



Воспламенение газов: проблемы управления и безопасности

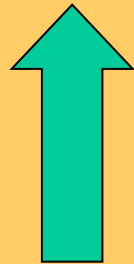
В.В. Голуб

Объединенный институт высоких температур РАН,

Москва, Россия

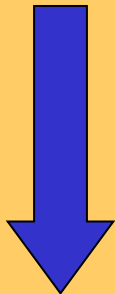


Как ускорить?



Перспективные
энергетические установки

Воспламенение



Безопасность

Как замедлить?

- *Водород*
- *Ацетилен*

Вопросы



- **1. Что может быть причиной самовоспламенения холодного водорода при утечке в открытое пространство или в канал?**
- **2. Можно ли хранить ацетилен в баллоне в количестве в 2 раза превышающем обычное?**
- **3. Можно ли свистком предотвратить или задержать воспламенение и детонацию?**
- **4. Как повлияют местные сужения или уширения канала на переход горения в детонацию ?**
- **5. Можно ли в 2 раза снизить энергию инициирования детонации с помощью магнитного поля?**

1. Самовоспламенение водорода



1. Что может быть причиной самовоспламенения холодного водорода при утечке в открытое пространство или в канал?

Водород



экологически чистый источник энергии
активно развиваются топливные элементы



НИЗКАЯ ПЛОТНОСТЬ



хранение водорода под высоким давлением

Широкие концентрационные пределы воспламенения
3,3–81,5 %

700 aTM !!!!

QUANTUM Technologies WorldWide, Inc



Несчастные случаи с водородом



Источник возгорания	Несчастные случаи с водородом	
	Число	%
Поджог	0	0
Соударение	2	2.5
Пламя	3	3.7
Рабочая поверхность	2	2.5
Электричество	2	2.5
Трение	2	2.5
Источник не выявлен	70	86.3
Всего	81	100.0

Astbury G.R., Hawksworth S.J., 2005.



Related works

Compression ignition, Joule-Thomson expansion, **diffusion** **ignition** and hot surface ignition are unlikely ignition mechanisms for most accidental releases of hydrogen at ambient temperature.”

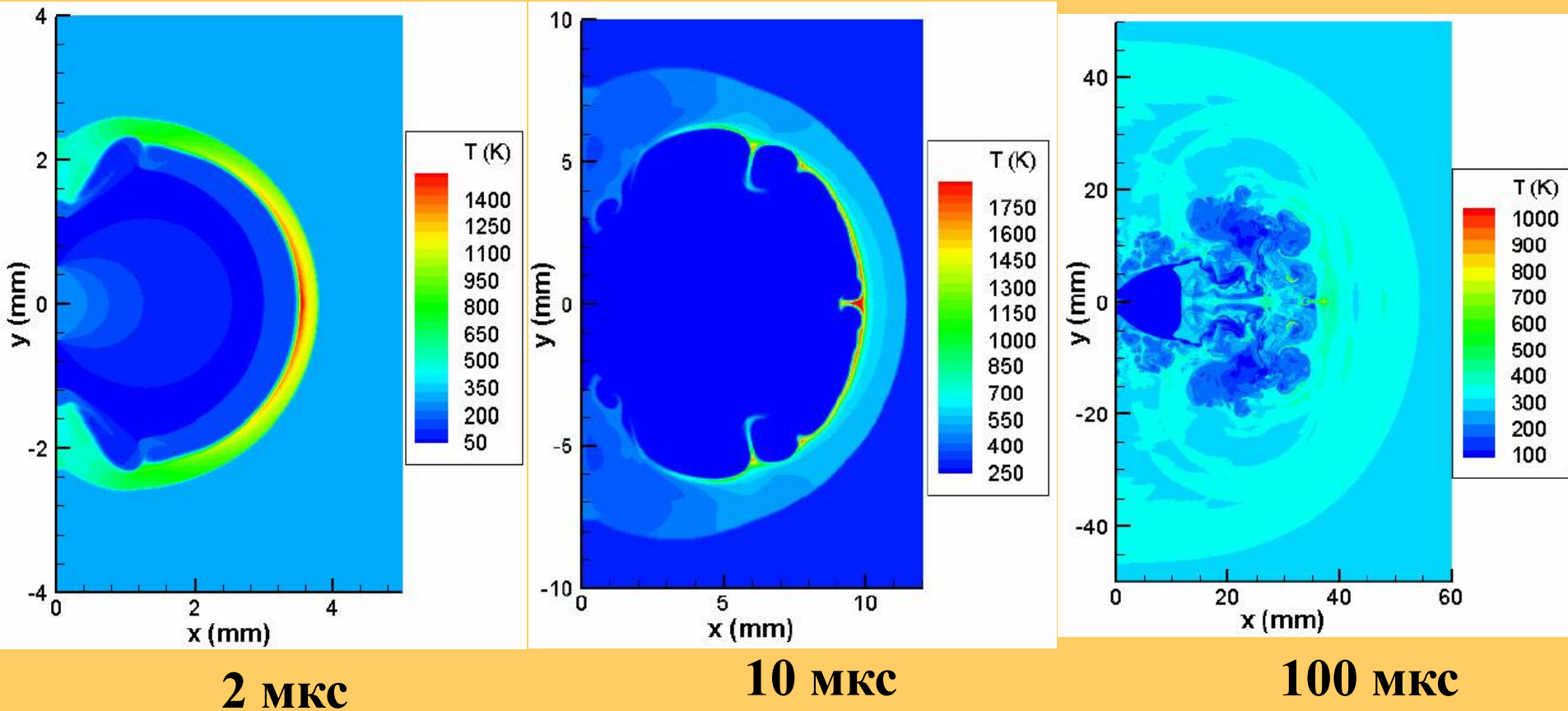
????

Astbury G.R., & Hawksworth S.J. (2005). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms. In Proc. of The International Conference on Hydrogen Safety, Pisa.

Предпосылки данной работы «self-ignition in a hydrogen jet is impossible»

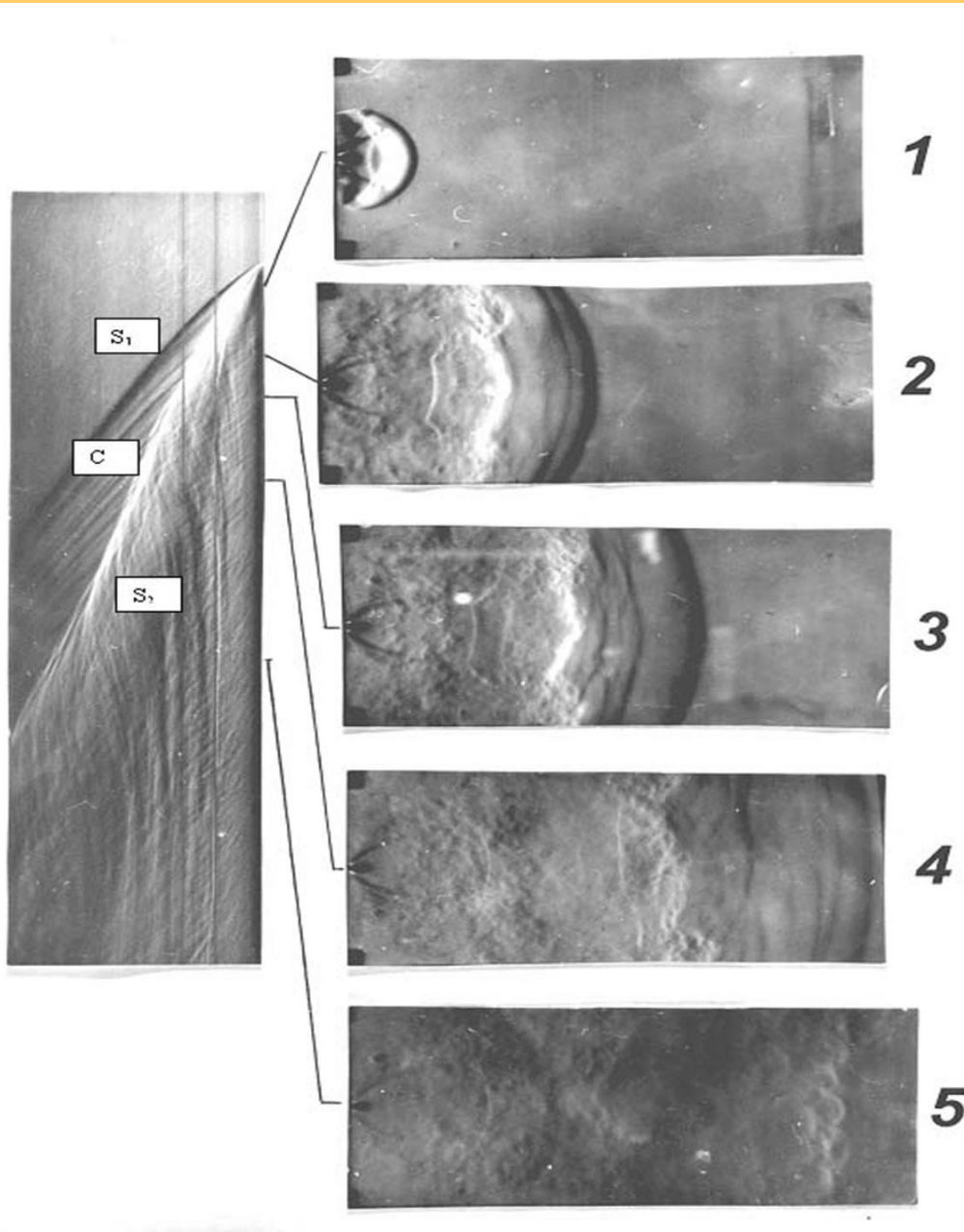


$P = 40 \text{ MPa}; R = 1 \text{ mm}$



Последовательные стадии развития струи при истечении
водорода в атмосферу. Давление в баллоне – 400 атм. Радиус выходного отверстия – 1 мм.

(Liu Y.-F., Tsuboi N., Sato H., Higashino F., Hayashi A.K. // In Proc. of The 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reacting Systems, Montreal, Canada. 2005)



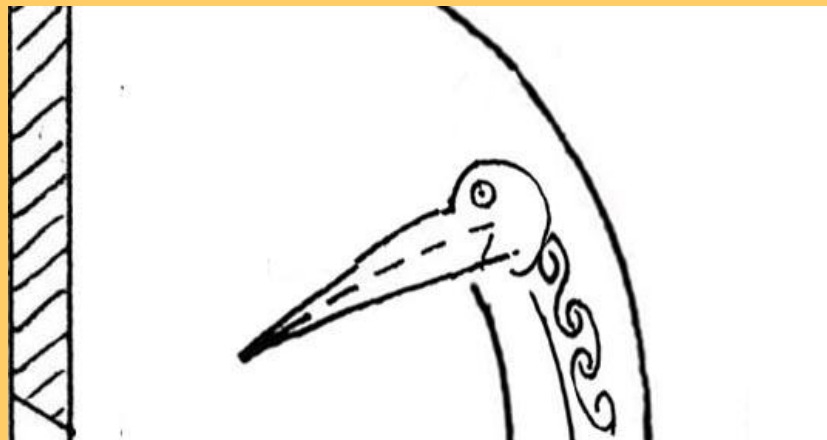
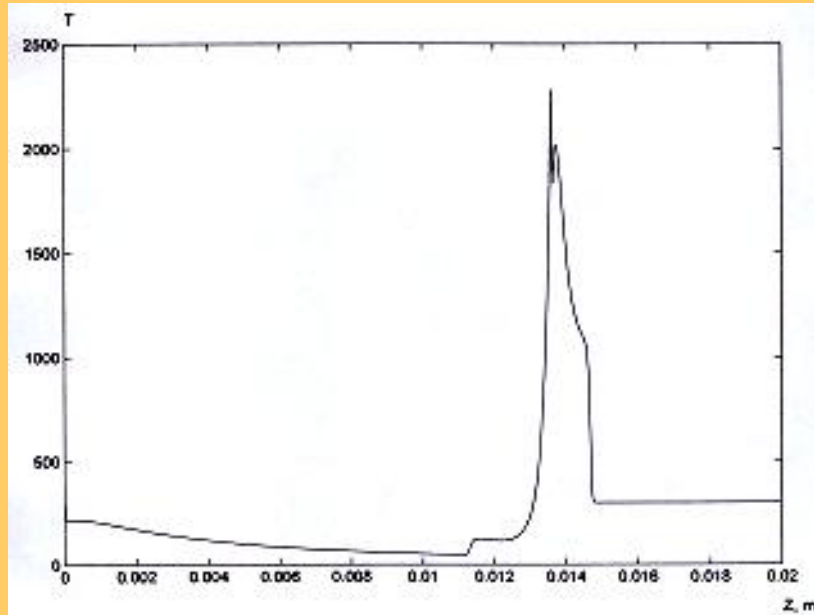
Streak record and schlieren photographs of impulse jet formation

Математическая модель

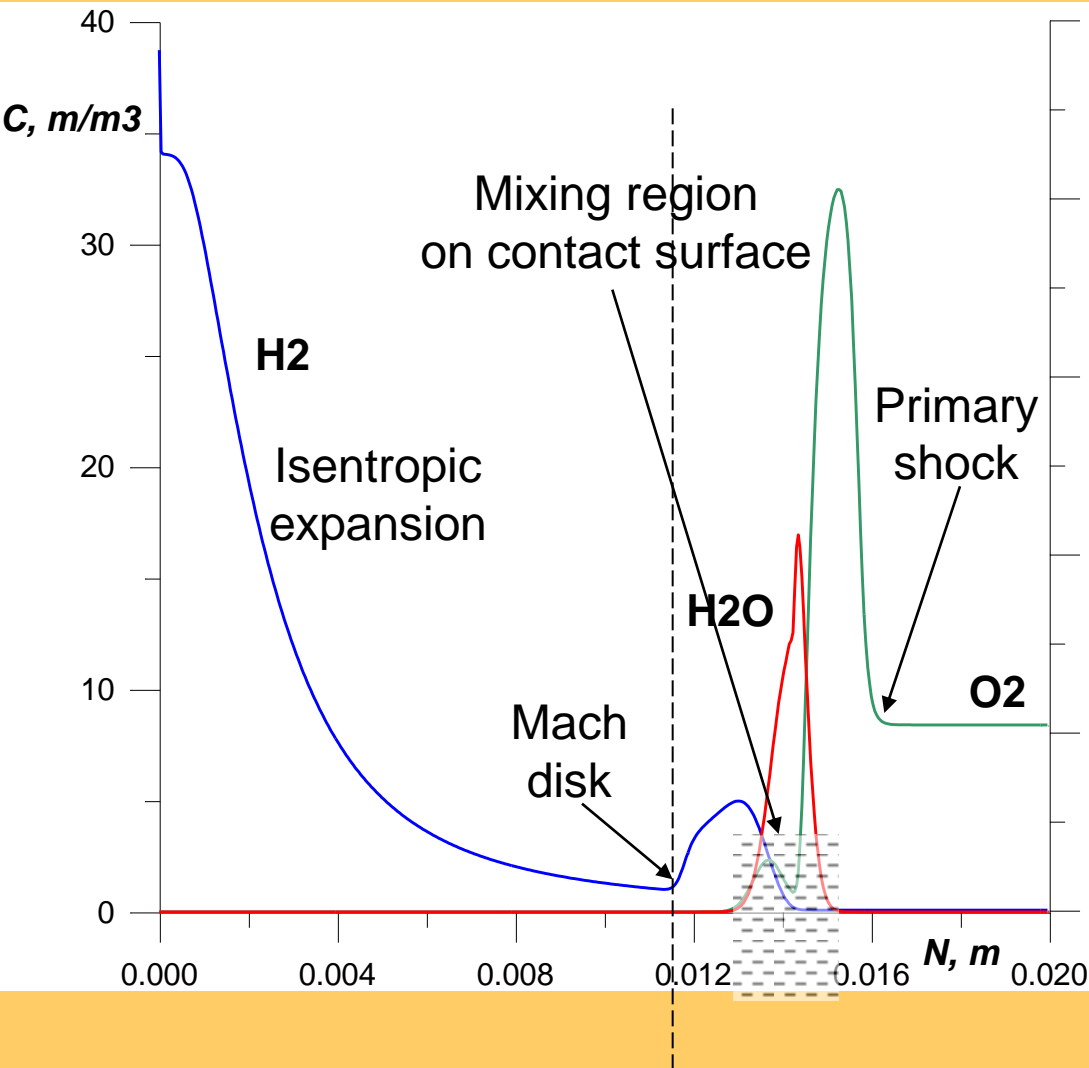


- Полная система уравнение Навье-Стокса для мультикомпонентной смеси газов
- Детальная кинетика окисления водорода (21 реакция, 11 компонент Miller J.A., Bowman C.I.)
- Учитывалось влияние вязкости и теплопроводности
- Схема Годунова
- Для вычислений использовались пакеты CHEMKIN и FLUENT

Temperature distribution along the jet

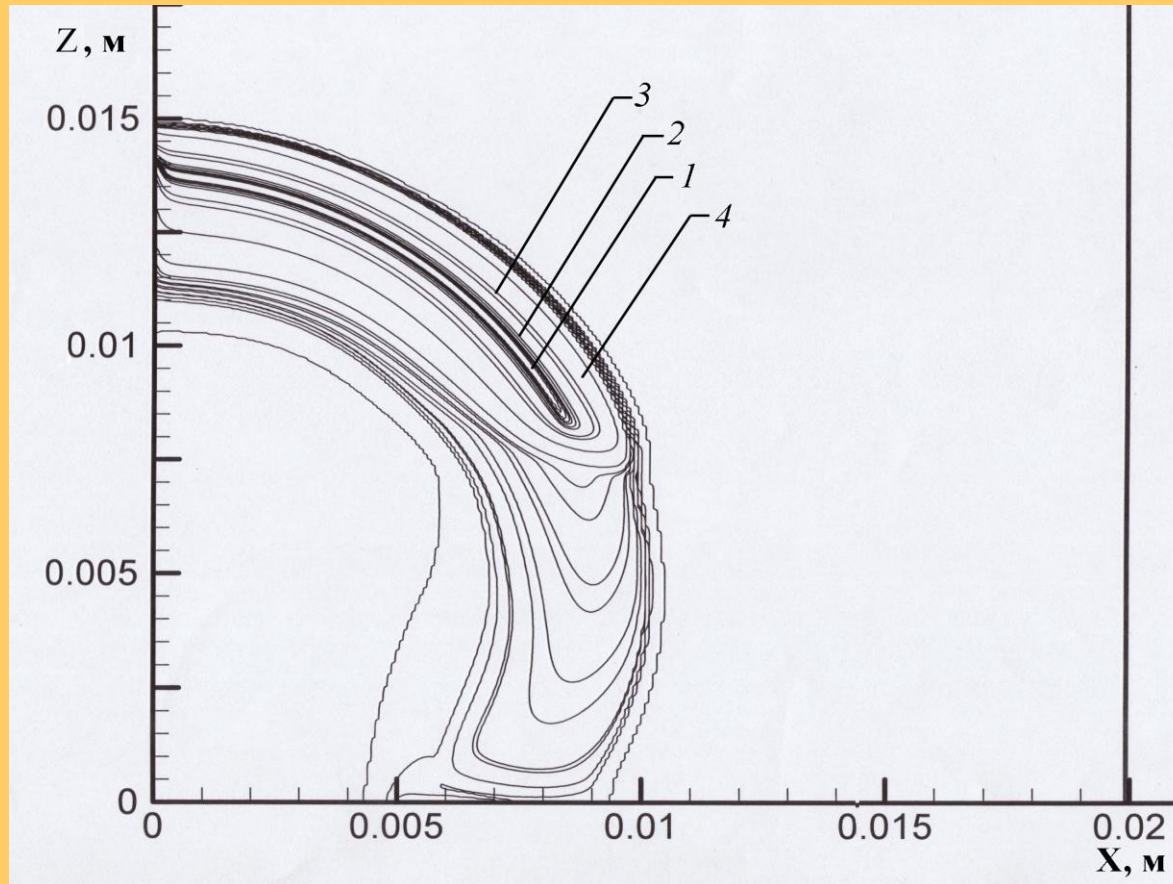


Concentrations of species along the jet



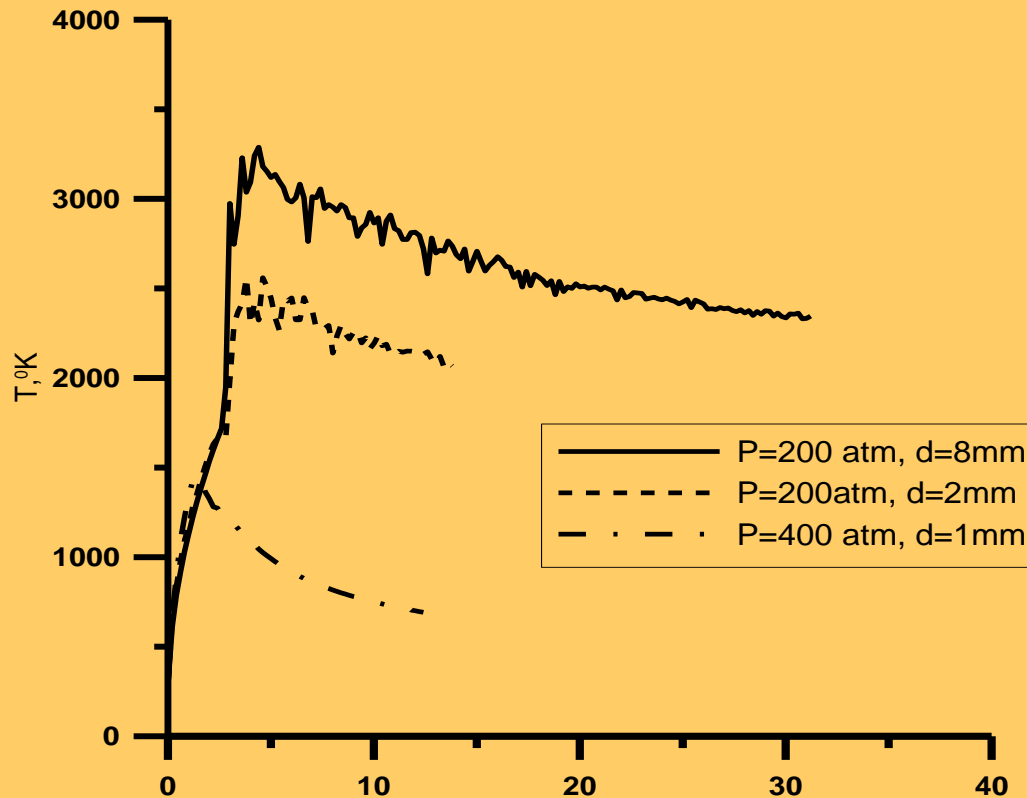
$P_0 = 400 \text{ atm}$
 $d = 4 \text{ mm}$
 $t = 8 \mu\text{s}$

Calculated H_2O concentration distribution related to the H_2O concentration in fully combusted mixture



Z , X – distance from the orifice along and normal to the flow direction. Isolines 1-4 correspond to 70, 30, 10, and 2% respectively. $t = 8 \mu\text{s}$

Maximum temperature-time distributions



– ignition occurs followed by steady-state

– ignition occurs, but extinction is expected

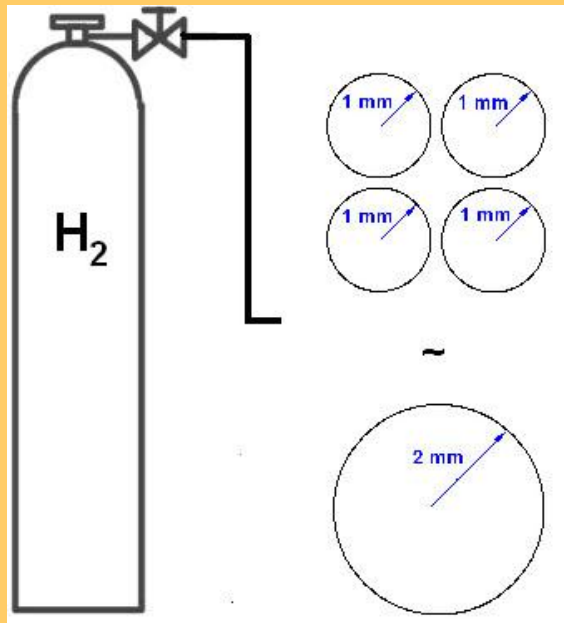
– no ignition and no combustion

Discharging and ambient gas temperatures 300 K

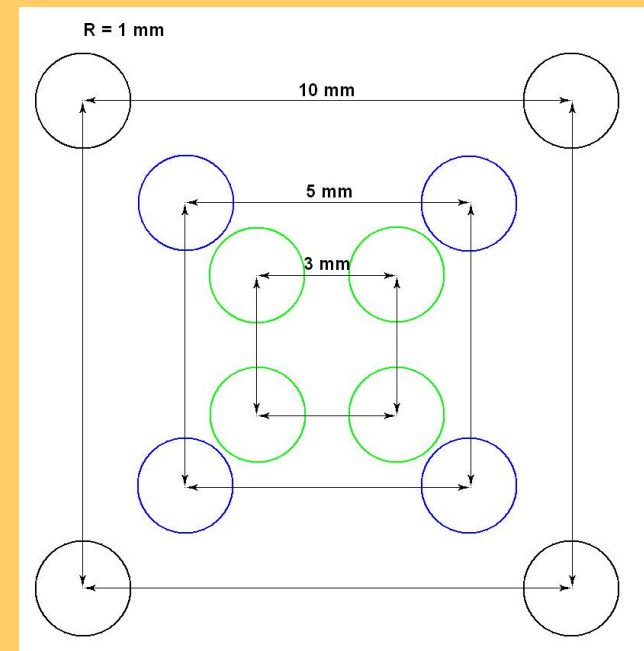
Подобрать такие граничные условия, чтобы диффузионное само-воспламенение не возникло.



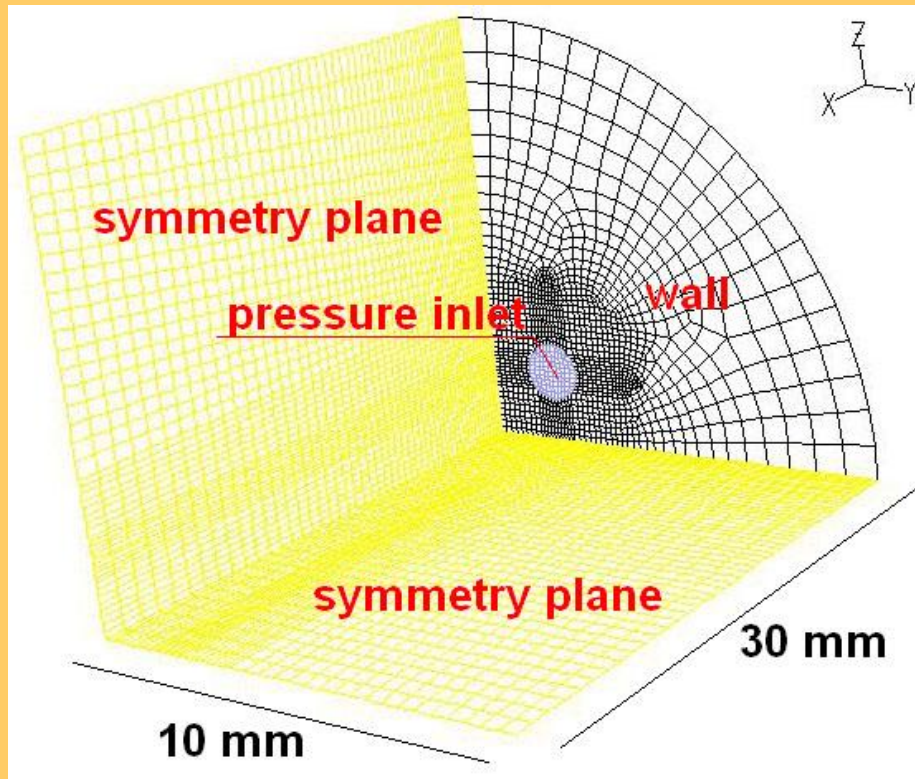
1. Заменить систему из одного отверстия радиусом 2 мм на эквивалентную по площади систему из 4 отверстий радиусом 1 мм



2. Разнести отверстия системы на расстояние достаточное для того чтобы воспламенение не возникало.



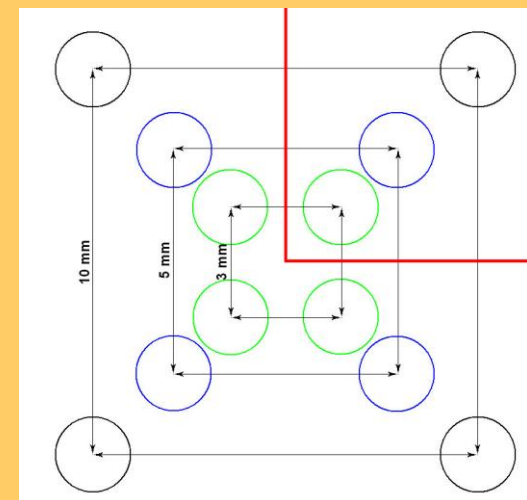
Расчетная область и сетка



$$L = 30 \text{ mm}$$

$$R = 10 \text{ mm}$$

$$N = 50 \times 50 \times 100$$



Предотвращение самовоспламенения

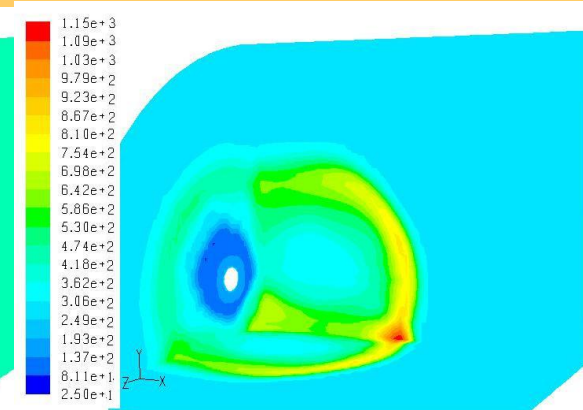
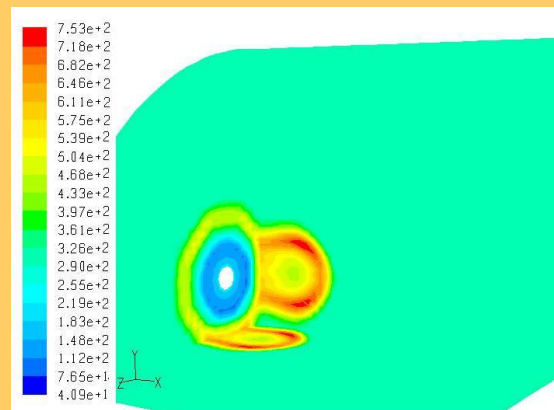
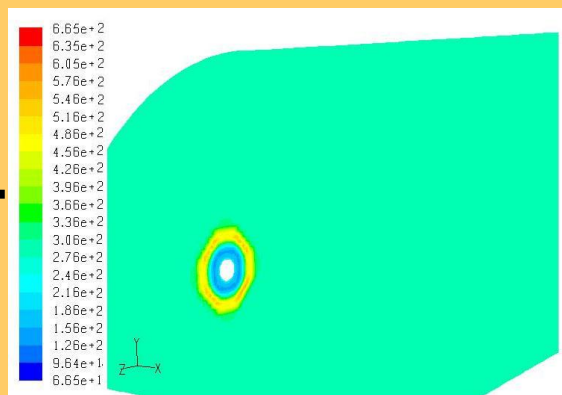


2 мкс

5 мкс

11 мкс

d1*4

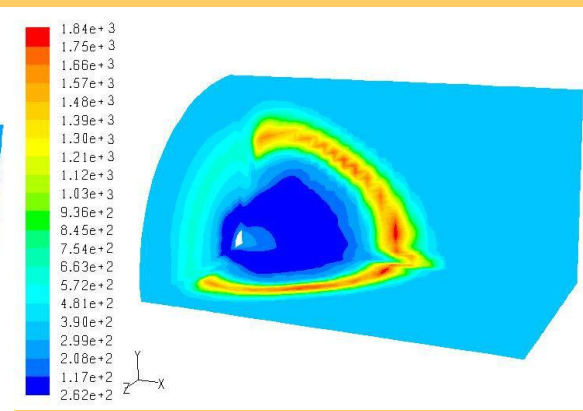
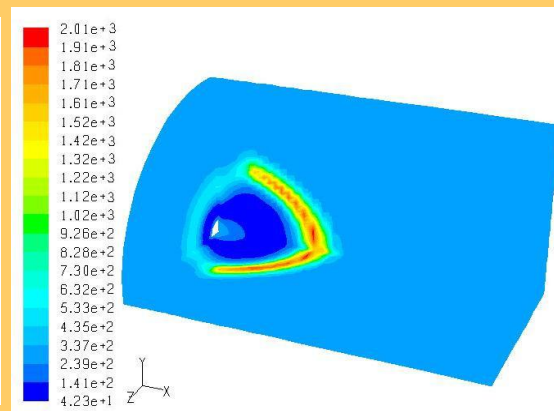
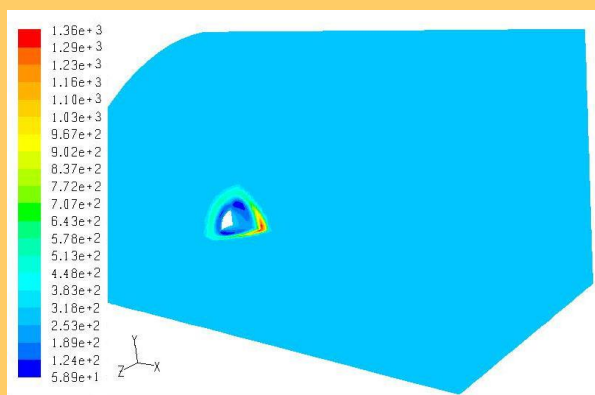


2 мкс

8 мкс

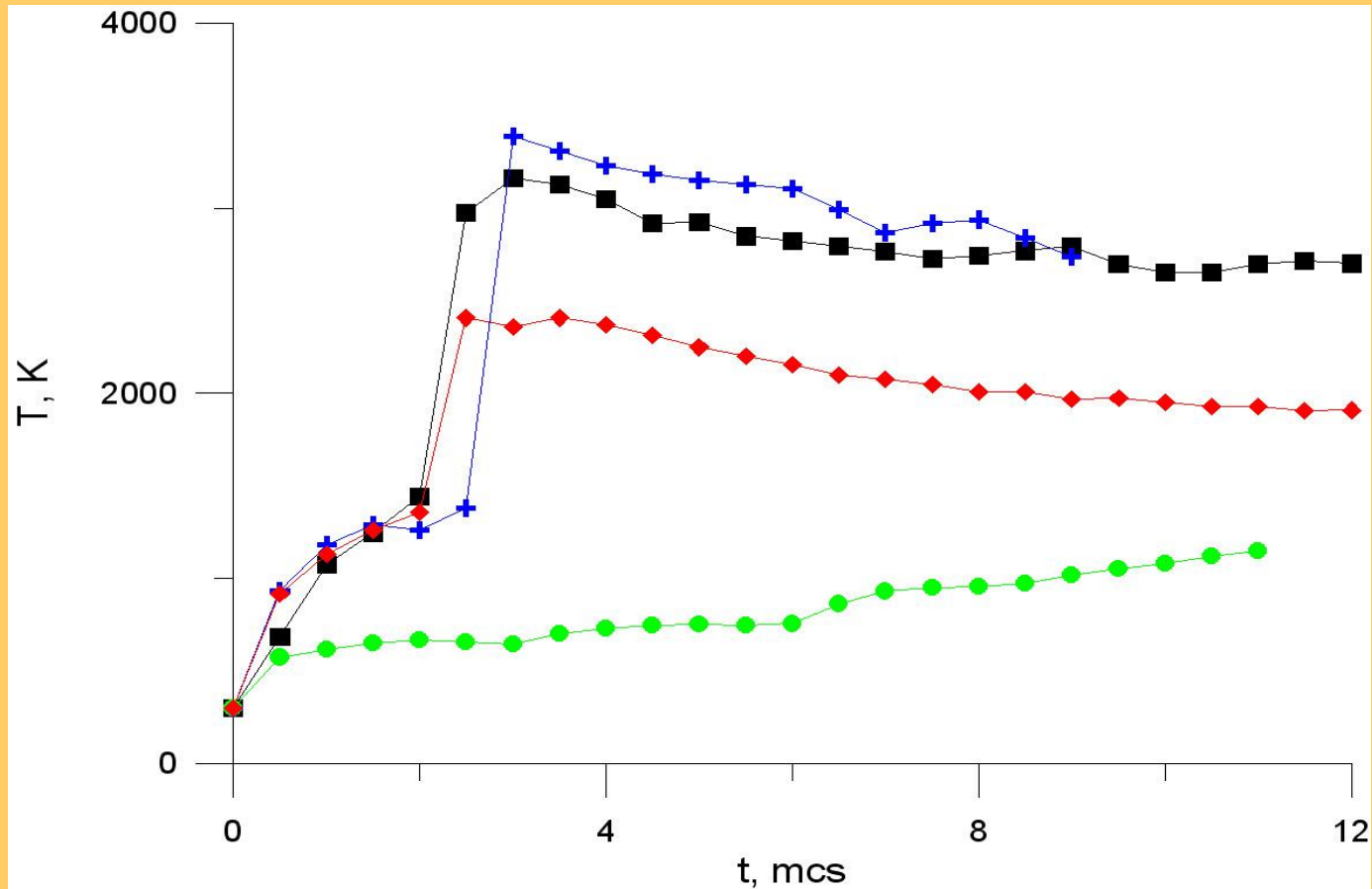
16 мкс

d2



Картины течения для температуры для случая 4-х отверстий радиусом 1 мм и одного отверстия радиусом 2 мм

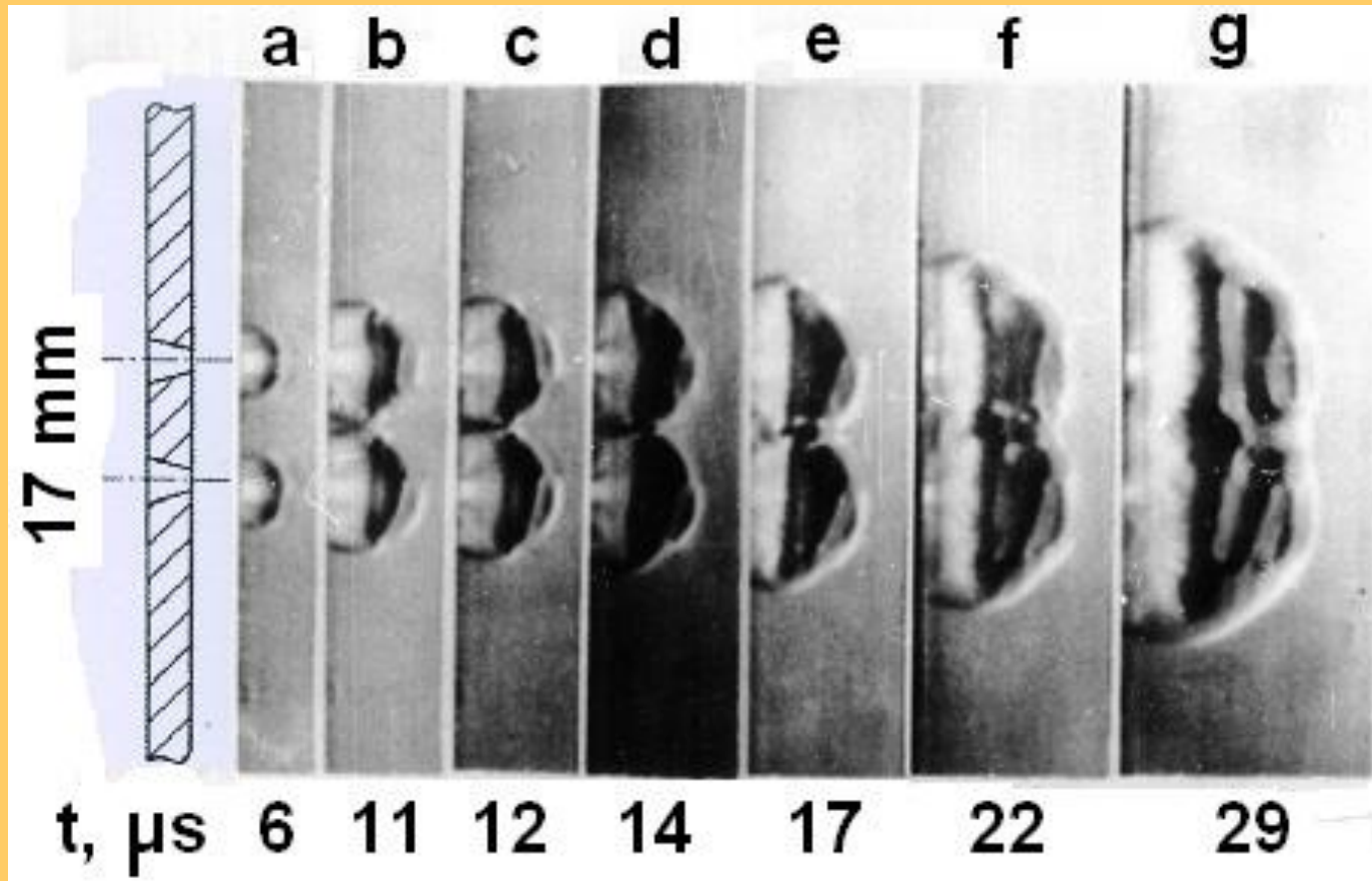
Предотвращение самовоспламенения



Dependences of maximal temperature on the time at the release from: **black** – 1 orifice (d=4 mm), **blue** – 4 orifices (d=2 mm, L=3 mm), **red** - 4 orifices (d=2 mm, L=5 mm), **green** - 4 orifices (d=2 mm, L=10 mm)



Взаимодействие ударных волн от двух близко расположенных струй

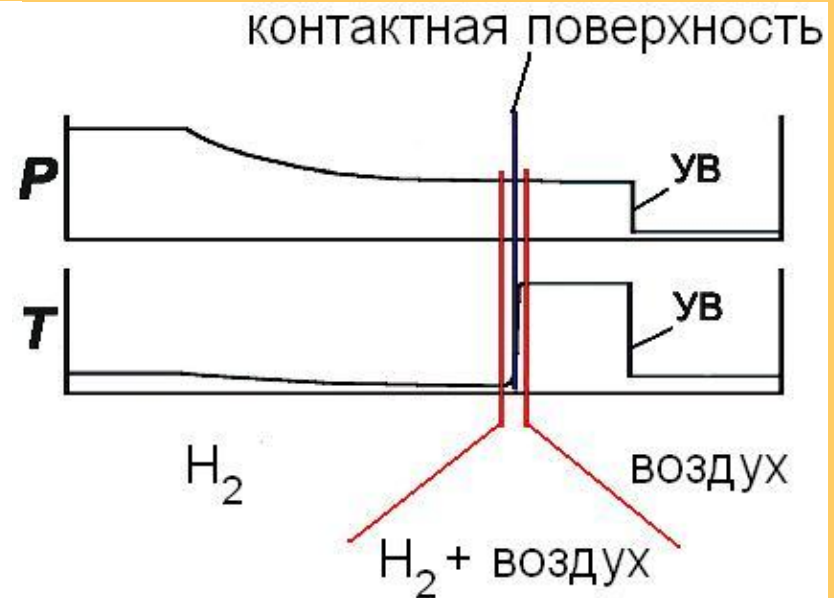
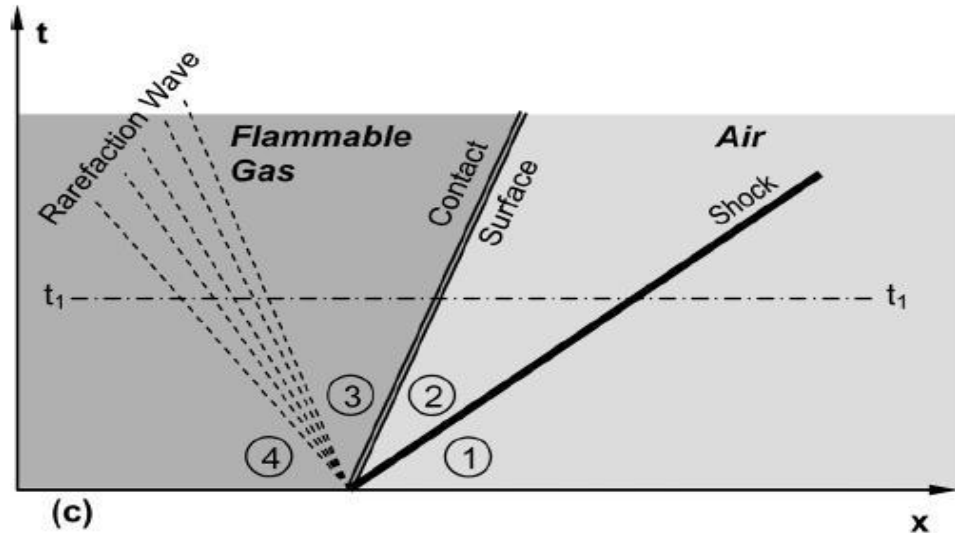
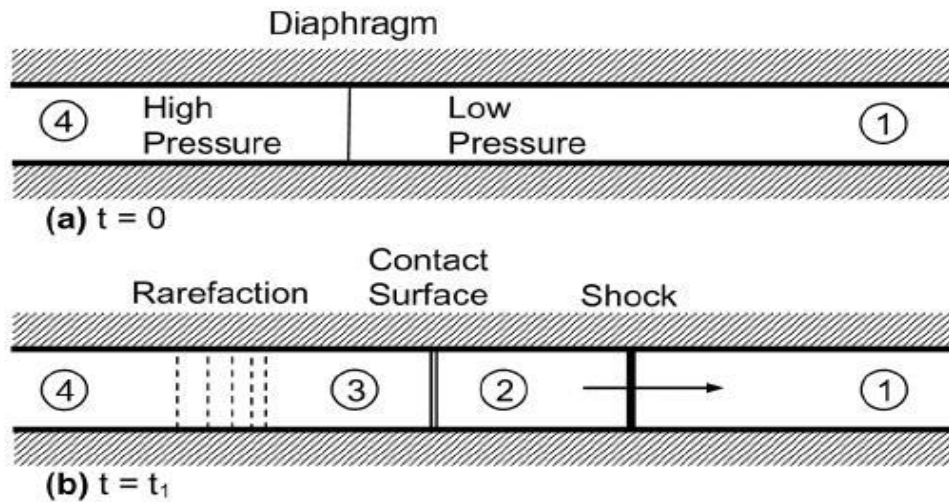


Диффузионное самовоспламенение водорода при импульсном истечении в канал с воздухом



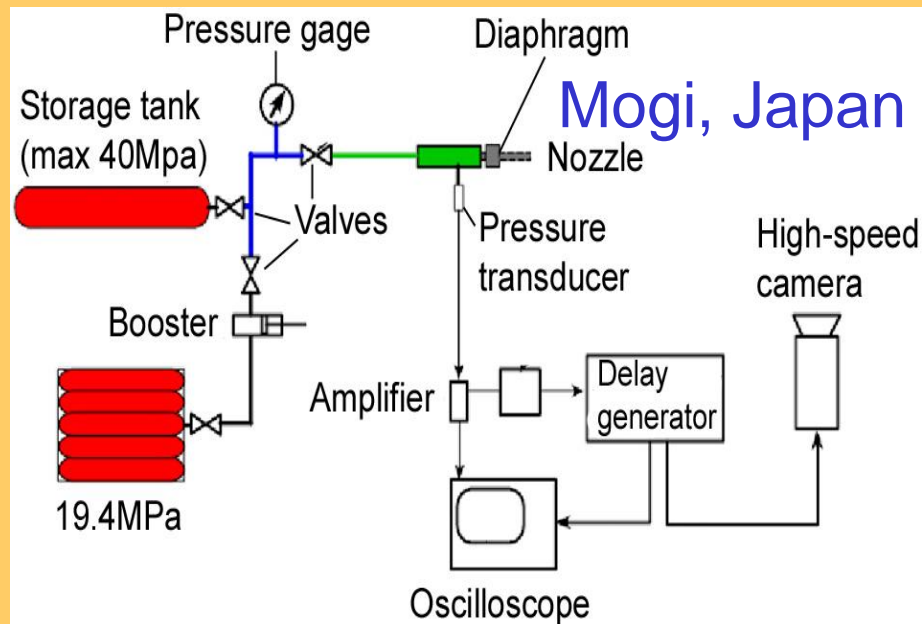
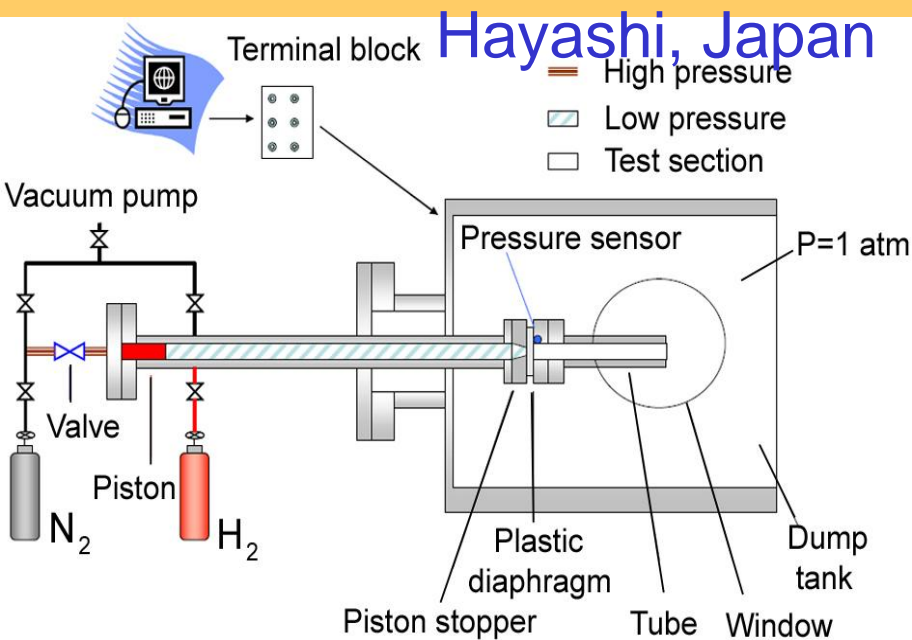
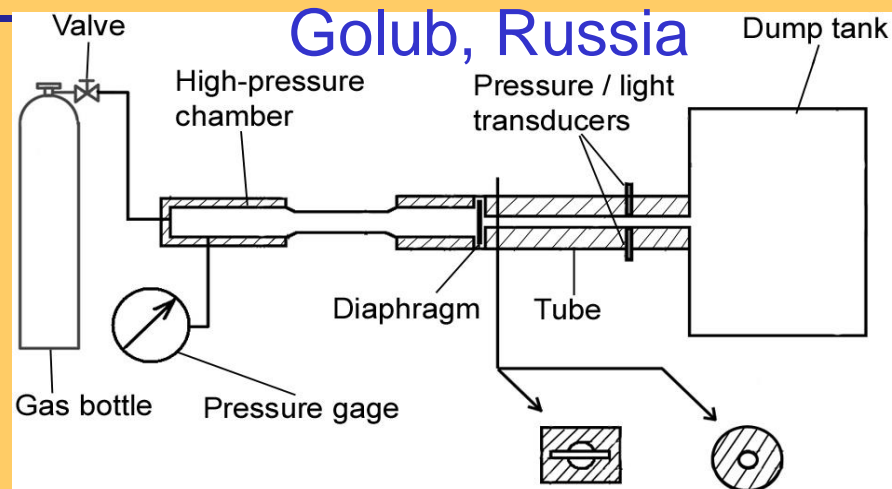
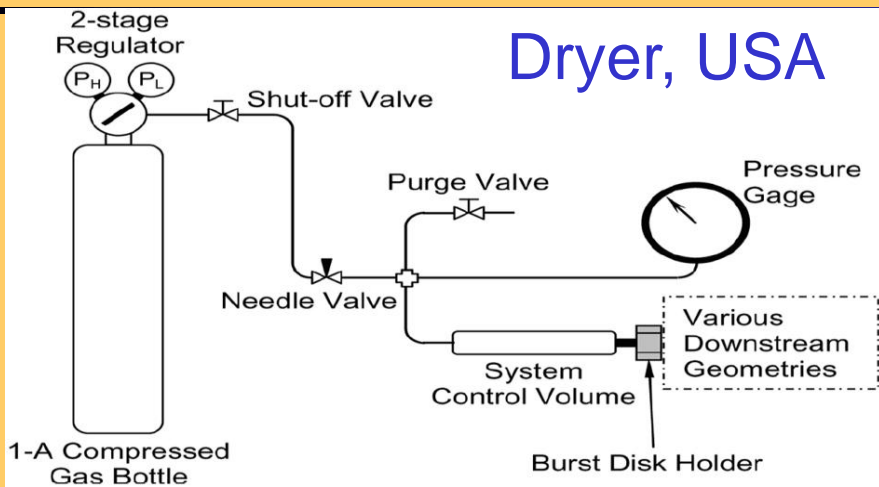


Принцип действия ударной трубы



Истекающая струя водорода сжимает воздух, формируя ударную волну и нагревая зону перемешивания

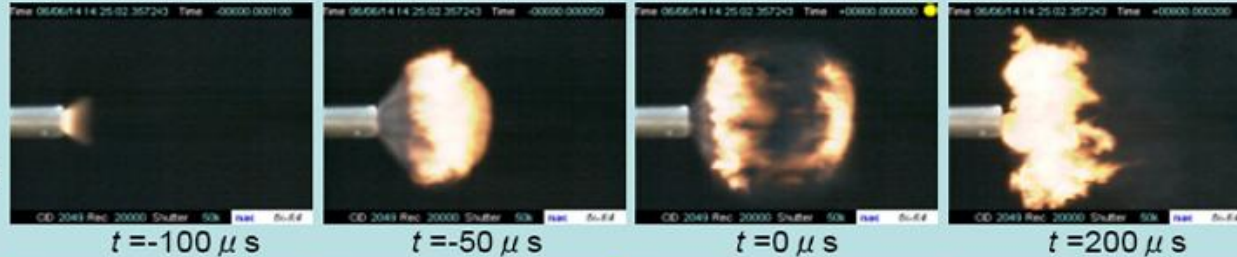
Экспериментальные установки



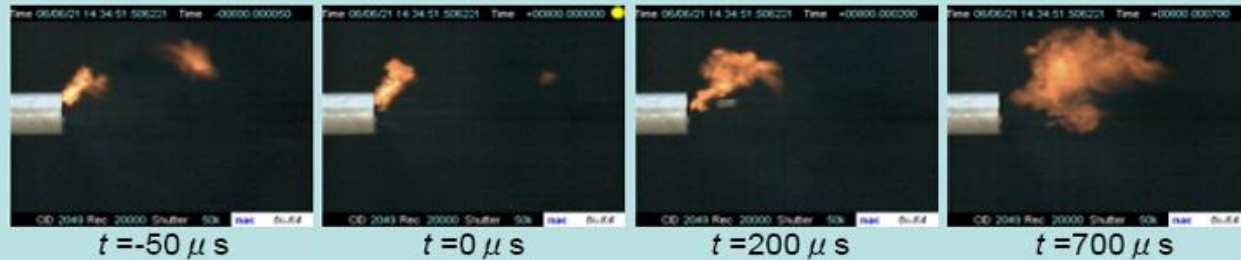
Two scenarios of hydrogen ignition: flame is held at the exit (top), flame is blowed-out and extinguished (bottom), T. Mogi, 2006



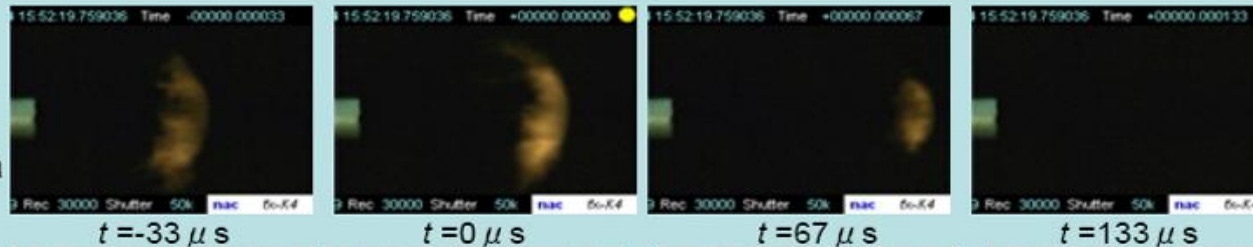
I.D.=5mm
L=185mm
 $P_b=14.5\text{MPa}$



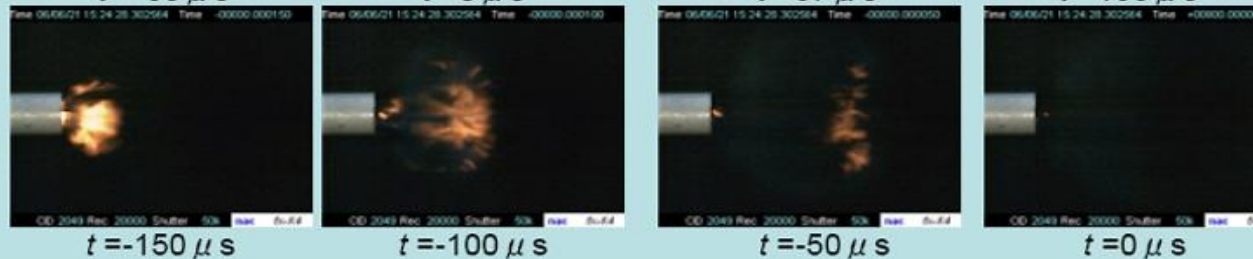
I.D.=10mm
L=185mm
 $P_b=12.4\text{MPa}$



I.D.=5mm
L=185mm
 $P_b=11.6\text{MPa}$



I.D.=10mm
L=185mm
 $P_b=12.5\text{MPa}$



Map of ignition and forming the jet flame depending on the length of extension nozzle and burst pressure, T. Mogi, 2006

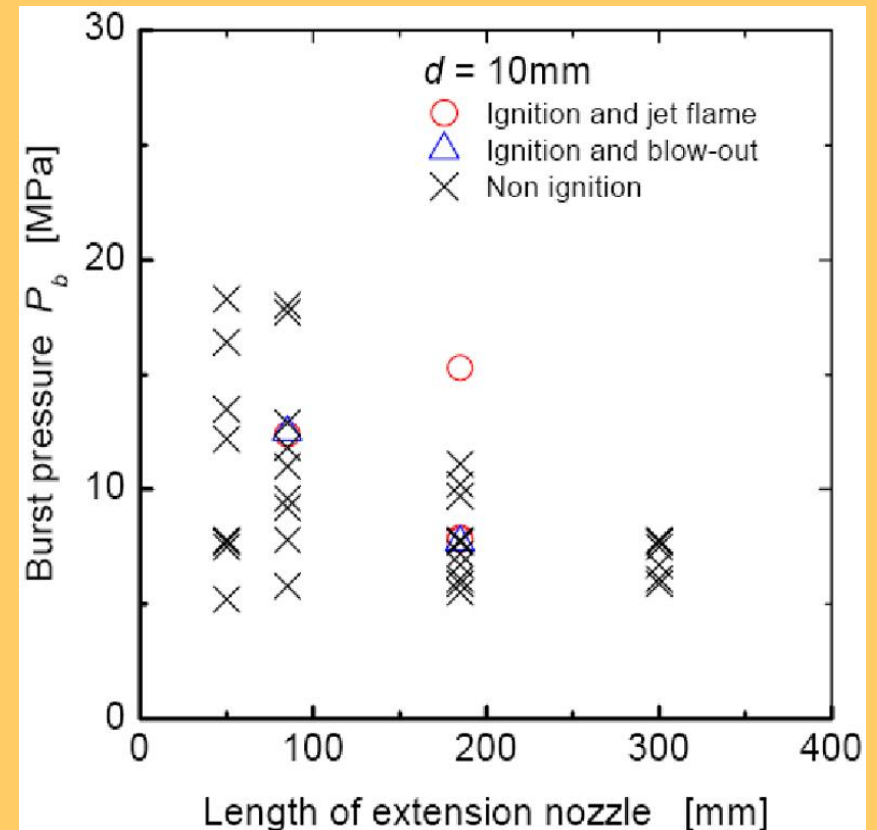
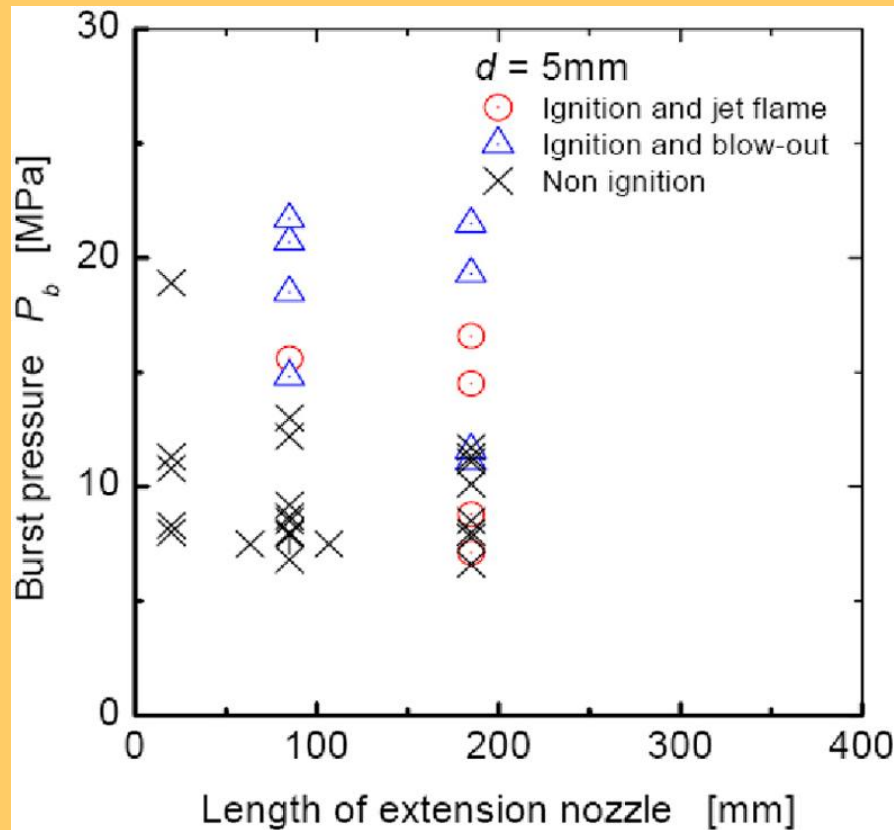
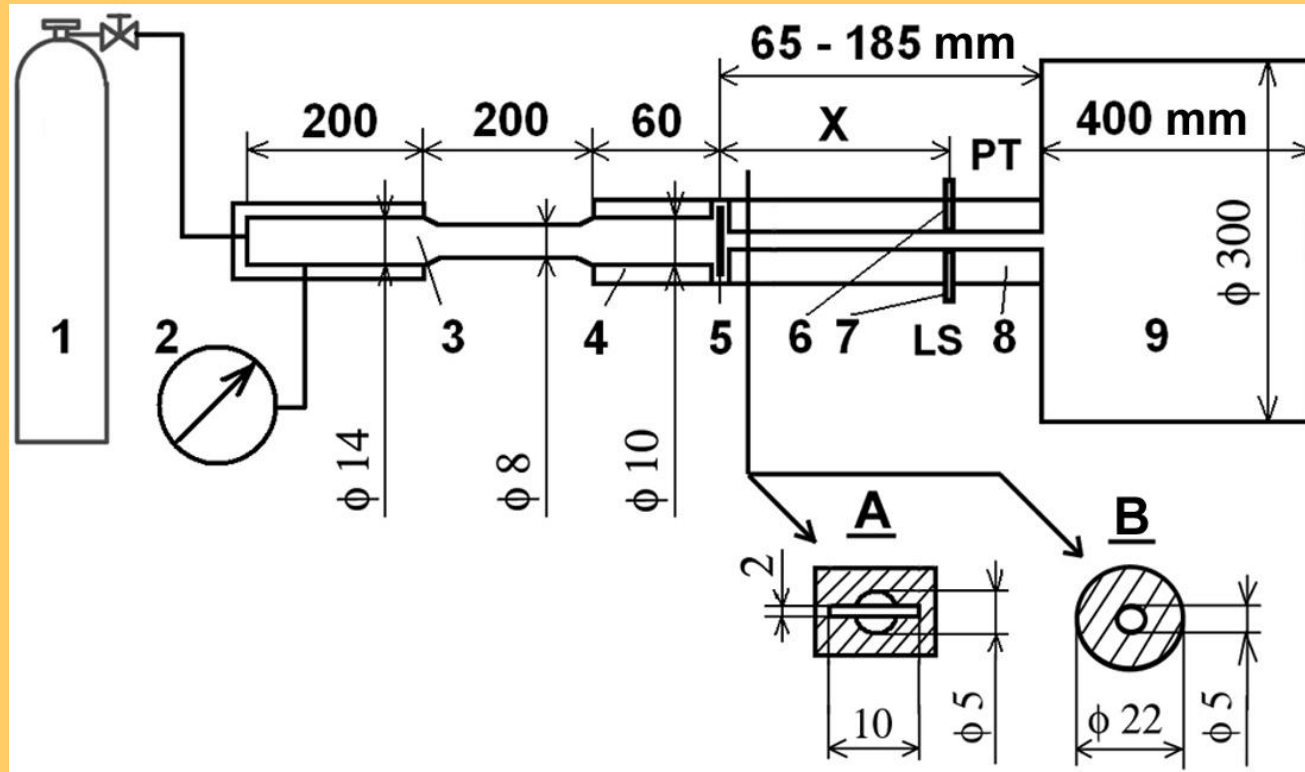
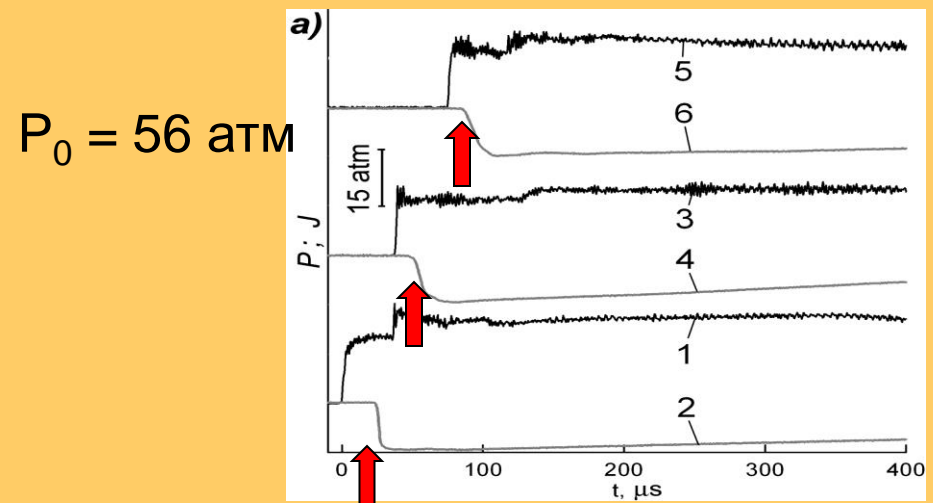
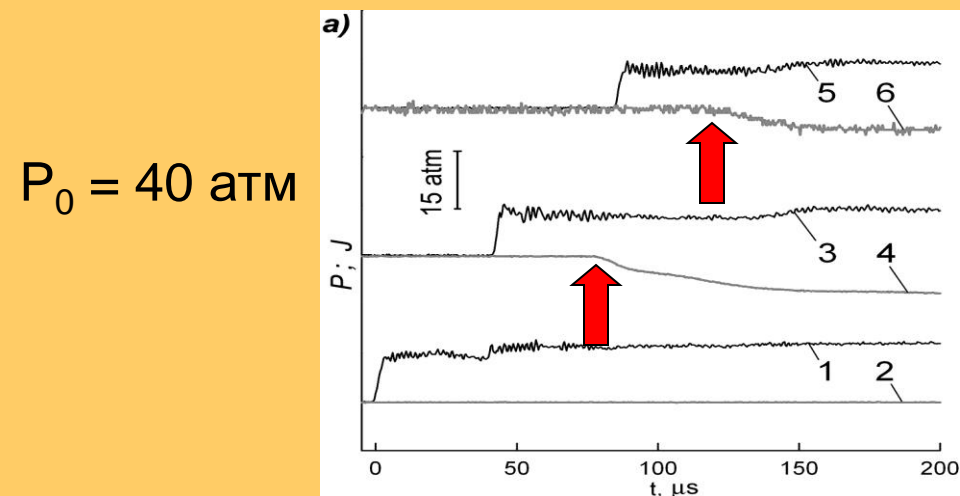
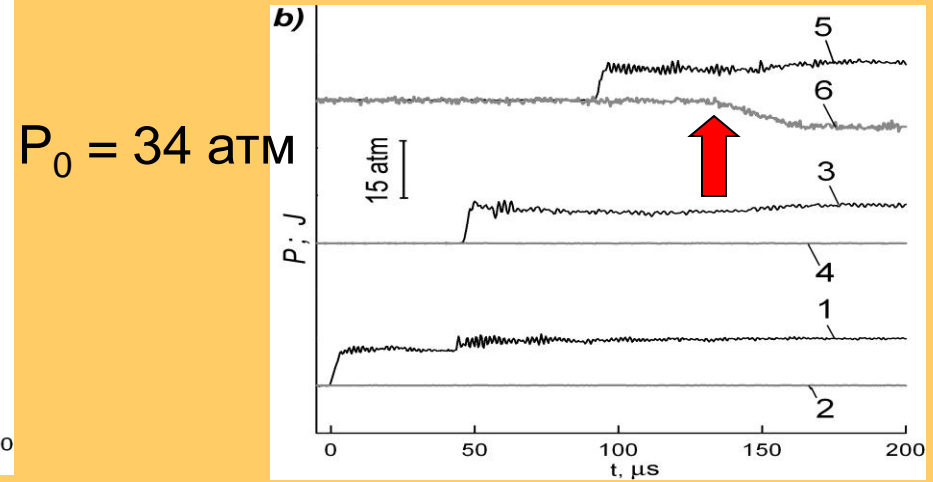
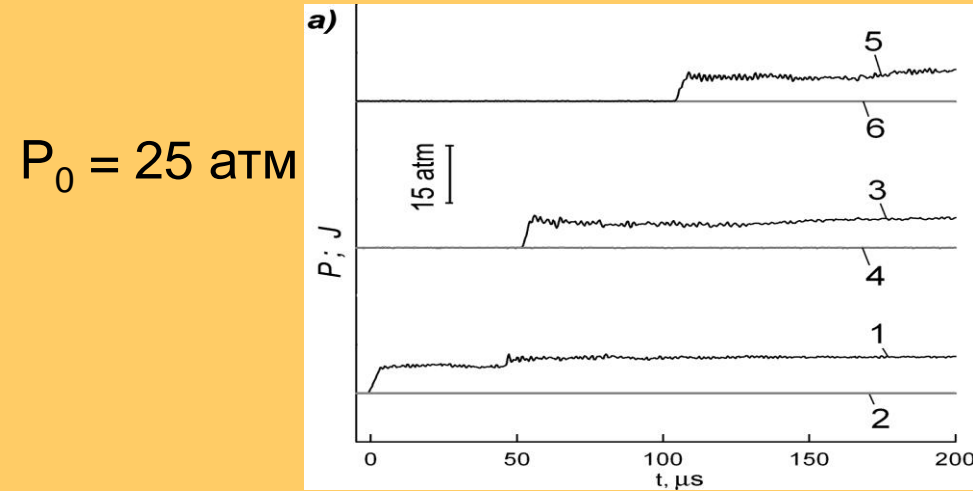


Схема экспериментальной установки



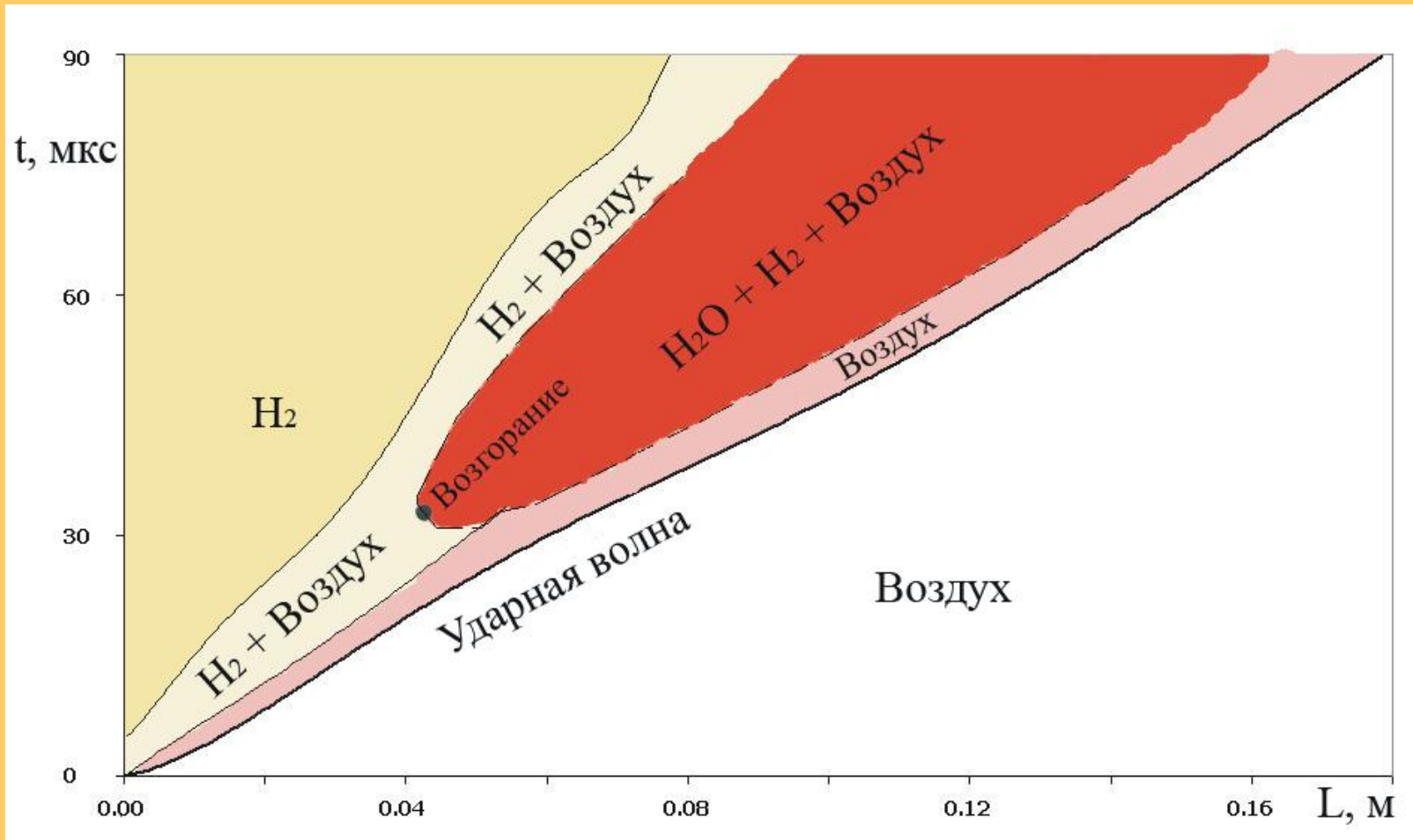
1 – сосуд с водородом, 2 – манометр, 3 – камера высокого давления, 4 – диафрагменный блок, 5 – медная диафрагма, 6 – датчик давления РСВ, 7 – фотодатчик, 8 – камера низкого давления; 9 – буферная емкость. X – расстояние от диафрагмы до датчика давления.

Влияние начального давления P_0 в баке на место самовоспламенения водорода



Повышение давления ускоряет самовоспламенение водорода

Самовоспламенение водорода за ударной волной в канале

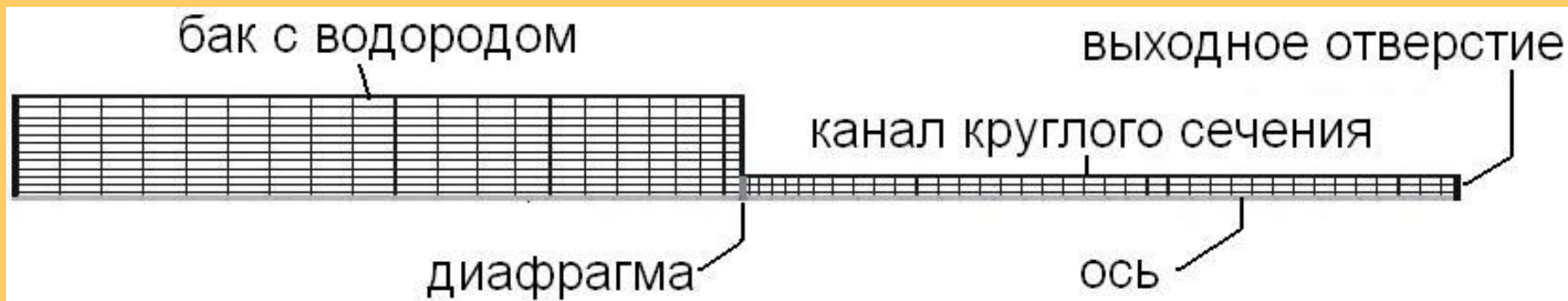


X-t-диаграмма ударно-волновых процессов при истечении водорода в канал ($P_0=56$ атм)

Моделирование самовоспламенения водорода



1. Полная система уравнений Навье-Стокса для мультикомпонентной смеси газов (*Baev V. et al., NASA, 1985*)
2. Явная конечно-разностная схема распадного типа. Схема Роя



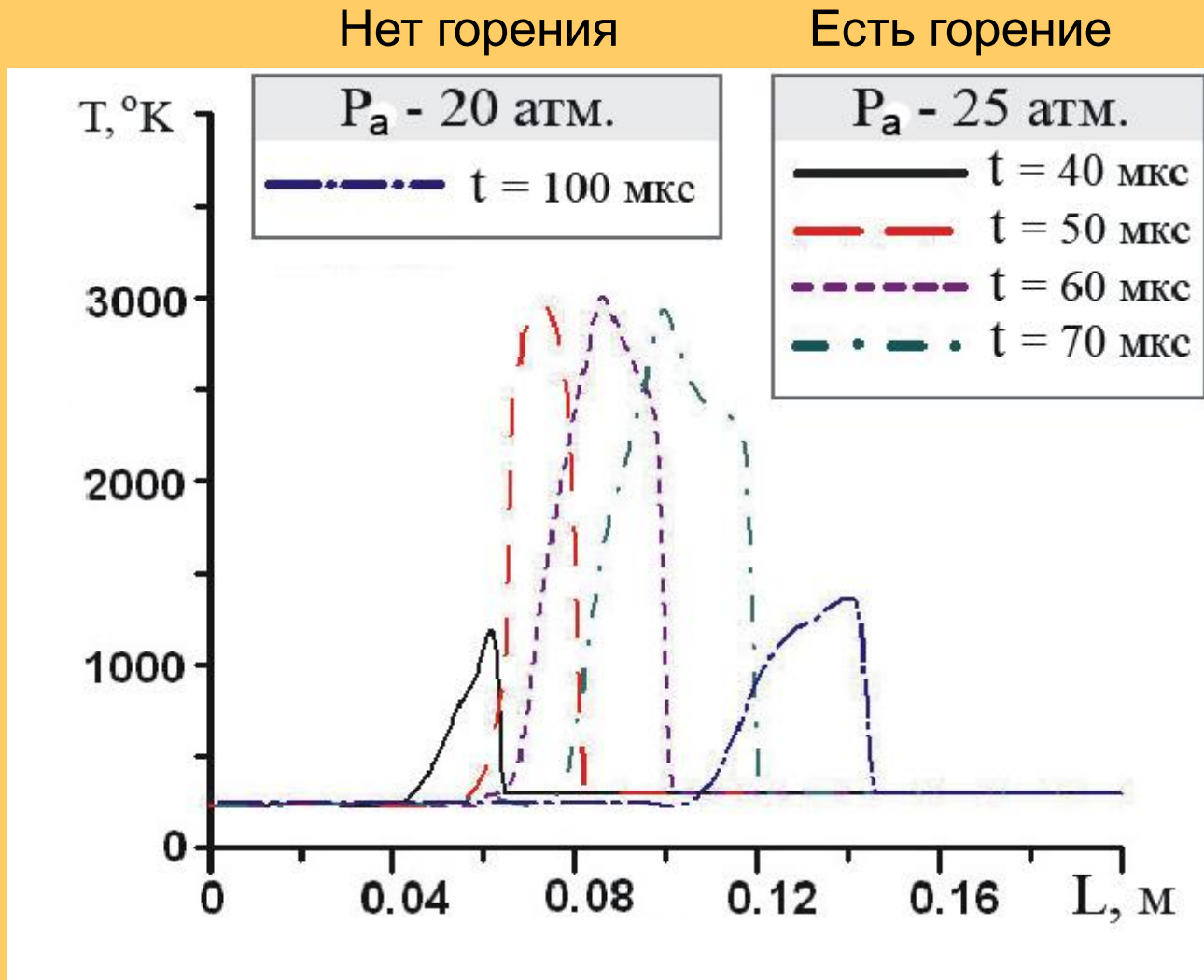
Бак: H_2
 $D = 10$ мм, $L = 100$ мм,
 $P_0 = 20-100$ атм, $T_0 = 300$ К

Канал: воздух (O_2 - 23%, N_2 - 77%)
 $d = 5$ мм, $L = 65-180$ мм,
сетка $5 \times 30 - 100 \times 1000$
 $P_0 = 1$ атм, $T_0 = 300$ К

Детальная кинетика окисления водорода, 21 реакция, 11 компонент
(*Miller J.A., Bowman C.I.*)

Стенки гладкие, некаталитические
Вязкость и теплопроводность

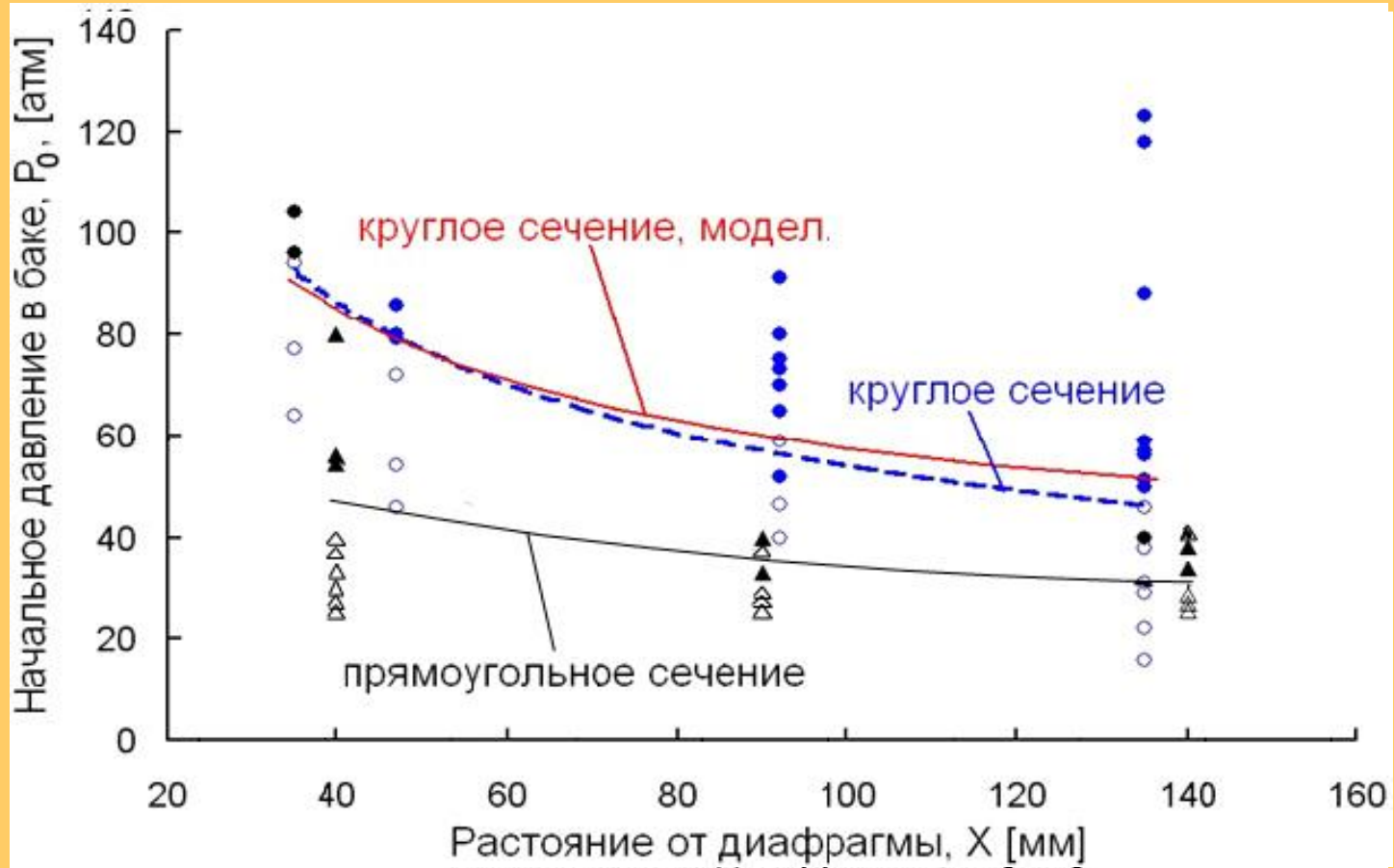
Формирование области горения в канале



Температура на стенке по длине канала



Безопасная длина канала

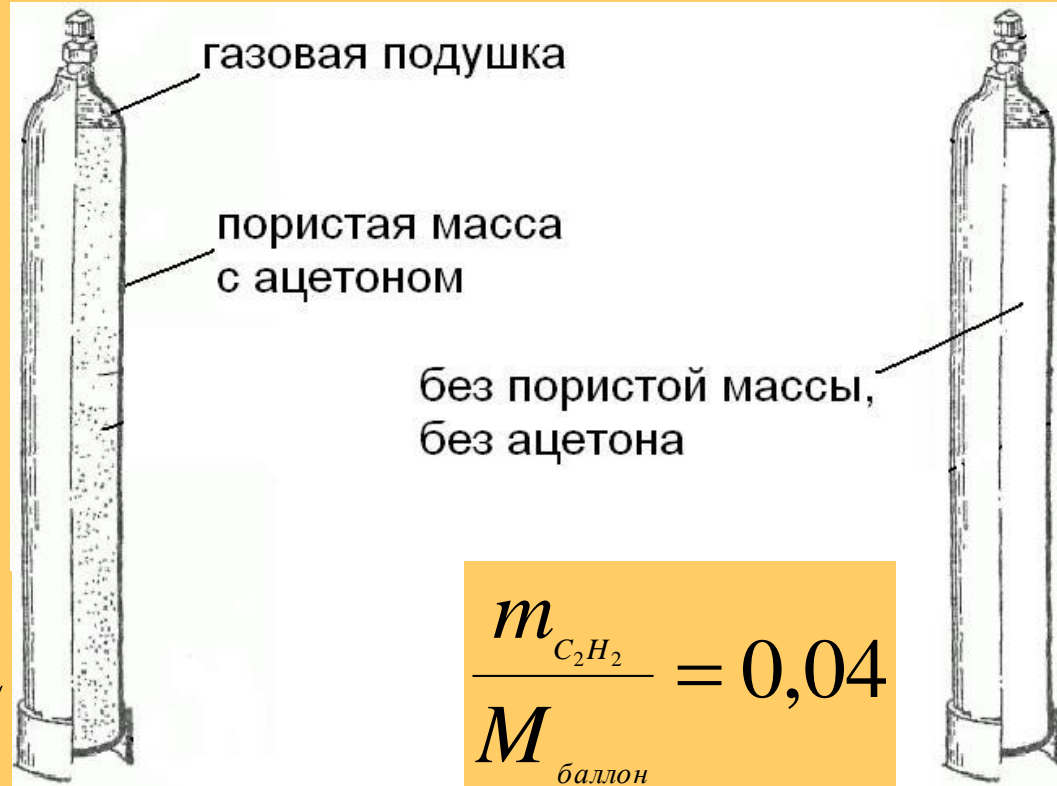


$$X_{\text{цилиндр}} \sim 2-3X_{\text{прямоуг}}$$



2. Ингибирование взрывного разложения ацетилен

2. Можно ли хранить ацетилен в баллоне в количестве в 2 раза превышающем обычное?

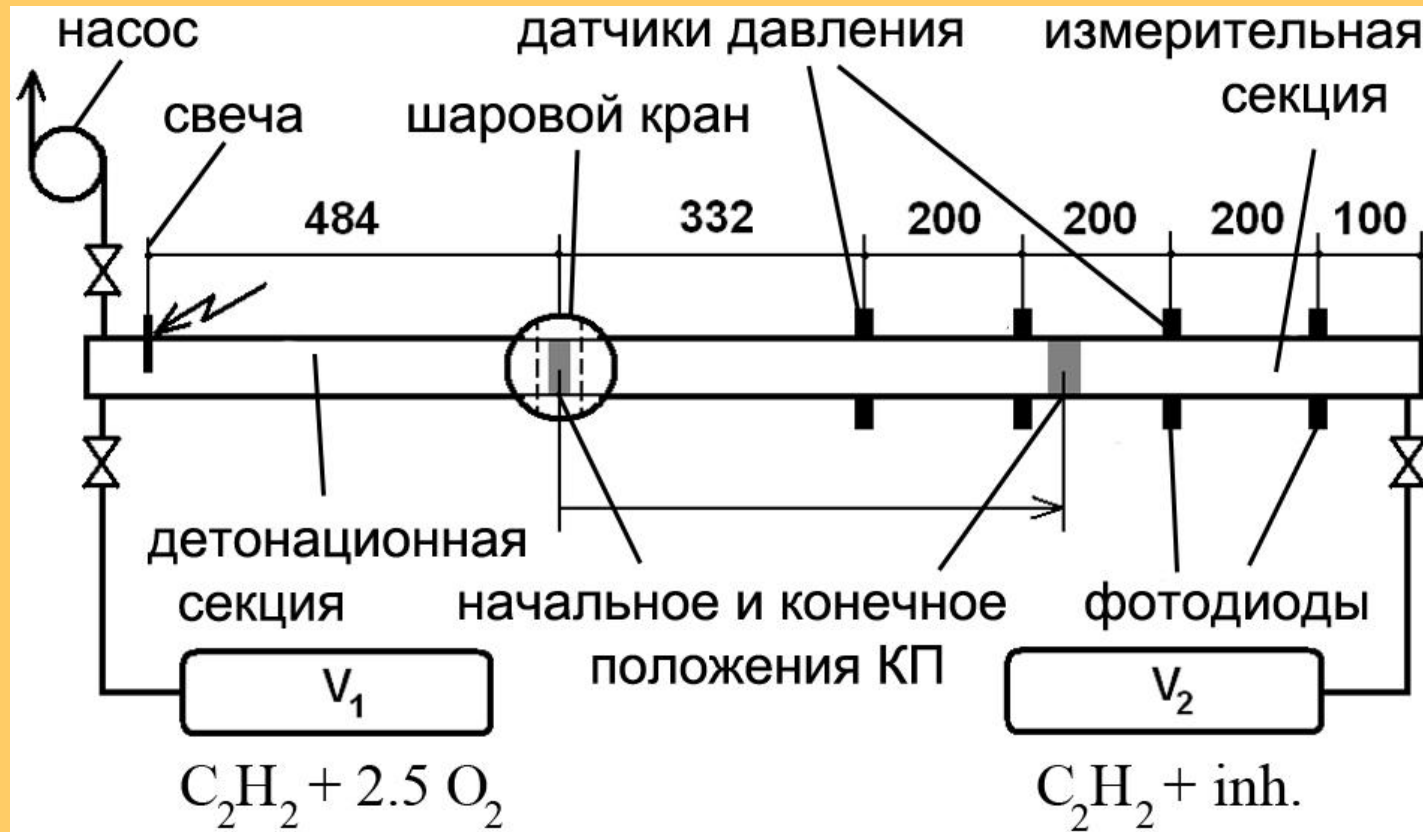


$$\frac{m_{C_2H_2}}{M_{\text{баллон}}} = 0,02$$

$$\frac{m_{C_2H_2}}{M_{\text{баллон}}} = 0,04$$

Можно ли избежать взрывного разложения ацетилена без пористой массы и ацетона?

Экспериментальная установка

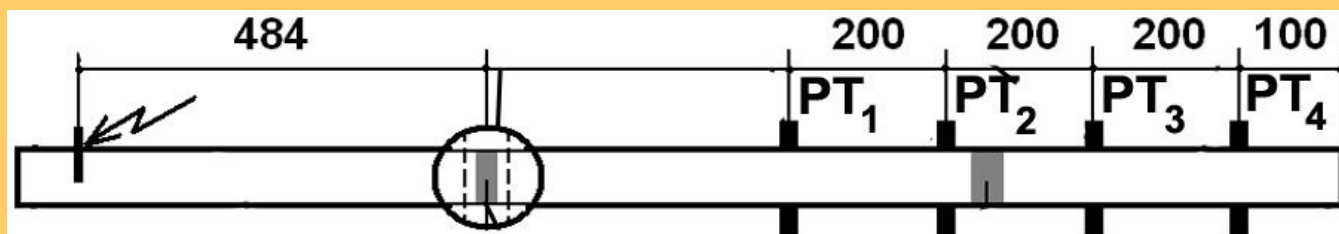


Внутренний диаметр 20 мм.

Начальное давление смесей – 1-3 атм.

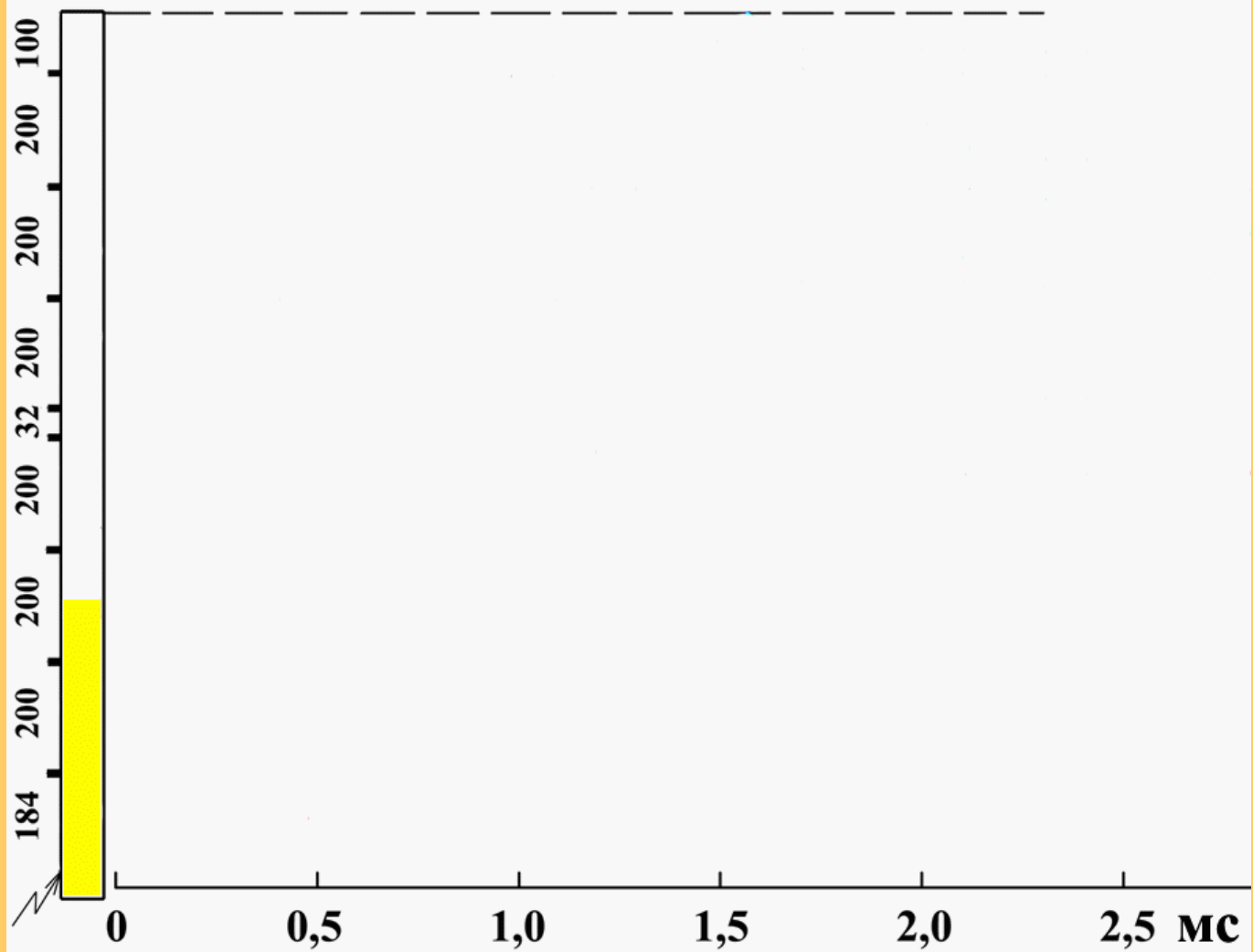
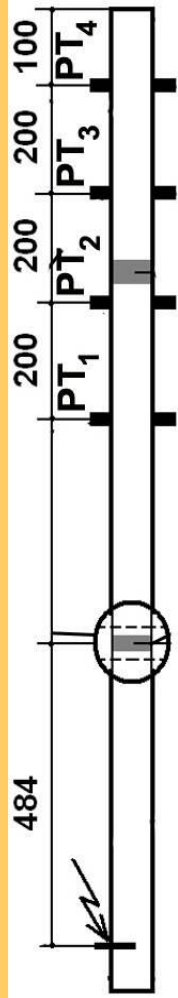
Максимальное давление за ударной/детонационной волной – 100 атм.

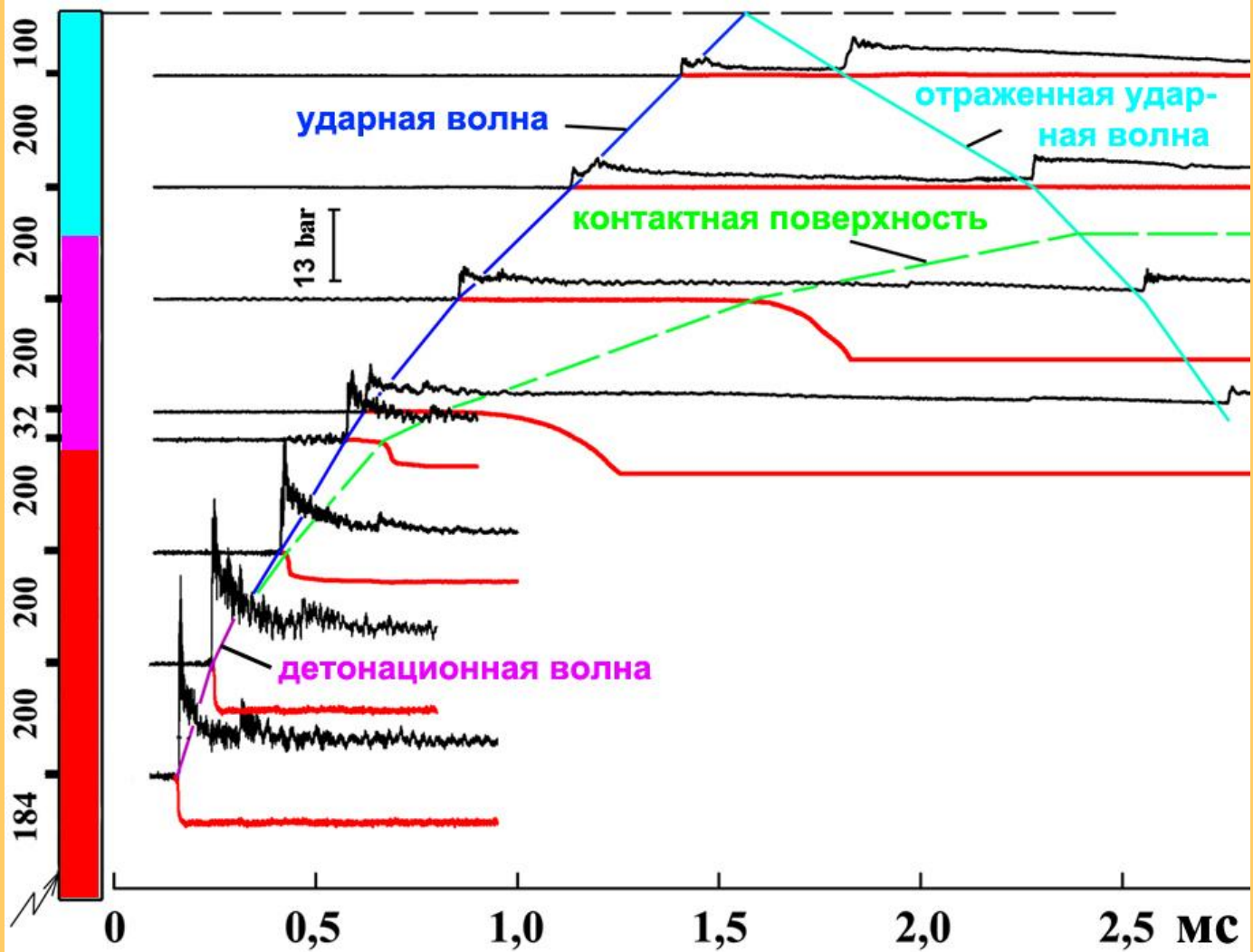
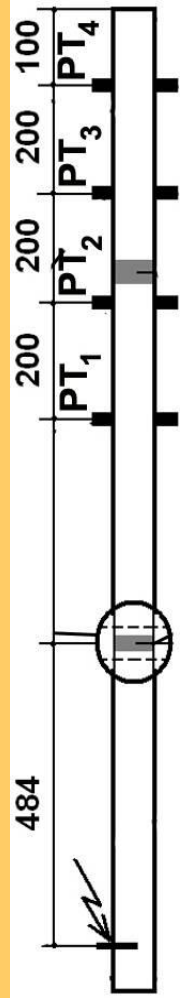
Экспериментальная установка



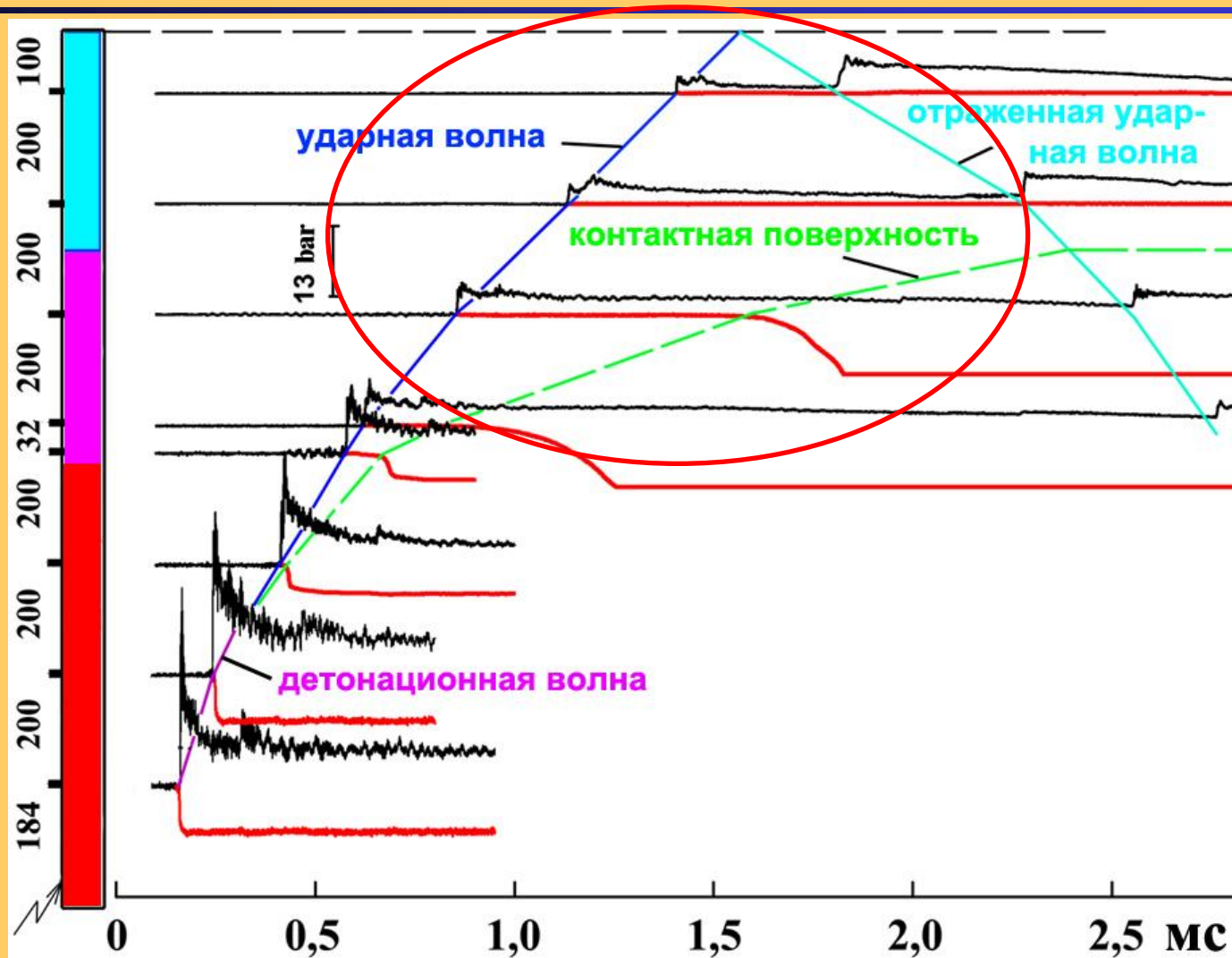
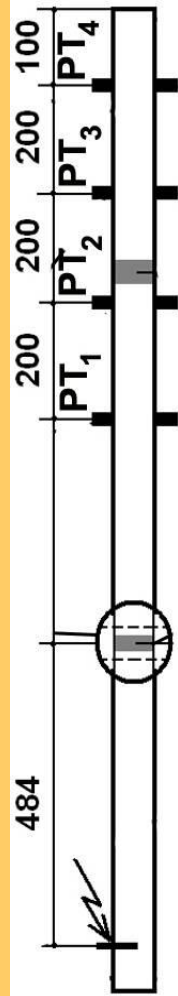


Ударное сжатие смеси





Ударное сжатие смеси

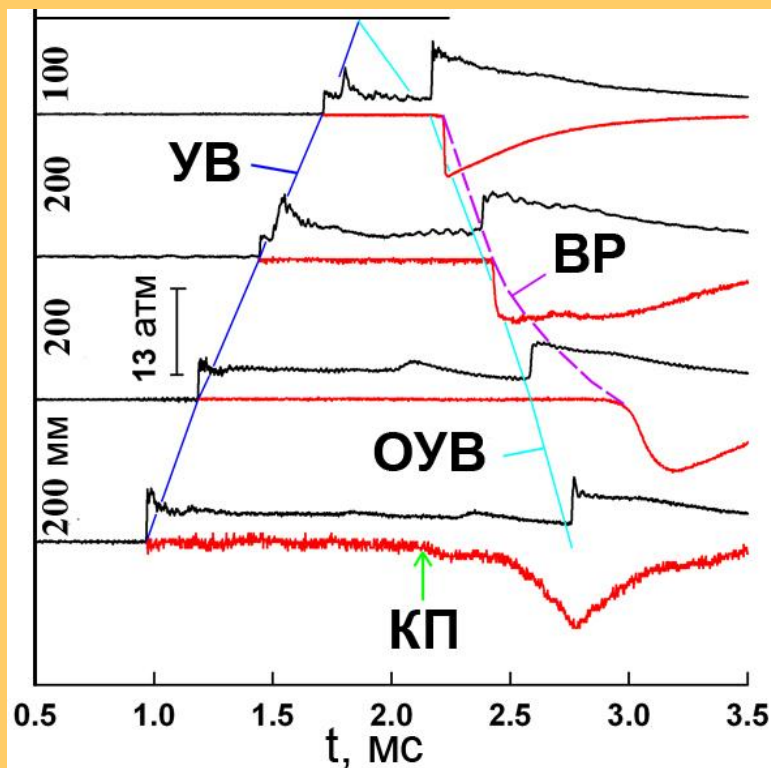


Ударно-волновые процессы в смесях ацетилена с пропан/бутаном



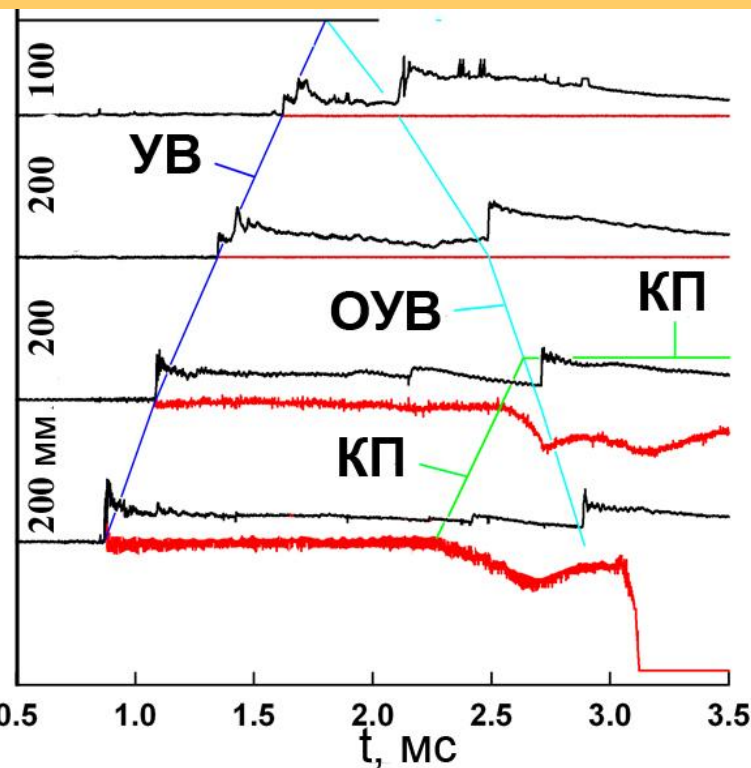
6 % пропан-бутана

Саморазложение ацетилена (ВР)



7 % пропан-бутана

Отсутствие саморазложения



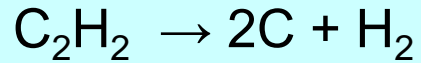
Траектории ударных волн и волны разложения

УВ – ударная волна, ОУВ – отраженная ударная волна, КП – контактная поверхность,
ВР – волна разложения



Отвод тепла или гибель радикалов?

Диссоциация ацетилена:



Q_1

Нагрев газовой смеси до 800 К

Q_2

Для термического эффекта необходимо: $Q_1 + Q_2 > 0$



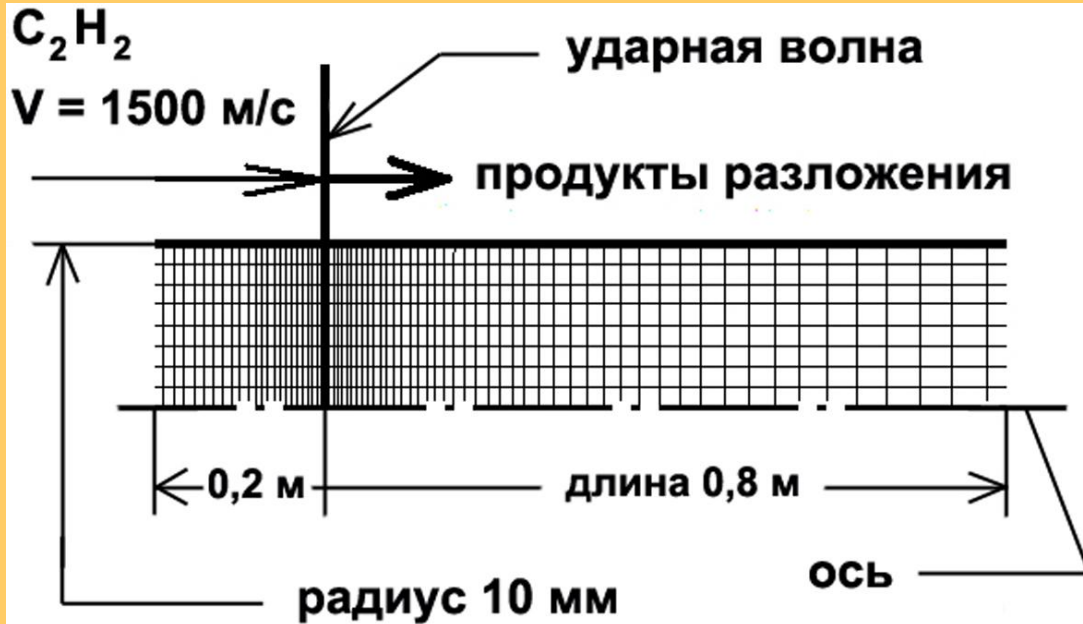
$P_0 = 1 \text{ атм}$

16% пропан/бутана вместо 7%
93% водорода вместо 12%



Разветвленно-цепной механизм

Моделирование взрывного разложения



Газодинамическая схема
Полная система уравнений
Навье-Стокса для
мультикомпонентной смеси
газов

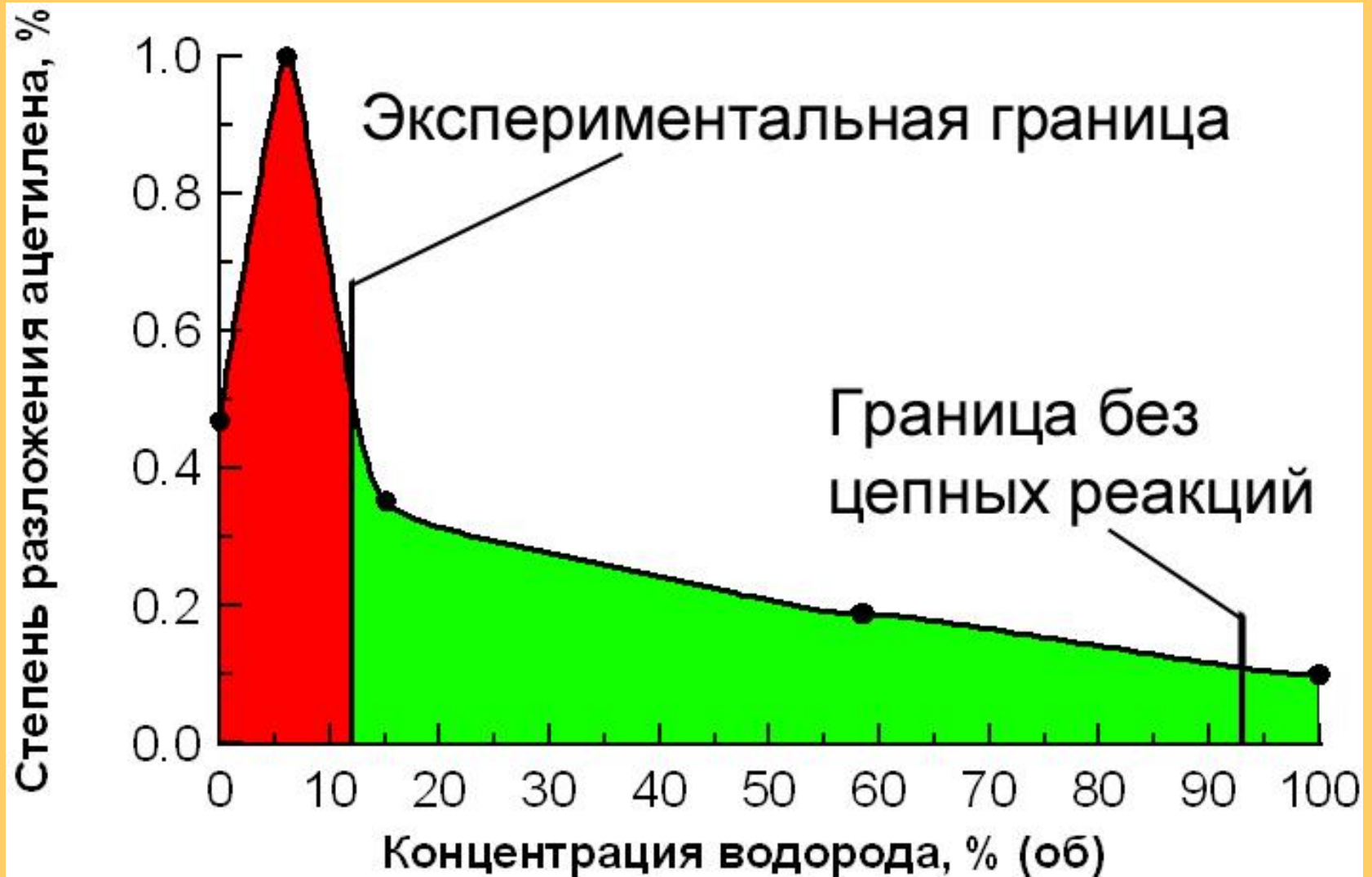
Начальные и граничные условия

1. X % ацетилена + $(1-X)$ % водорода перед ударной волной, $0 < X < 100$
2. Начальное давление смесей 1 атм
3. Ударная волна стационарна, $V = 1500$ м/с
4. Стенки гладкие, нетеплопроводные, некаталитичные
5. Течение ламинарное

Кинетическая схема

1. Упрощенная модельная схема на основе схемы *Танзавы и Гардинера*.
2. Реакции только в газовой фазе. Гетерогенный процесс формирования частиц сажи не рассматривался

Влияние ингибитора на разложение ацетилена



3. Воспламеняемость газообразных горючих смесей



- **3. Можно ли свистком предотвратить или задержать воспламенение и детонацию?**



История

Теория процессов зажигания газовых смесей

Д. А. Франк-Каменецкий: - *механизм воспламенения газовой смеси обусловлен в основном теплопроводностью*

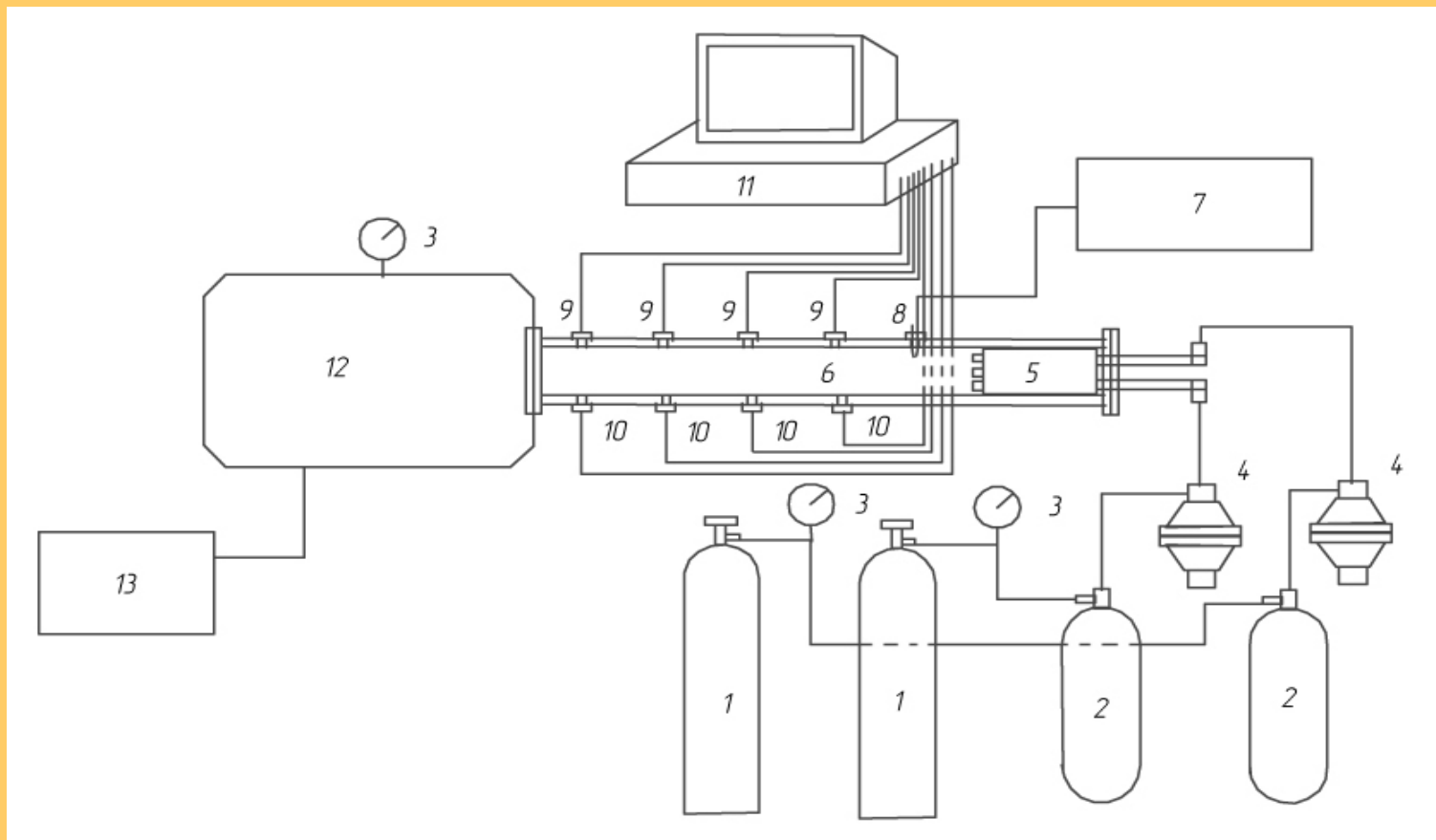
Кумагаи : **1** - *поток приводит к снижению воспламеняемости смеси*

2- *эффект увеличения скорости горения при воздействии на него звука.*

Цель

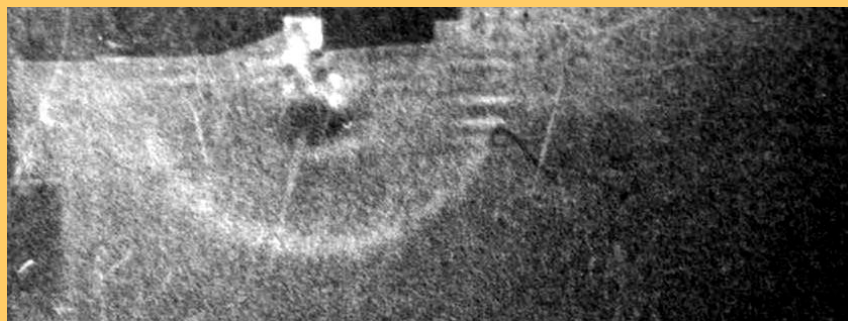
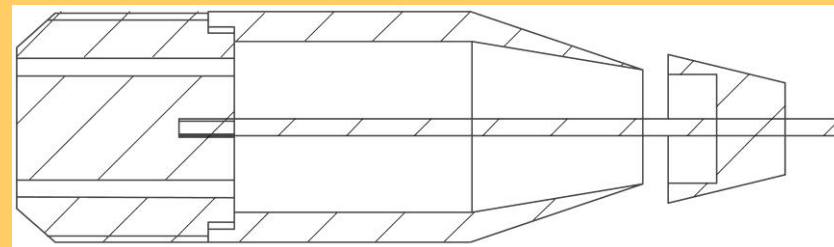
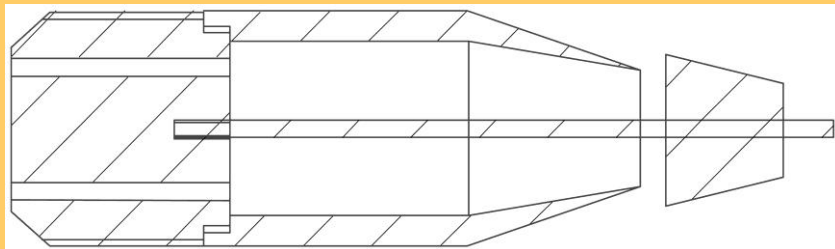
Влияние воздействия акустического поля на воспламеняемость газообразных горючих смесей

Экспериментальная установка



1 – баллоны с компонентами горючей смеси, 2 – буферные емкости системы подачи компонентов топлива, 3 – манометры, 4 – пневмоклапаны, 5 – инжекторный блок, 6 - ДКС, 7 – система инициирования, 8 – искровой разрядник, 9 – датчики давления, 10 – фотодетекторы, 11 – компьютер «Pentium III» с осциллографическими платами

Инжекторы



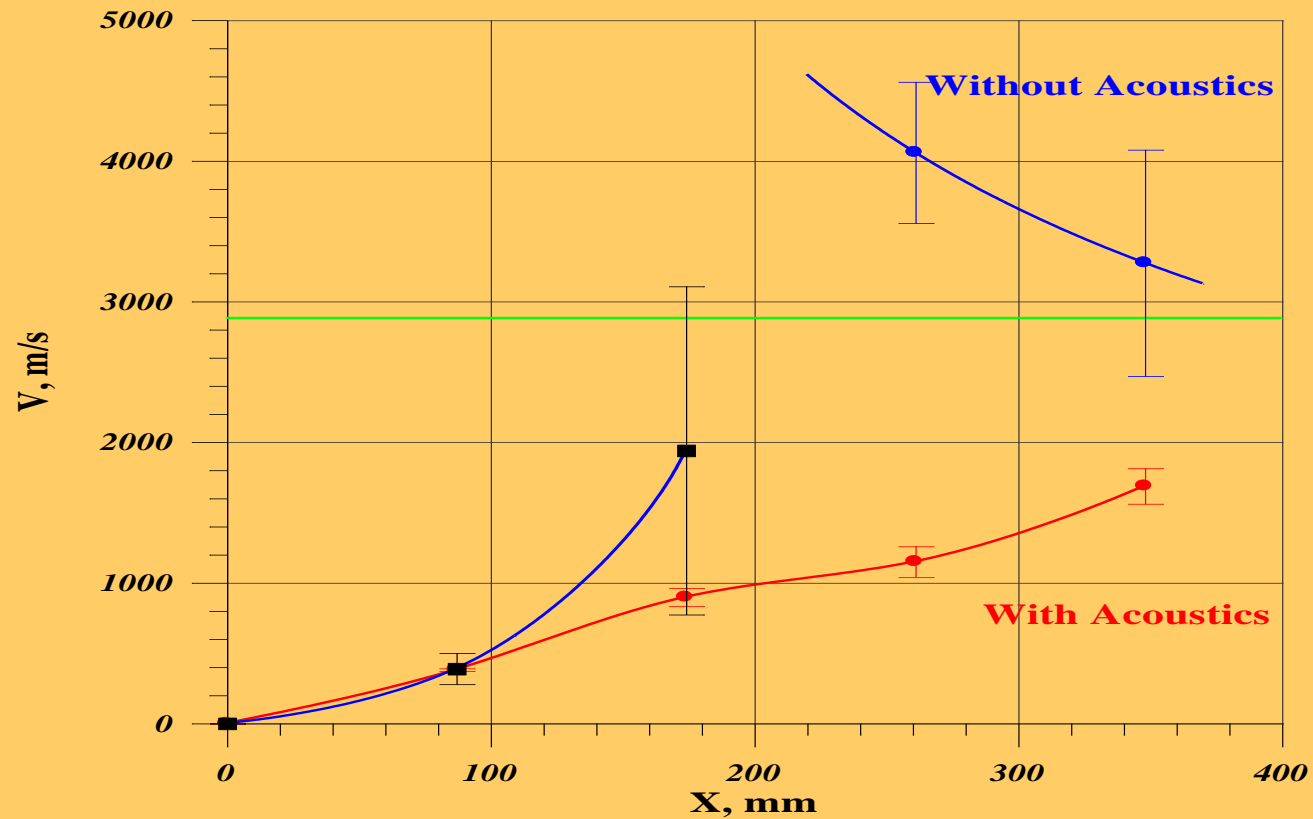
Радиальный инжектор

Звуковой генератор

$t=48 \mu\text{с}$



Предотвращение ПГД



$ER=1.1$ $R_{DKC}=1.4$



Математическая модель

Гидродинамический перенос горючей смеси с учетом вязкости, многокомпонентной диффузии, теплопроводности и выделения энергии за счет окисления водорода

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + \delta_{ij} P - \sigma_{ij}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon + \frac{1}{2} \rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h + \frac{1}{2} \rho u_i u_j u_j + q_i - u_j \sigma_{ij}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} c_m \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} (c_m \rho u_i) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho D \frac{\partial c_m}{\partial x_i}) = -\rho \left(\frac{dc_m}{dt} \right)_{\text{хим}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right), \quad (5)$$

$$q_i = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho D \sum_m h_m \frac{\partial c_m}{\partial x_i}, \quad (6)$$

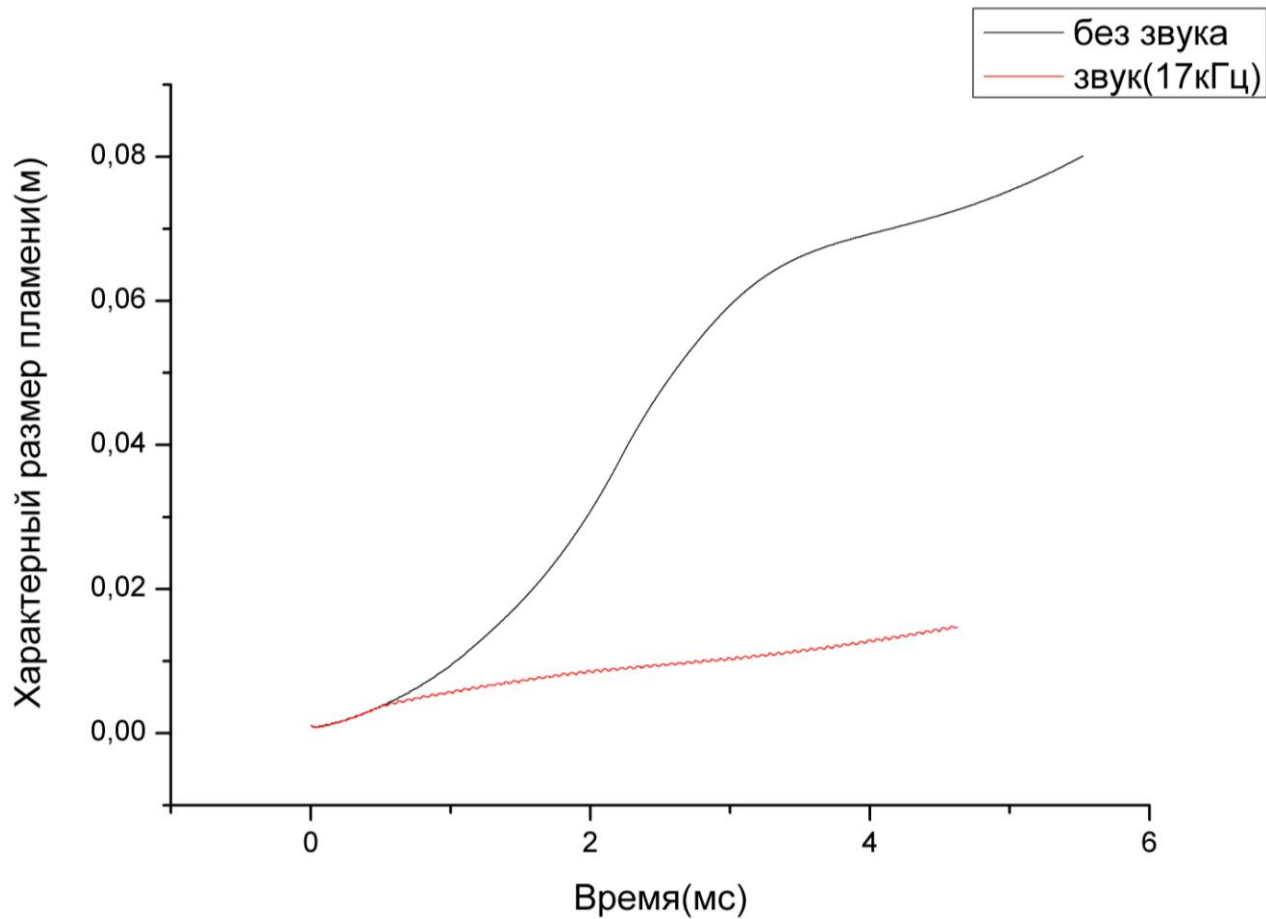
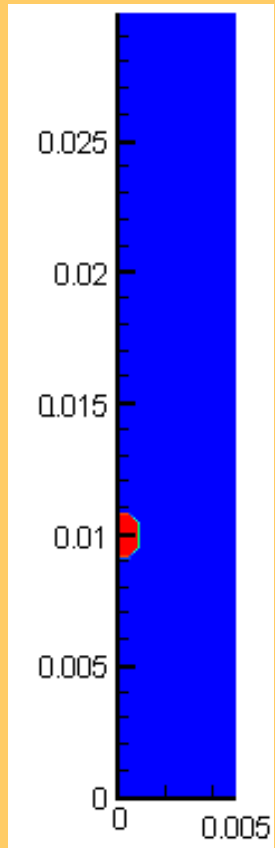
$$\varepsilon = c_v T + \sum_m h_m c_m, \quad (7)$$

$$P = R \rho T \sum_m \frac{c_m}{A_m}, \quad (8)$$

$$h = \varepsilon + P / \rho, \quad (9)$$

$$c_v = \sum_m \frac{c_m}{A_m} (c_{pm} - R), \quad (10)$$

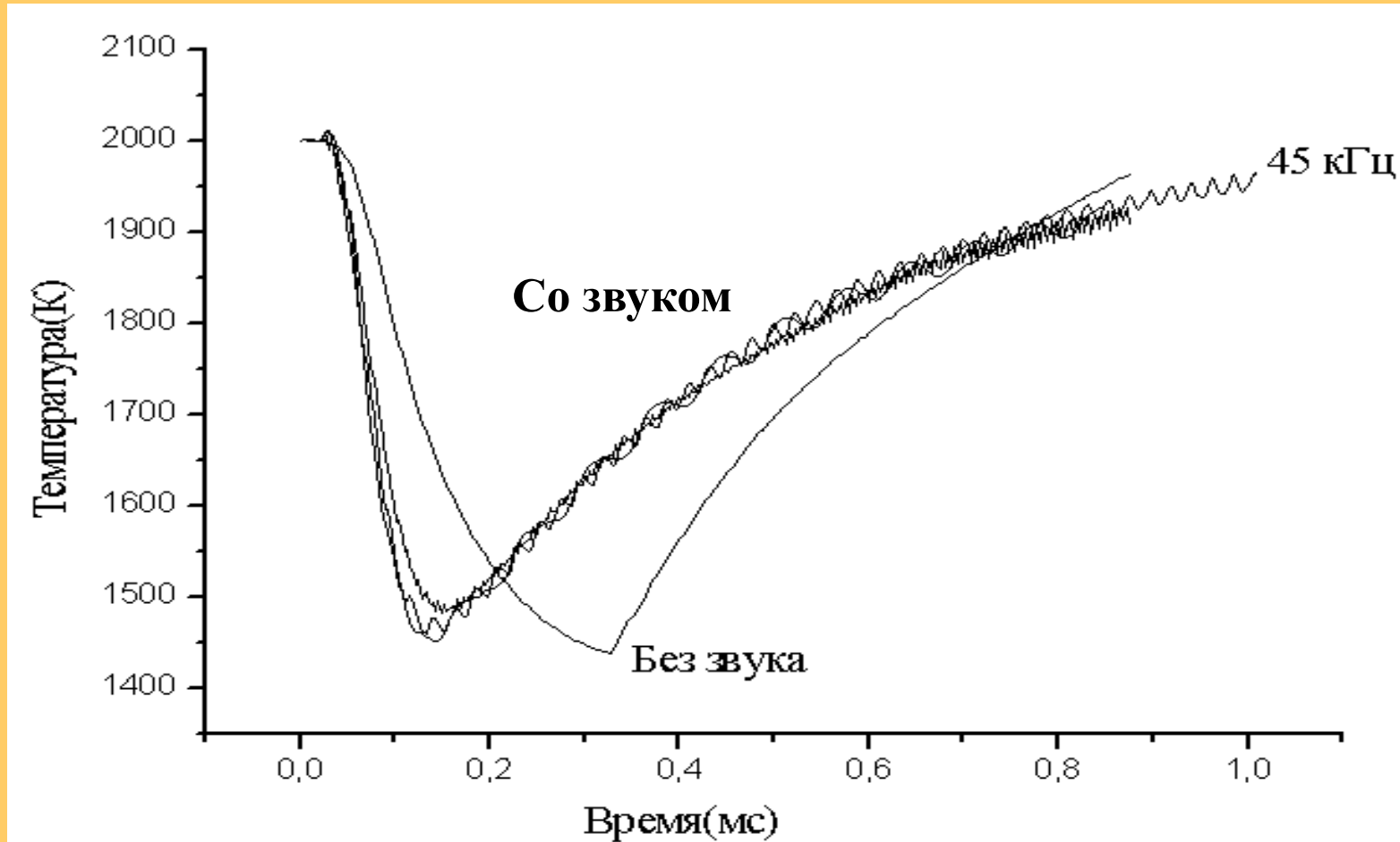
Распространение пламени



Диаметр затравки $d=1.6\text{mm}$, начальная температура в центре очага - $T=2500\text{K}$. Амплитуда давления звуковых колебаний равнялась 2% от атмосферной. Диаметр трубы- $d=1\text{ см}$.

ER=1.1

Ускорение процесса остывания очага горения

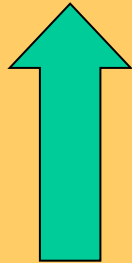


Зависимость максимальной температуры пламени от времени (ER=1)



4. Как повлияют местные сужения или расширения канала на переход горения в детонацию ?

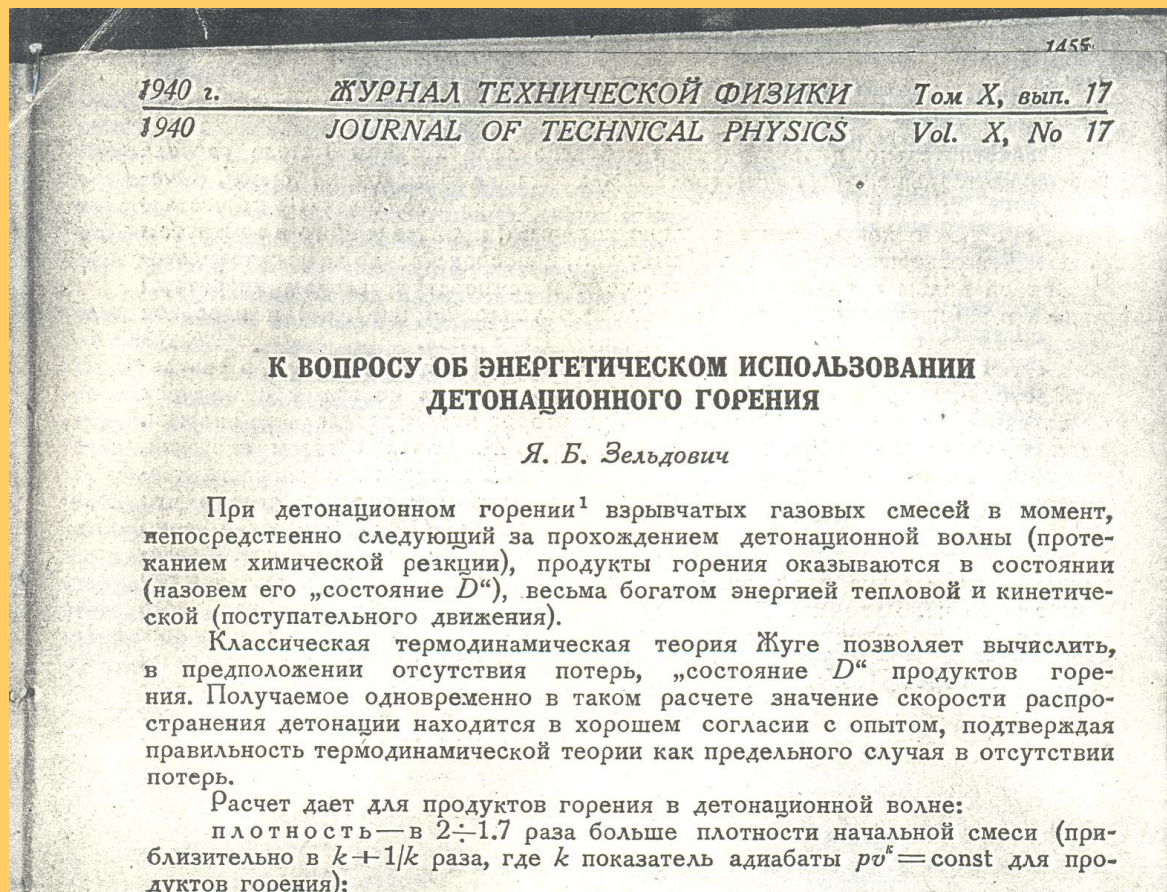
Как ускорить?



Перспективные
энергетические установки

Воспламенение

Эффективность детонационного сжигания



Я.Б. Зельдович, 1940

$$\eta_{\text{детонация}} > \eta_{V=\text{const}} > \eta_{P=\text{const}}$$

First PDE powered flight, January 31, 2008

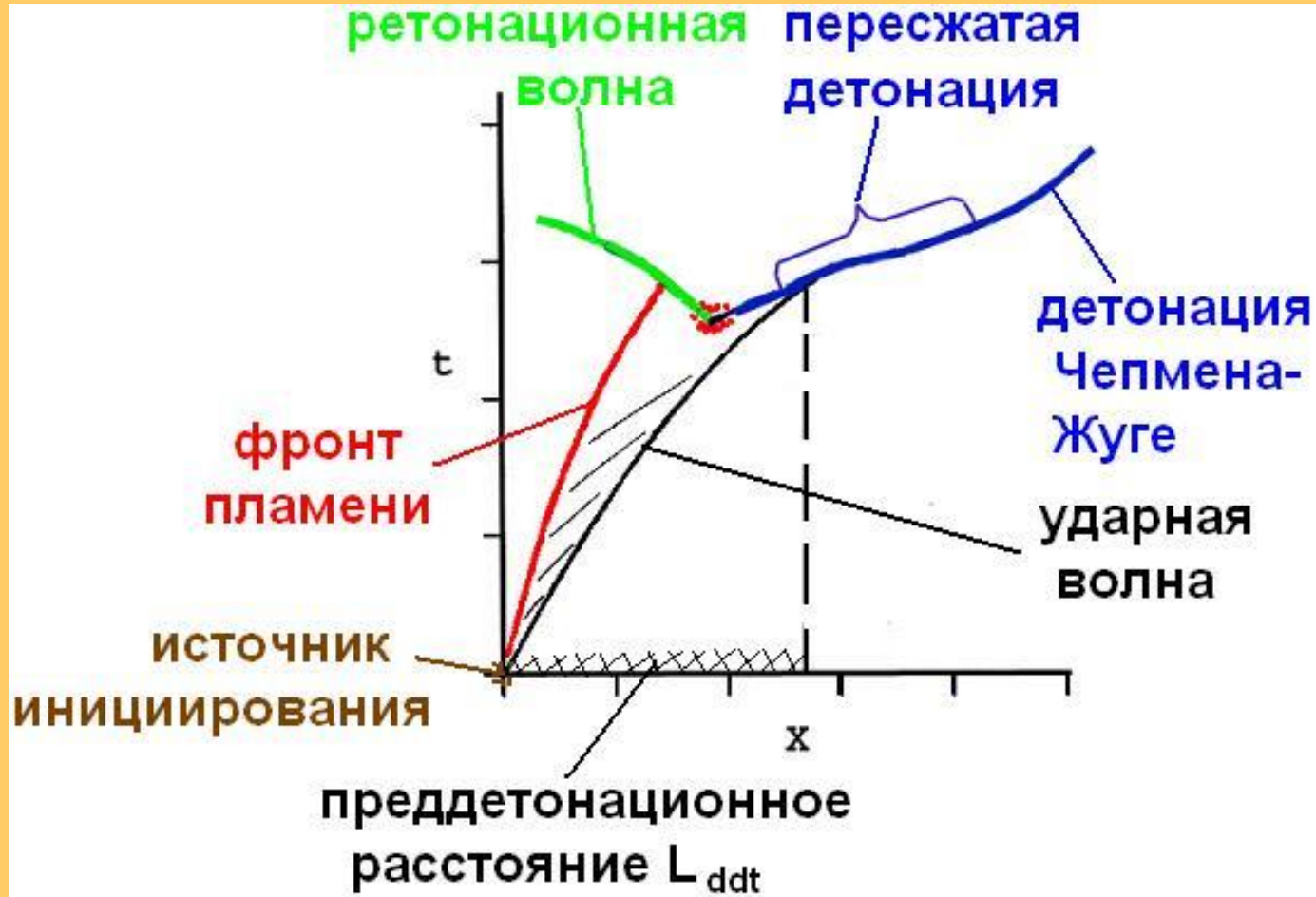


PDE-powered cruise lasted about 10 seconds

© AFRL

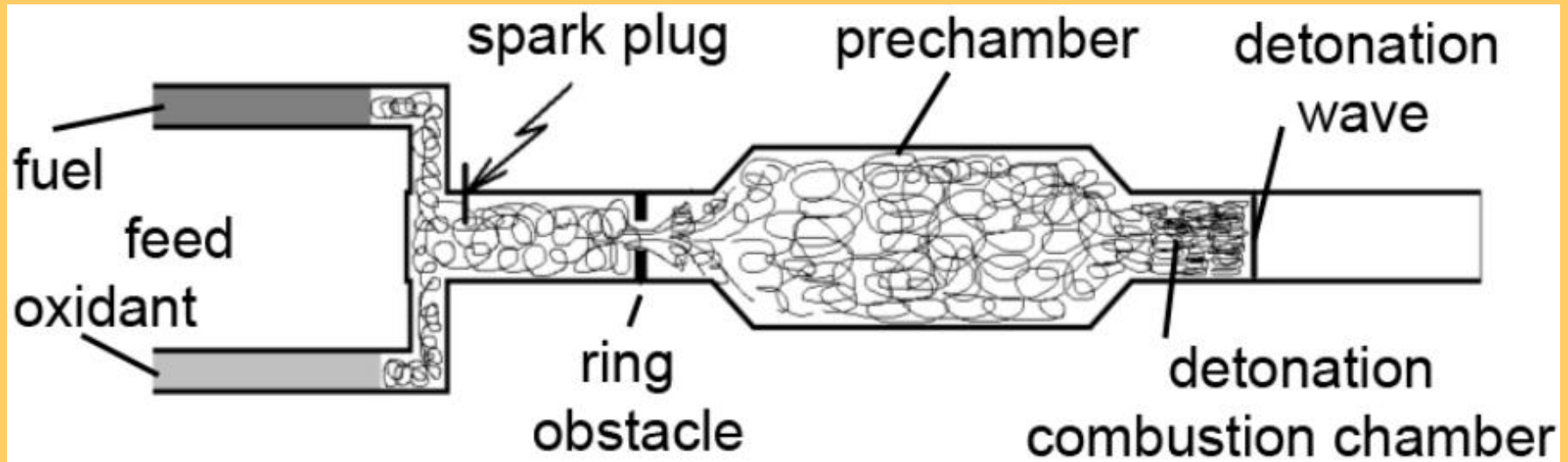


Переход горения в детонацию



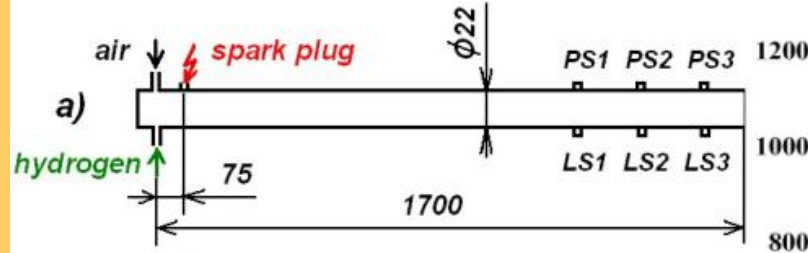
X-t- диаграмма перехода горения в детонацию при слабом инициировании

Схема канала для моделирования формирования детонации

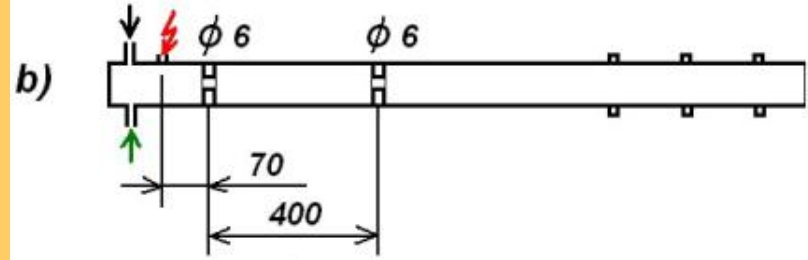


1. Степень перекрытия канала камеры сгорания – 0,94
2. Степень расширения форкамер – 2,56 мм, длина – 620 мм

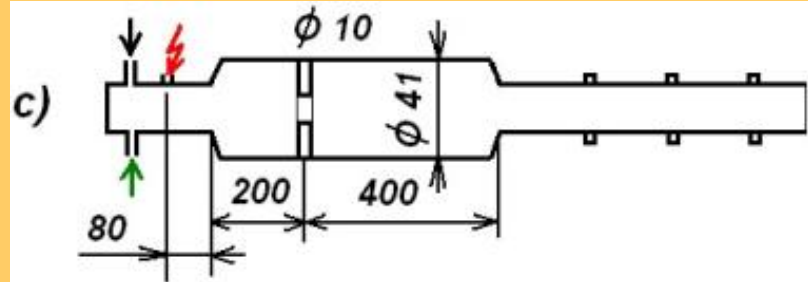
Сокращение ПГД более чем в два раза



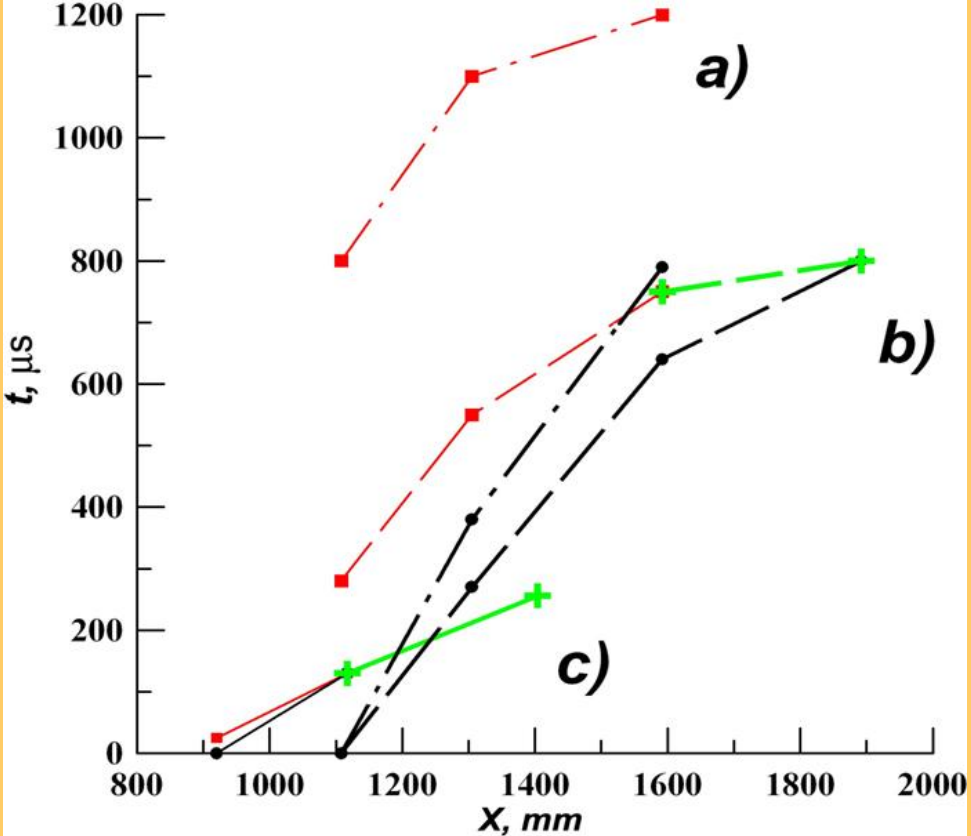
a) Без кольцевых преград и расширений



b) С двумя кольцевыми преградами (степень перекрытия 0,74–0,94)



c) С расширением и одной кольцевой преградой внутри



X-t-диаграммы формирования детонации.
 Черные линии – ударные волны,
 Красные линии – фронты пламени,
 Зеленые линии – детонационные волны.

5. Влияние магнитного поля на инициирование детонации



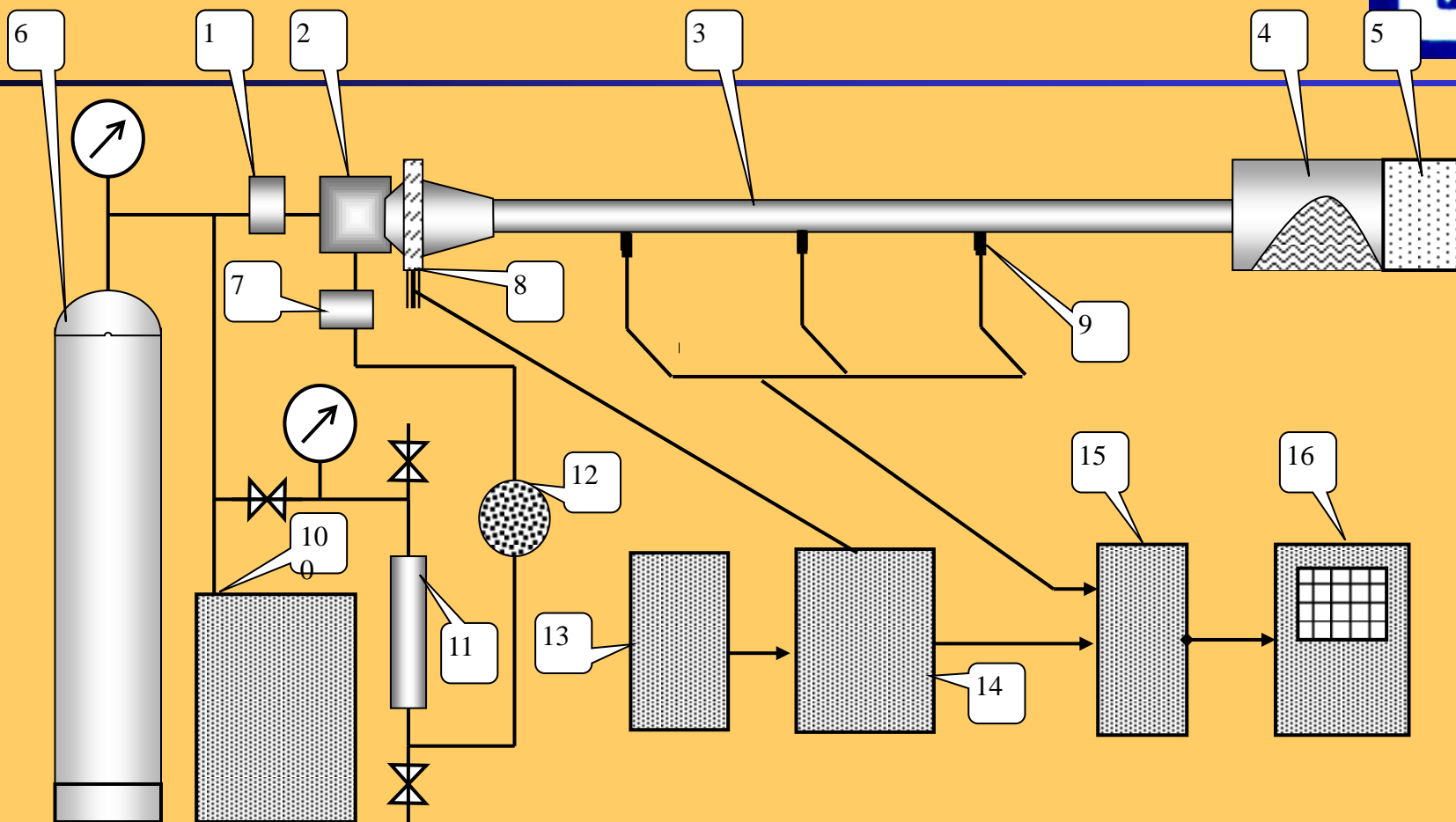
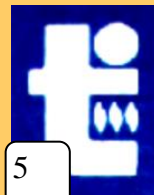
**5. Можно ли в 2 раза снизить энергию
инициирования детонации с помощью
магнитного поля?**

Проблема:



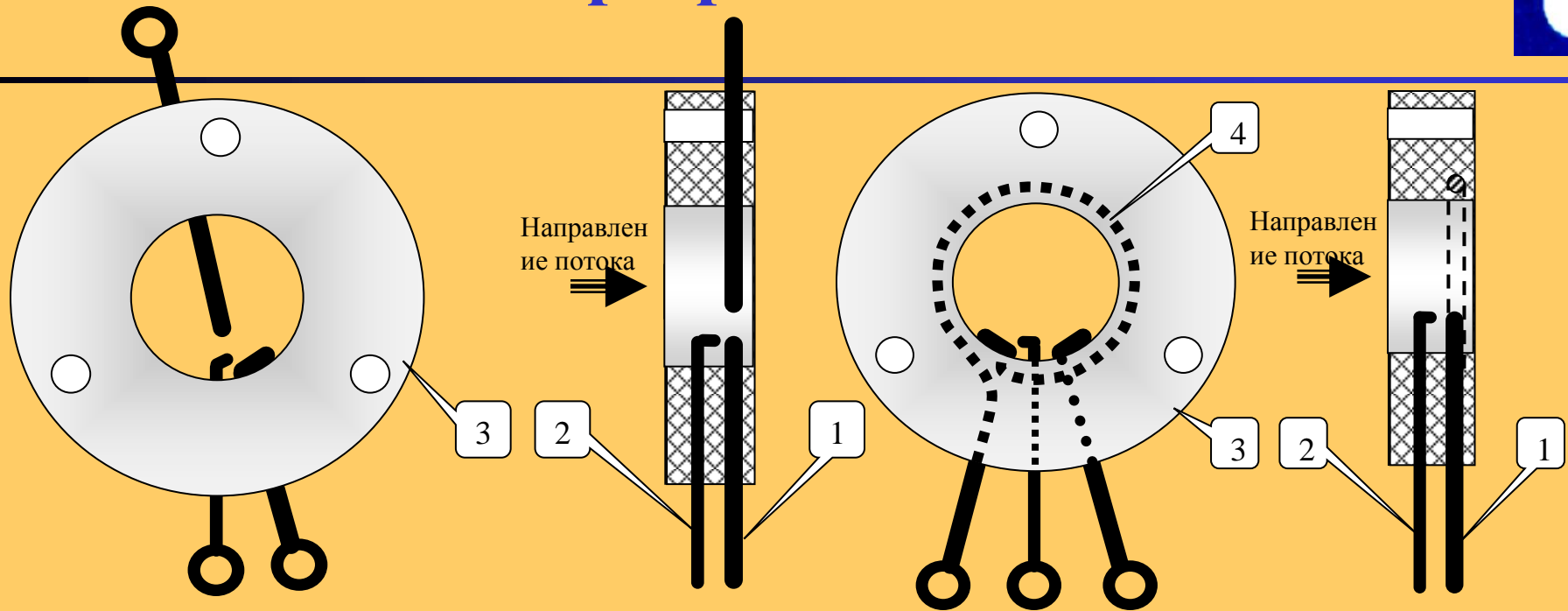
**малая часть энергии накопителя
- конденсаторной батареи –
переходит в детонационную смесь**

Схема экспериментальной установки



1-воздушный клапан, 2-форсунка, 3-детонационная труба, 4-расширитель, 5-глушитель, 6-баллон воздушный, 7-топливный клапан, 8-разрядники, 9-датчики давления, 10-воздушный компрессор, 11-топливная ёмкость, 12-топливный фильтр, 13-блок управления, 14-блок питания разрядников, 15-аналого-цифровой преобразователь, 16-регистрирующий компьютер.

Схемы разрядников

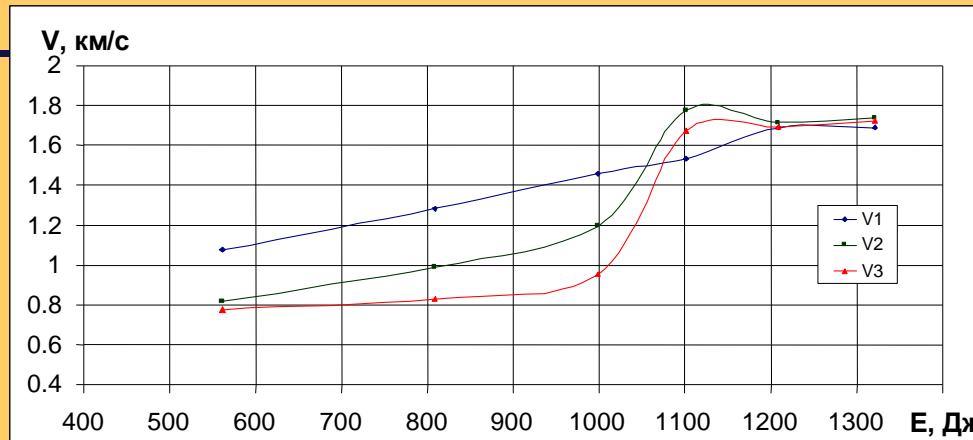


а

б

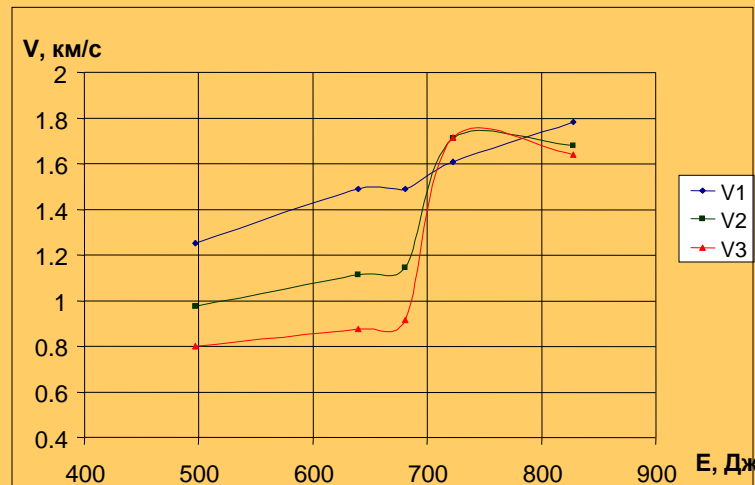
Схема разрядников без (а) и с (б) поддержкой магнитным полем. Величина разрядного промежутка 7 мм. 1 – Силовой электрод. 2 – Иницирующий электрод. 3 – Корпус из поликарбоната. 4 – дополнительный виток (накопительная емкостью $C1 = 500$ мкф, напряжение - 1600 В, время разряда – 40 мкс, средний ток – 20 000 А энергия накопителя – 640 Дж.

Магнитное поля разрядника позволяет до двух раз уменьшить энергию инициирования детонации

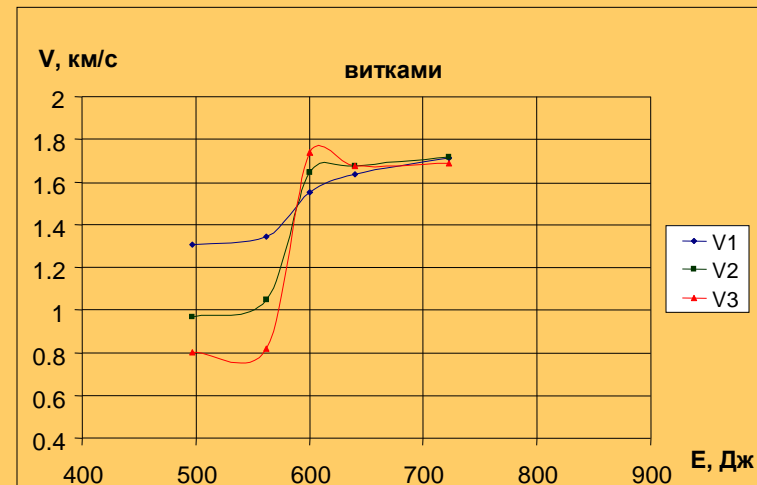


B=0

B=0.7 Тл



B=1.5 Тл



Зависимость скорости волны в гладкой детонационной трубе от энергии ёмкостного накопителя для ТВС с гексаном. а) – Разрядник 1. б) - Разрядник 2. в) - Разрядник 3. V1 – первая база от разрядника. V2 - вторая база от разрядника. V3 - третья база от разрядника.

Перспективы развития



- Разработка норм и стандартов безопасного хранения водорода
- Разработка фундаментальных основ новой технологии безопасного хранения и использования сжиженного и газообразного ацетилена.
- Управление воспламенением и распространением горения с помощью акустического воздействия
- Повышение термодинамической эффективности преобразования химической энергии топлива в полезную работу путем импульсного детонационного горения.
- Повышение эффективности воспламенения топливно-воздушных смесей с использованием собственного магнитного поля искрового разрядника.



Спасибо за внимание!

