



Oxygen-free combustion

- one of the latest ideas of V.E. Fortov

Alexander Eremin

JIHT RAS

21.01.2016 20:30

Рубрика: [Общество](#)

Физика и лирика Фортова

Президент РАН о реформе академии, Нобелевских премиях и своих экстремальных увлечениях



«... Жизнь так устроена, что сегодня ты сидишь в кресле министра, президента, а завтра ты никто. На этом многие ломаются. Всю жизнь карабкаться вверх, а потом грохнуться вниз. Чтобы подобный кульбит не стал трагедией, надо раз и навсегда решить для себя: наука для карьеры или карьера для науки.

Я хорошо знаю, чем займусь, когда мне придется уйти. Это, например, научная проблема "горения без кислорода", что должно серьезно помочь в решении проблемы глобального потепления. Ведь все тепловые машины прекратят выбрасывать в атмосферу углекислый газ. На выходе - только вода и безвредный порошок углерода.»

In an interview in honor of his 70th birthday, published in all media, Fortov said that when he resigns from the post of President of the Academy of Sciences and all other administrative posts, he would devote his research to oxygen-free combustion processes that allow energy to be obtained from hydrocarbon fuels without emitting carbon dioxide.

Outline

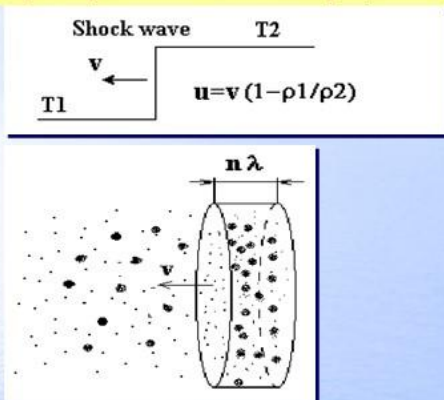
- *Zeldovich's idea (1979):*
“Nonequilibrium effects in the shock wave front”
- *Fortov's proposal (1992):*
“To run detonation by this effect”
- *Fortov's idea (2007):*
“Detonation wave of condensation”
- *Next Fortov's idea (2010):*
“Oxygen-free combustion – base for new energetics”

Особенности поступательной релаксации во фронте ударной волны в газовых смесях



Существо эффекта:

Во фронте ударной волны происходит увеличение вклада парных соударений молекул, имеющих большие относительные скорости



С.В. Куликов, 1994

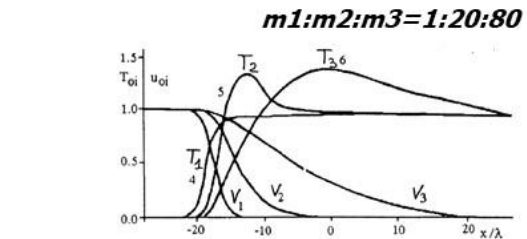


Figure 3: Profiles of relative velocities and temperatures of components for the mixture with number density ratio 1000:1:1.

Если энергии соударений во фронте E^* выше порогов реакций U , а тепловая энергия газа за волной $kT < U$, - можно ожидать неравновесные эффекты

Оптимальные условия:

- УВ в легком газе (высокие скорости при малой интенсивности)
- + малая примесь тяжелых реагирующих молекул (большие кин. энергии и малые пороги реакций)



Фортов (1992):
«А нельзя ли таким образом неравновесно запустить детонацию?»

«Суперстолкновения во фронте ударной волны»

(Доклад у Фортова в Мин Науки в 1997 году)

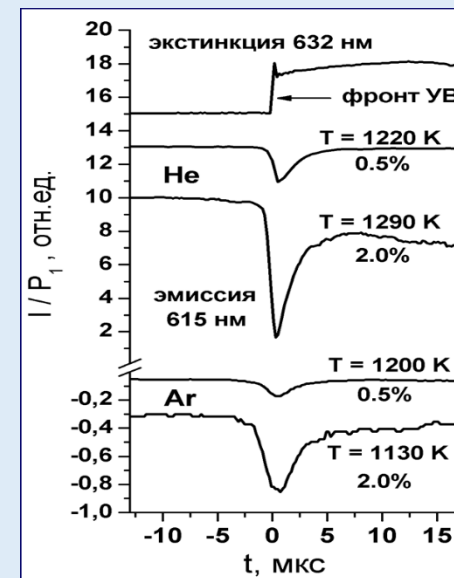


Mechanisms for supercollisions

David C. Clary, Robert G. Gilbert, Victor Bernshtein and Izhack Oref.
Faraday Discussions. Volume 102, 1995

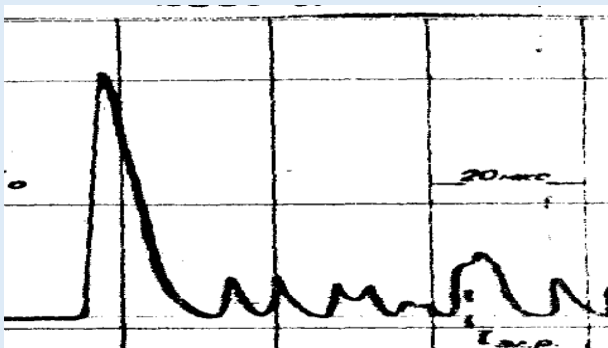
Effect of supercollisions on chemical reactions in the
gas phase V. Bernshtein and I. Oref *J. Phys. Chem.* **1993**, 97, 49,

0.5-2%Fe(CO)₅ + He/Ar, 2002

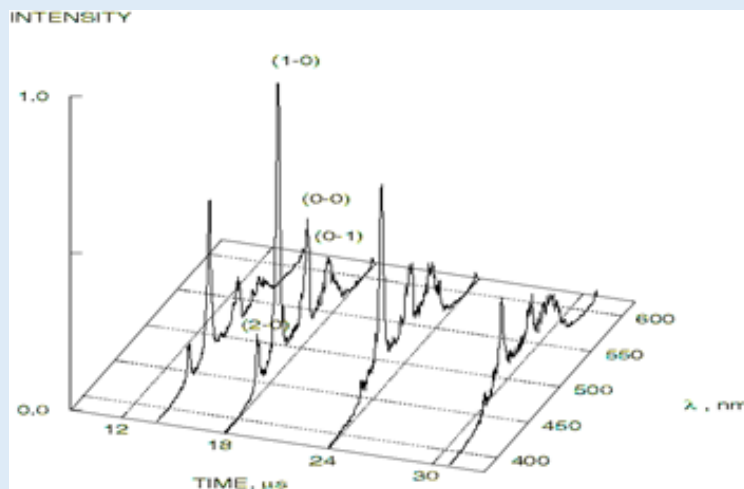


Генич А.П., Куликов С.В.,
Манелис Г.В. 1991

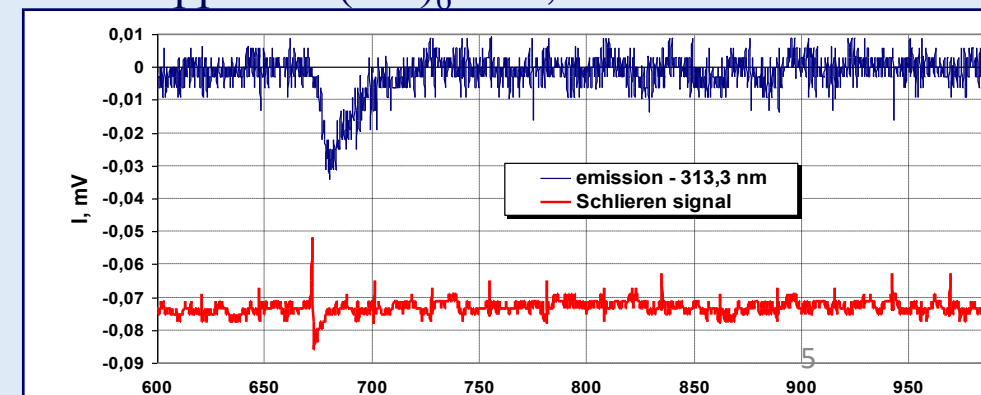
1%CS₂ +Kr,



0.61% C₃O₂ + Ar, 2001



70 ppm Mo(CO)₆ + Ar, 2003



Вероятности неупругих процессов при высокоэнергетичных соударениях



Общее выражение для эффективной константы скорости процесса

$$K_{eff} = \iint_{v_{ij(min)} = \sqrt{2E/\mu}}^{\infty} P_{eff} \sigma_{el} |v_{ij}| f(v_i) f(v_j) dv_i dv_j$$

Адиабатические переходы

$$P_{ad} \sim \exp(-\xi)$$

параметр Мессе $\xi = Eb/hv$

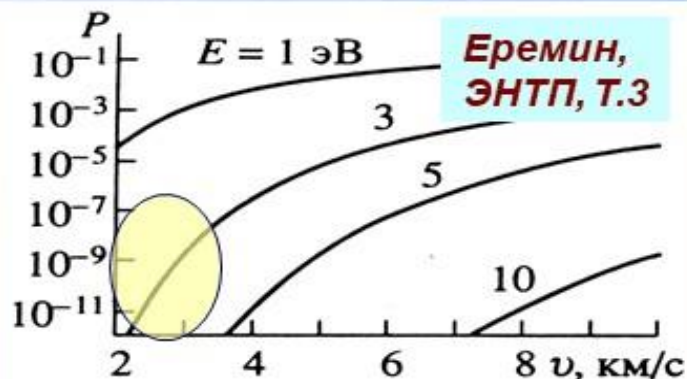
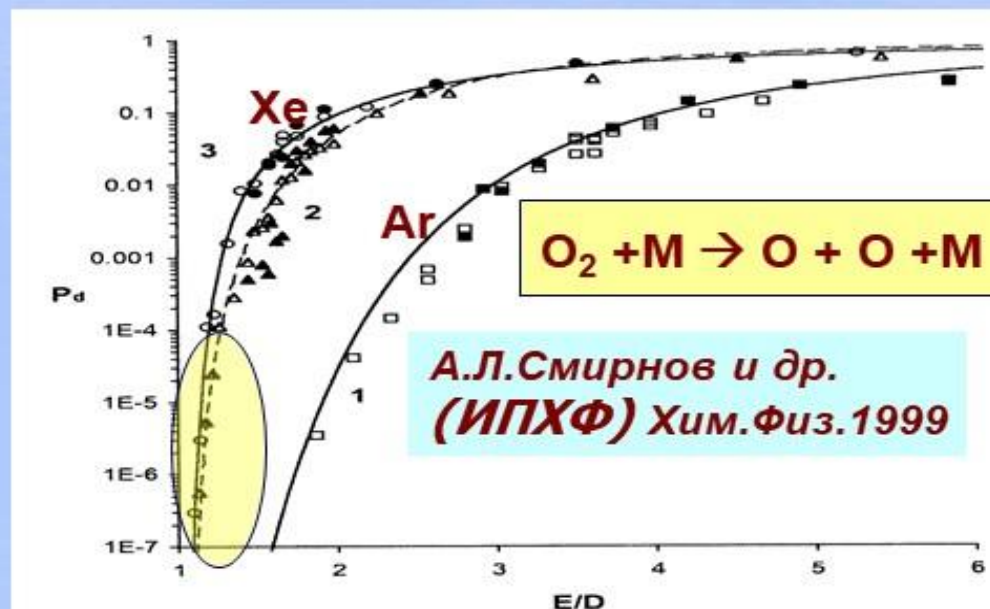


Рис. VI.3.6. Вероятности адиабатических переходов с передачей различной энергии E во внутренние степени свободы при высокоэнергетичных соударениях во фронте в зависимости от скорости УВ

Неадиабатические переходы («Суперстолкновения»)

Траекторные расчеты

$$P_{n-ad} = \langle \int \rho(E, J) dE dJ \rangle$$

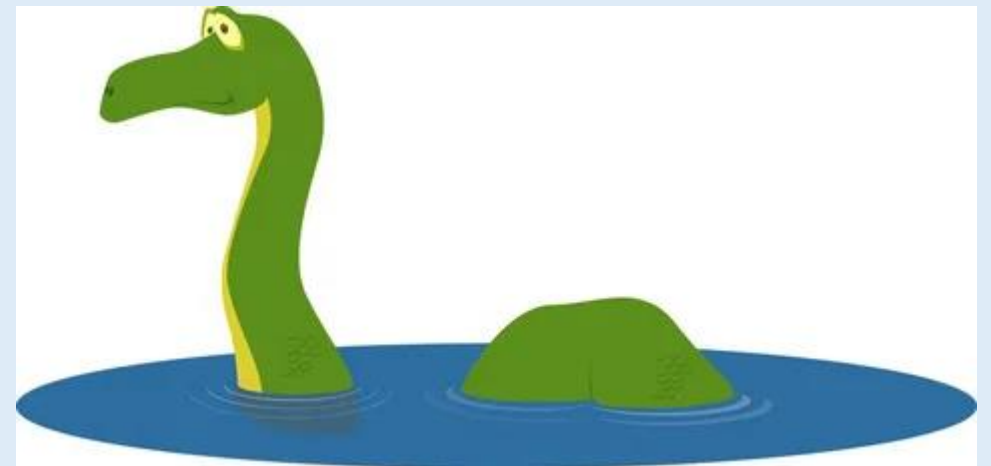




J. Troe

**Prof. Jürgen Troe, Göttingen University
(“Kinetic No1 in the world”) :**

***“Supercollisions –
it is Loch Ness monster”
(2004)***



Исследование роста кластеров в ударных волнах

Смеси:

CS_2 – сероуглерод

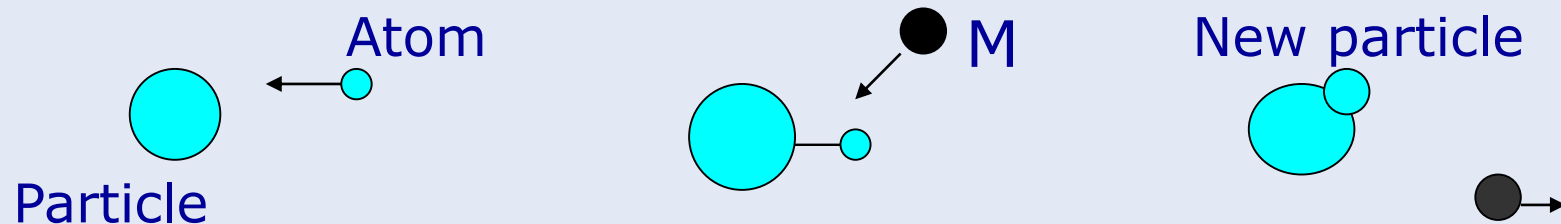
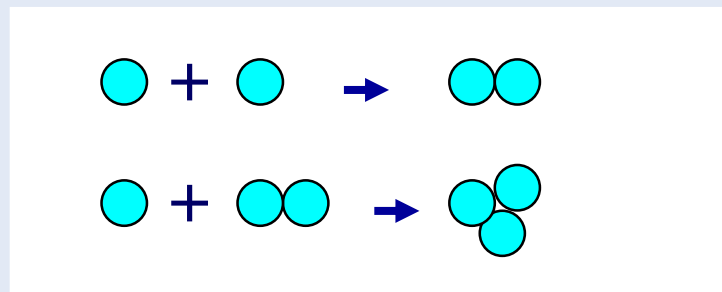
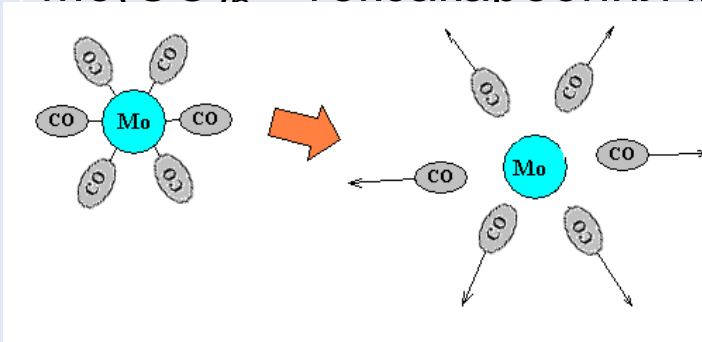
$\text{C}(\text{CO})_2$ – недоокись углерода

$\text{Fe}(\text{CO})_5$ – пентакарбонил железа

$\text{Mo}(\text{CO})_6$ – гексакарбонил молибдена



пересыщенный пар
S, C, Fe, Mo

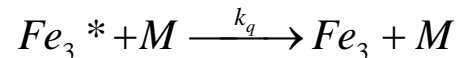
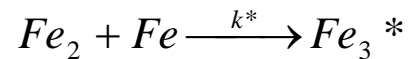
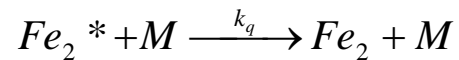
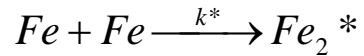
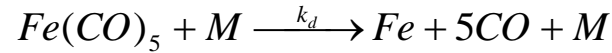


Анализ результатов

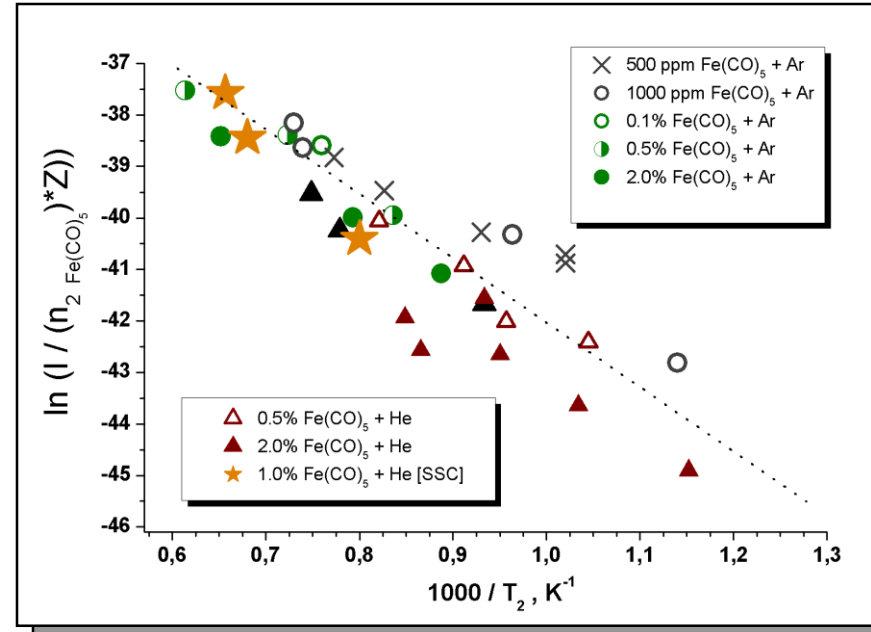
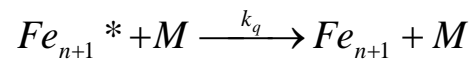
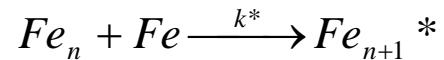


Рекомбинационный механизм возбуждения кластеров

Кинетическая модель процесса:



.....



Простейшее приближение $R^* = [Fe_2^*]$

$$\frac{d[Fe]}{dt} = k_d n_2 M - k^* [Fe]^2$$

$$\frac{dR^*}{dt} = k^* [Fe]^2 - k_q R^* M$$



$$R^*_{\max} \approx Z_i n_2$$

Зависимость наблюдаемой интенсивности излучения от температуры

$$n_2 = [Fe(CO)_5]_2$$

$$Z_i = \left(\frac{k_d}{k_q} \right)_i, \quad i = He, Ar$$

Доклад на семинаре Фортова в 2007 г:

«Экзотермические процессы при образовании кластеров приводят к их электронному возбуждению на ранних стадиях роста и являются истинной причиной наблюдаемых пиков излучения»



Идея Фортова: (2007)



«Если быстрая конденсация пересыщенного пара за ударной волной столь экзотермический процесс – нельзя ли создать условия для возникновения детонационной волны, поддерживаемой энергией конденсации ?»

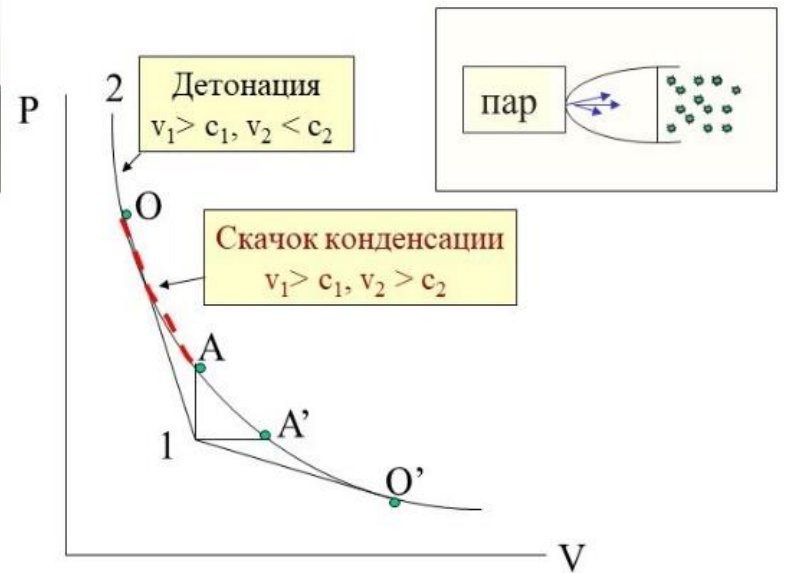
Детонационная волна конденсации

Возможно ли?

На первый взгляд ответ должен быть скорее всего отрицательный – в отличие от реакций воспламенения, процесс конденсации не ускоряется с ростом температуры, отсутствуют разветвленные цепные механизмы, а времена роста конденсированных частиц могут потребовать миллионы столкновений.



Конденсационный скачок Ландау



Детонационная волна конденсации

- Возможно!



Acad. V. Fortov



The statement of experiments:

Main idea:

Since shock wave must initiate the heat release process, the supersaturated vapor has to be formed right behind the shock wave

A bottle-neck of the whole process is the vapor formation rate, therefore the apparent rate of condensation exponentially increases with the temperature rise

“Chemical condensation”

Детонационная волна конденсации в недокиси углерода



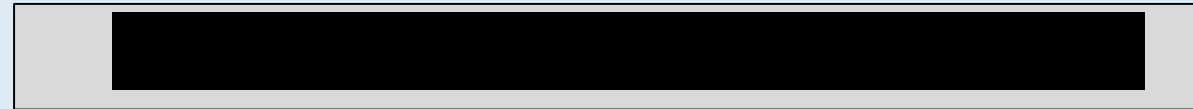
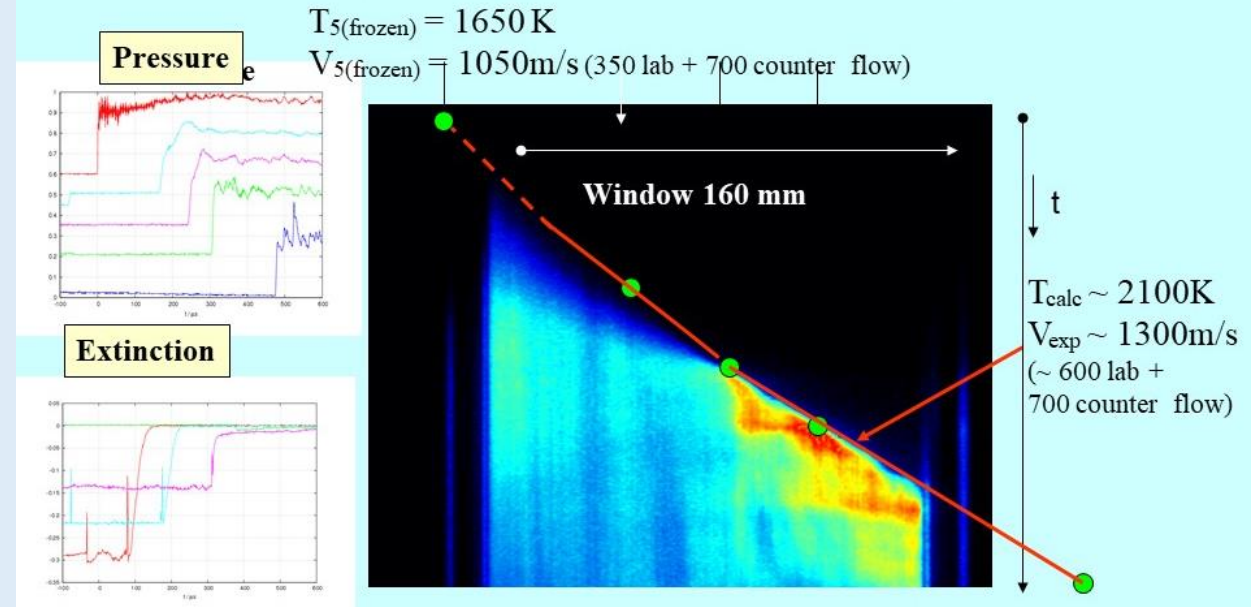
Formation of a detonation-like condensation wave

Emelianov, A; Eremin; Makeich, A; Fortov V.
JETP Letters 87, 470-473 JUL 2008

Detonation wave driven by condensation of supersaturated carbon vapor

Emelianov, A.; Eremin, A.; Fortov, V.; et al.
Physical Review E 79 MAR 2009

Acceleration of shock wave and formation of detonation-like regime in the mixture 10% C₃O₂ + Ar



Shock waves in the mixtures:

3 – 30% of carbon suboxide C₃O₂ (OC—C—CO) + Ar

At $T > 1400 \text{ K}$ fast decay: $T = 1200 - 2000 \text{ K}$, $P = 4 - 12 \text{ bar}$

$\text{C}_3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{C}$ (vapor with supersaturation $10^5 - 10^8$)

Детонационная волна конденсации в ацетилене



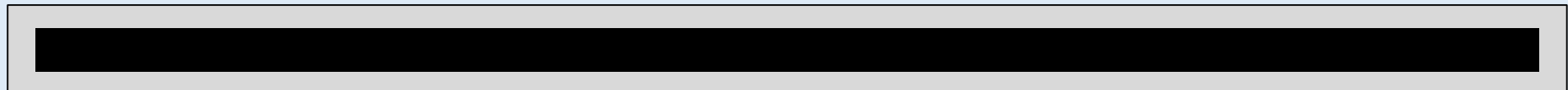
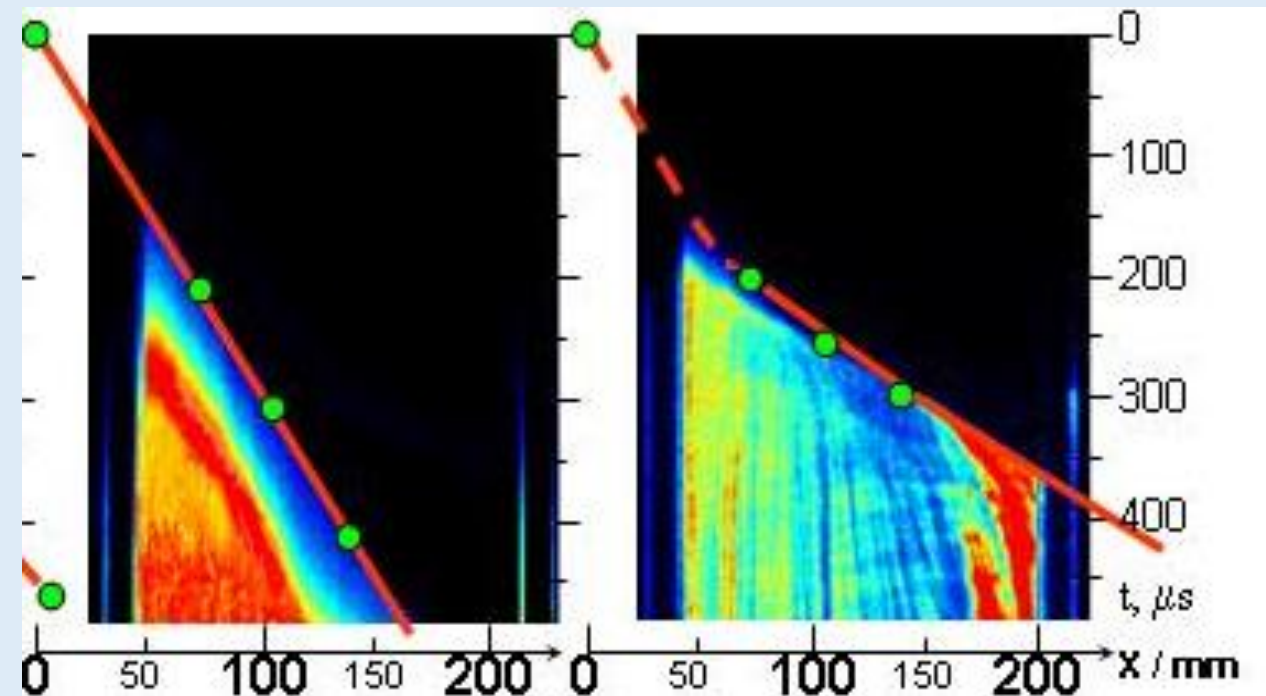
Formation of a detonation wave in the
thermal decomposition of acetylene

Emelianov, A.; Eremin, A.; Fortov, V.

JETP Letters 92 , 97-101 JUL 2010

20% C_2H_2 , 6 bar

20% C_2H_2 , 30 bar

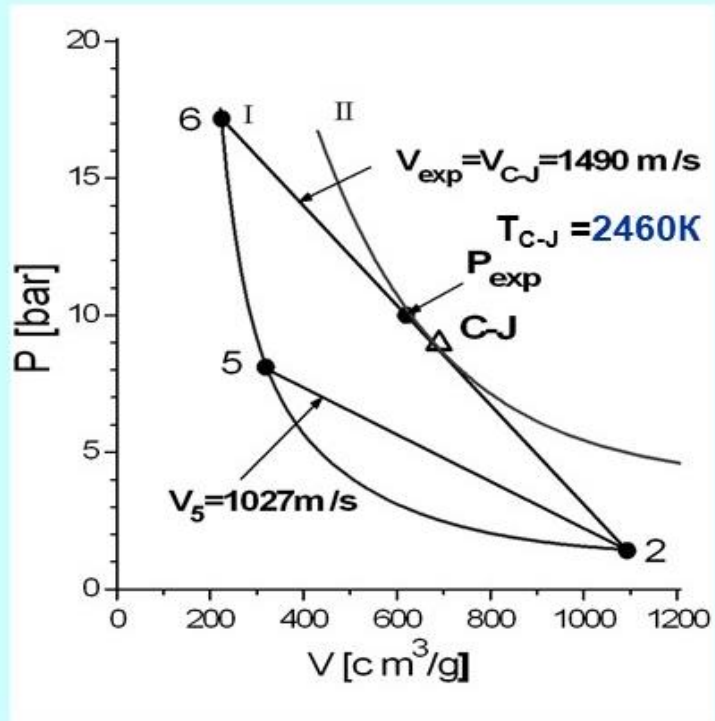


Детонационная волна конденсации

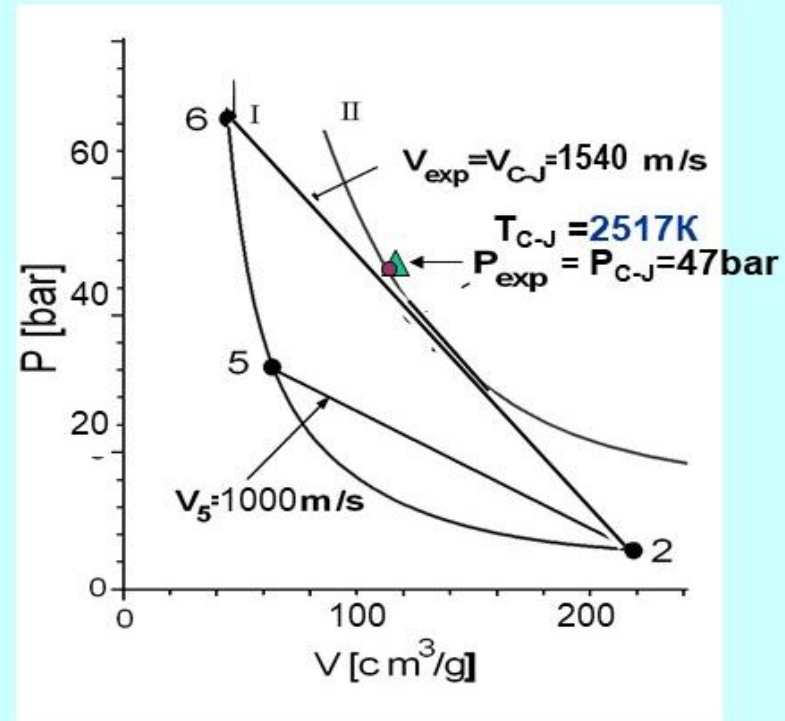


Comparison with 1D detonation theory

20% C_3O_2 , 6 bar



20% C_2H_2 , 30 bar



***Next Fortov's idea:
(2010)***



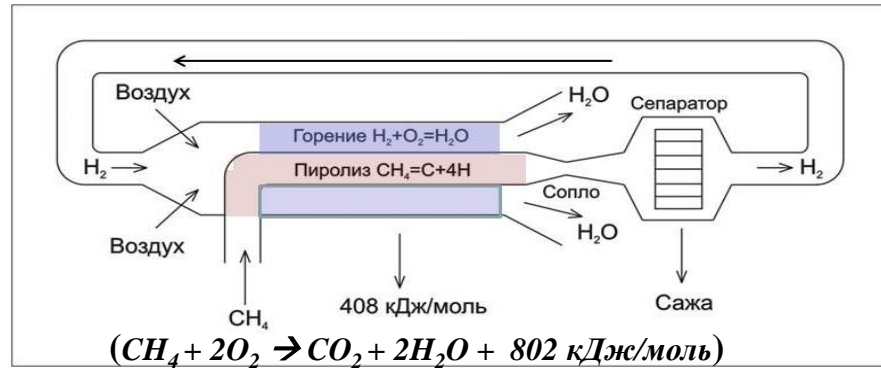
“Detonation (or deflagration) wave of condensation, i.e. oxygen-free combustion, could be the base for new, ecologically friendly energetics!”



Первые шаги в бескислородной энергетике



Принципиальная схема энергетической установки бескислородного горения метана



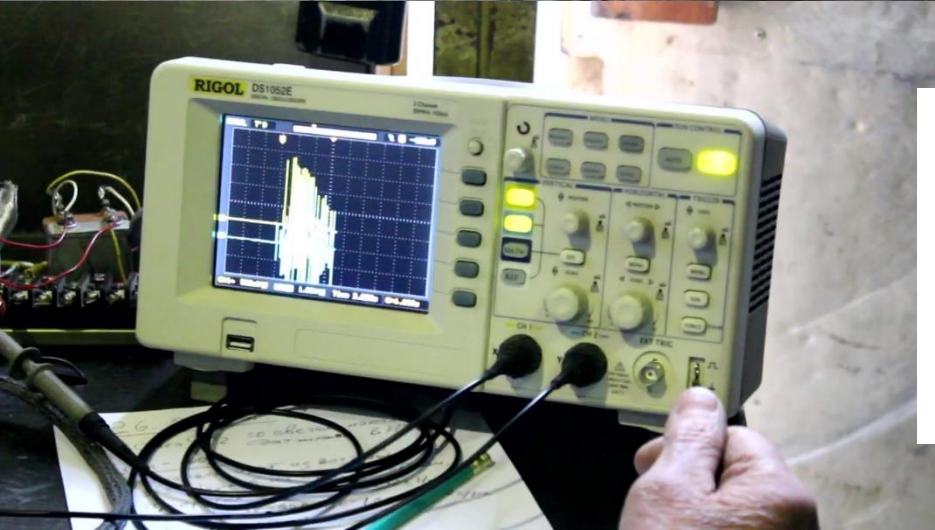
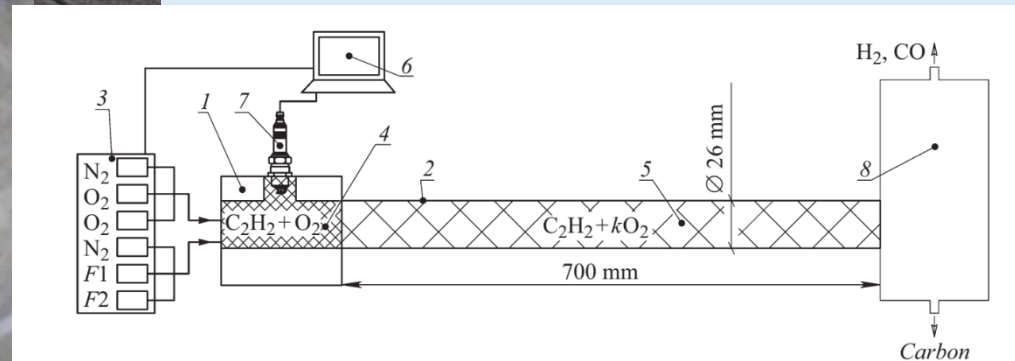
Проточный реактор бескислородного горения ацетилена.
М.С. Власкин (ОИВТ),
Ноябрь 2020



Запуск ДВС на ацетилене
В.М. Зайченко (ОИВТ), 2016



Импульсный газодетонационный
Аппарат на ацетилене.
А.А. Штерцер и др. ИГ СО РАН, 2018



Основные публикации



В. В. Голуб, Е. В. Гуренцов, А. В. Емельянов, А. В. Еремин, В. Е. Фортов,
ЭНЕРГИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ПИРОЛИЗА АЦЕТИЛЕНА, ТВТ , 2015

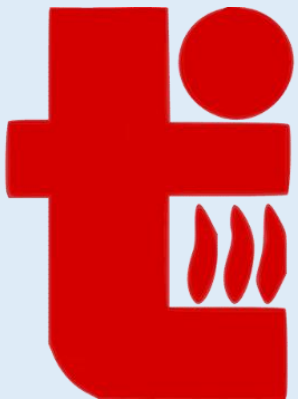
М. С. Власкин, В. М. Зайченко, П. В. Белов, А. В. Григоренко, А. И. Курбатова,
А. В. Еремин, В. Е. Фортов
**РАЗЛОЖЕНИЕ АЦЕТИЛЕНА НА ВОДОРОД И УГЛЕРОД: ОПЫТЫ С ДВС И
ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПРОТОЧНЫМ РЕАКТОРОМ**
Теоретические основы химической технологии, 2021

А. В. Емельянов, А. В. Ерёмин, В. Е. Фортов
**ВОЛНА ХИМИЧЕСКОЙ КОНДЕНСАЦИИ, ИНИЦИИРУЮЩАЯ БЕСКИСЛОРОДНОЕ
ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЮ.** *Хим. Физика*, №4, 2021

А.В. Еремин, В.Е. Фортов
ДЕТОНАЦИОННАЯ ВОЛНА КОНДЕНСАЦИИ. УФН, 2021

Подан Проект РФФ (2021-2023):

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ
УГЛЕВОДОРОДОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОД-НЕЙТРАЛЬНЫХ
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ.** *Рук – М.Власкин (ОИВТ + ИГ СО РАН)*



Дело чести для всех нас, кто был вовлечен Фортовым в эту проблему, теперь, когда ВЕ ушел от нас, довести идею Фортова об энергетическом цикле на основе бескислородного горения до практического воплощения.

