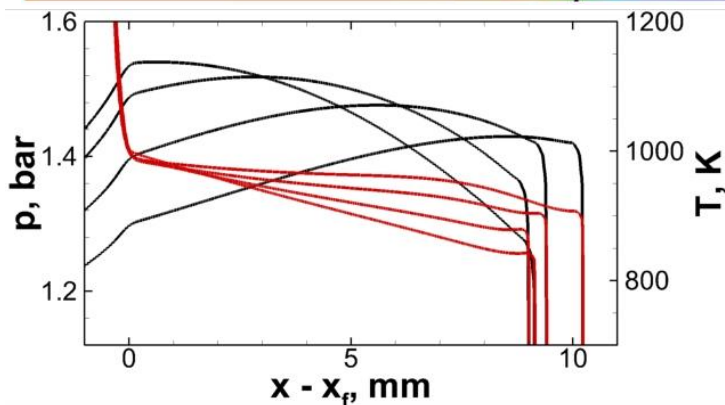
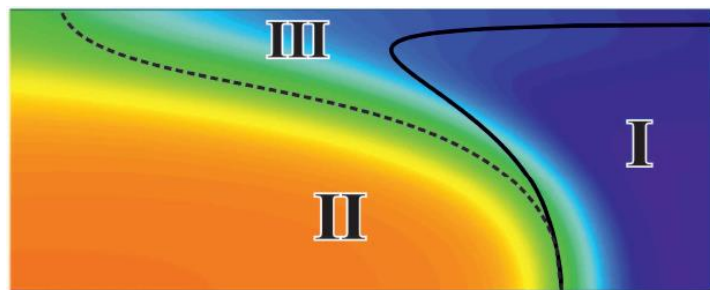
Механизм формирования детонации

Влияние химической кинетики на структуру запертого пламени

При высоких скоростях сжатия (или при продолжительном сжатии) температура смеси может достигнуть предельного значения, которое определяет переход от реакций ветвления цепей к реакциям обрыва цепей. При этом начинают развиваться экзотермические реакции что влияет на скорость горения в предпламенной зоне. В конце концов, в предпламенной зоне может зародиться очаг вторичного воспламенения.



Механизм формирования детонации в «горячих точках»



Если реализуется квази-стационарный режим распространения пламени, тогда волны сжатия отстающие от фронта горения могут нагнать его на стадии торможения пламени. В результате пламя ускорится снова. Горячие газы внутри зоны III выталкиваются вперед, формируя комплекс состоящий из контактной поверхности и волны сжатия перед ней. Если условия перед фронтом горения соответствуют условиям выше температуры «кроссовера», тогда контактная поверхность перед фронтом может стать новым очагом горения

