

СЕДОВ-100

КАВИТАЦИОННЫЙ КЛАСТЕР ПАРОВЫХ МИКРОПУЗЫРЬКОВ как НАНО-ТЕРМОЯДЕРНАЯ БОМБА

Р.И. Нигматулин

Российская академия наук

Институт океанологии им. П.П. Ширшова

nigmar@ocean.ru

*Конференция по механике сплошной среды,
посвященная 100-летию академика Л.И. Седова*

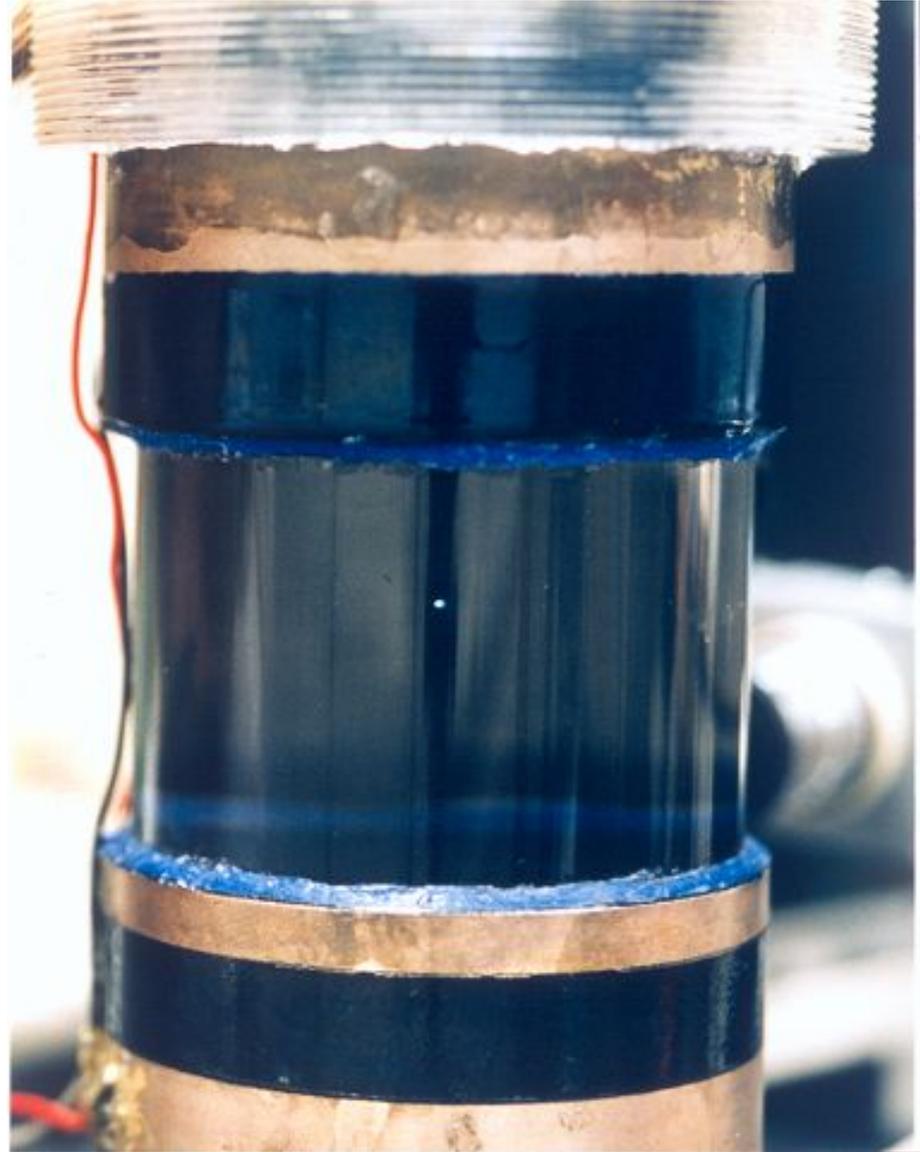
12-13 ноября 2007 г.

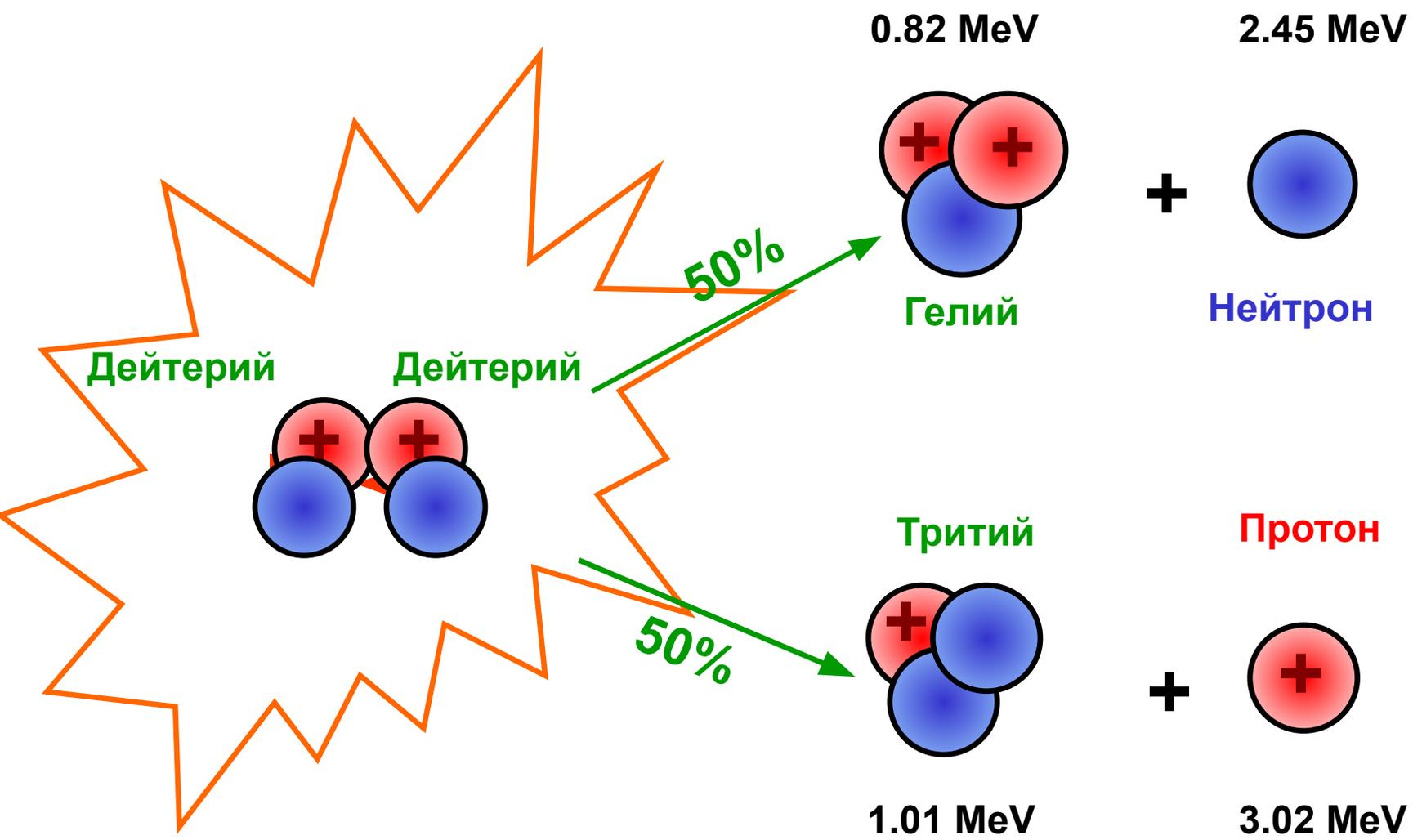
Multibubble & Single Bubble SONOLUMINESCENCE

MBSL



SBSL





СИНТЕЗ ЯДЕР ДЕТЕРИЯ

THE START

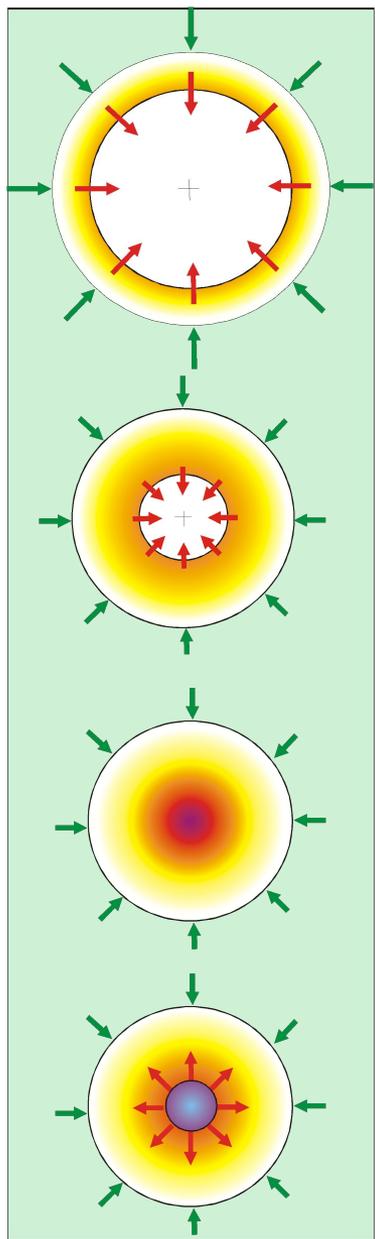
1. R. Nigmatulin, R. Lahey (Jr) «Perspective of Bubble Fusion» Nuclear Reactor Thermohydrolics (NURETH-7), Invited Plenary Lecture, Saratoga-Springs, New-York, USA, 1995)

2. R. Nigmatulin, «Gas Dynamics of Sonoluminescence» NATO ASI on Sonochemistry and Sonofusion (Invited Lecture, Seattle, Washington, USA, 1997);

THE TEAM

- **Oak Ridge National Laboratory, TN, USA**
Purdue University, W. Lafayette, IN, USA
R.P. Taleyarkhan, C.D. West, J.S. Cho, Y. Xu
- **Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA**
R. T. Lahey (Jr), R.C. Block
- **Российская академия наук, Россия**
Р.И. Нигматулин, И.Ш. Ахатов, Р.Х. Болотнова, Н.К. Вахитова, А.С. Топольников

КУМУЛЯТИВНОЕ СХОЖДЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ («микроводородная бомба»)



Инициирование сферической ударной волны на сходящейся межфазной границе

Автомодельная кумуляция сферической и цилиндрической ударной волны из бесконечности

- Guderley, 1942;
- Ландау и Станюкович, 1955;
- Нигматулин, 1967 (детонационная волна)
- Хабиров С.В. 2007

Фокусировка сферической волны в центре пузырька

Сферическая волна после отражения от центра пузырька

КАК УСИЛИТЬ СВЕРХСЖАТИЕ ?

- **УСИЛИТЬ АКУСТИЧЕСКУЮ ВОЛНУ** ($\Delta p_i \sim 15-20 \text{ bar}$)

- **ГАЗ В ПУЗЫРЬКЕ: КОНДЕНСИРУЮЩИЙСЯ ПАР (ПАРОВАЯ КАВИТАЦИЯ)**

- Минимизировать торможение жидкости
- Достичь большей кинетической энергии жидкости

- **ХОЛОДНАЯ ЖИДКОСТЬ**

- Более интенсивная конденсация

- **ЖИДКОСТЬ С ТЯЖЕЛЫМИ МОЛЕКУЛАМИ (ОРГАНИКА)**

- Низкая скорость звука в паре ($c_g = \sqrt{\frac{\gamma R}{\mu} T}$, где μ - молекулярный вес)
- Большие значения коэффициента конденсации (аккомодации)
($\alpha \cong 1$, вместо $\alpha \cong 0.04$ для воды)
- Высокая кавитационная прочность жидкости

- **КЛАСТЕР ПУЗЫРЬКОВ**

Кинетическая энергия сходящейся жидкости вокруг пузырька

$$K \approx \Delta p R_{\max}^3$$

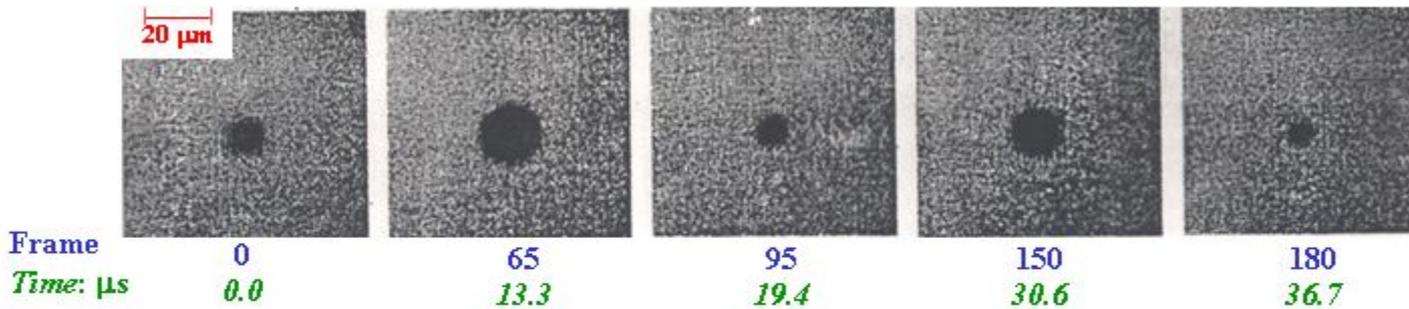
Наш эксперимент	Однопузырьковая сонолюминесценция
$\Delta p \sim 15 \text{ bar}$	$\Delta p \sim 1.5 \text{ bar}$
$R_{\max} \sim 500 \text{ }\mu\text{m}$	$R_{\max} \sim 50 \text{ }\mu\text{m}$
Более слабое торможение сходящейся жидкости из-за конденсации пара	Масса газа в пузырьке = = const

Кинетическая энергия K в 10^5 раз больше, чем в однопузырьковой сонолюминесценции

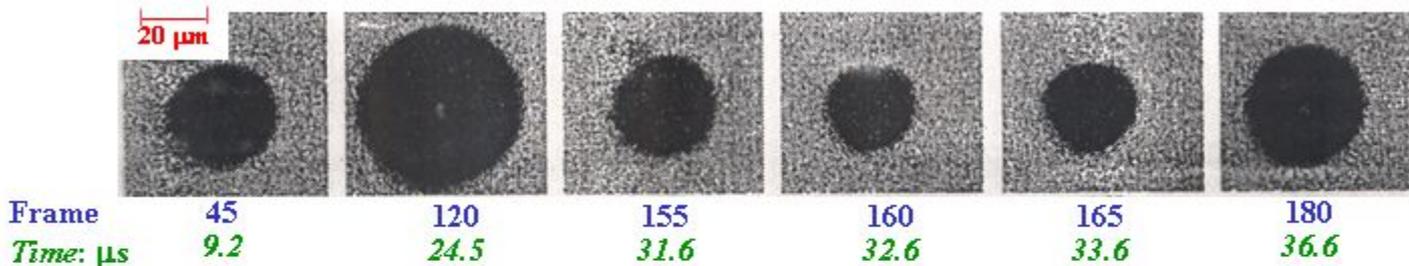
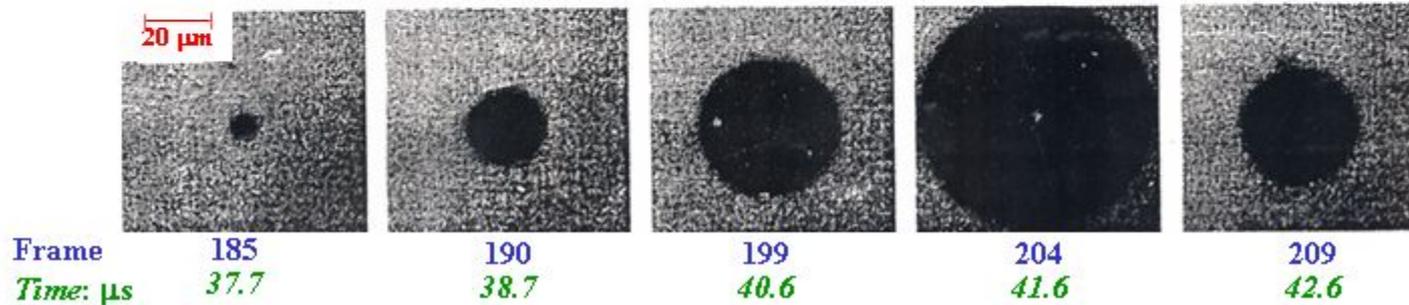
ШАНС: $T_{\max} \sim 10^8 \text{ K}$

НО: Обеспечить сферичность схлопывающегося пузырька!!!

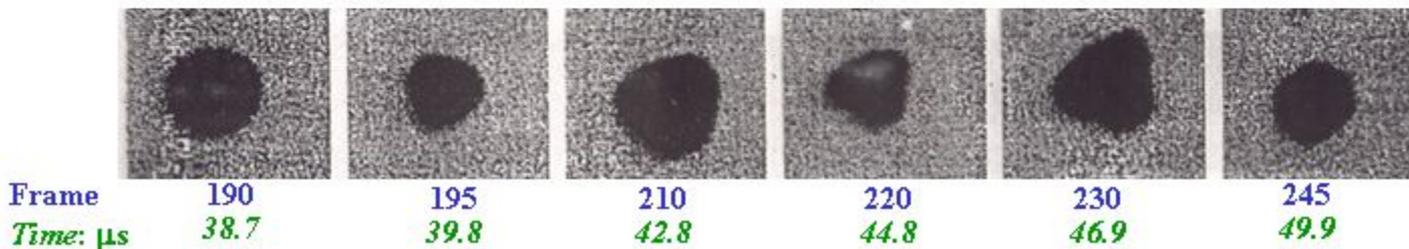
Фотографии осциллирующих пузырьков



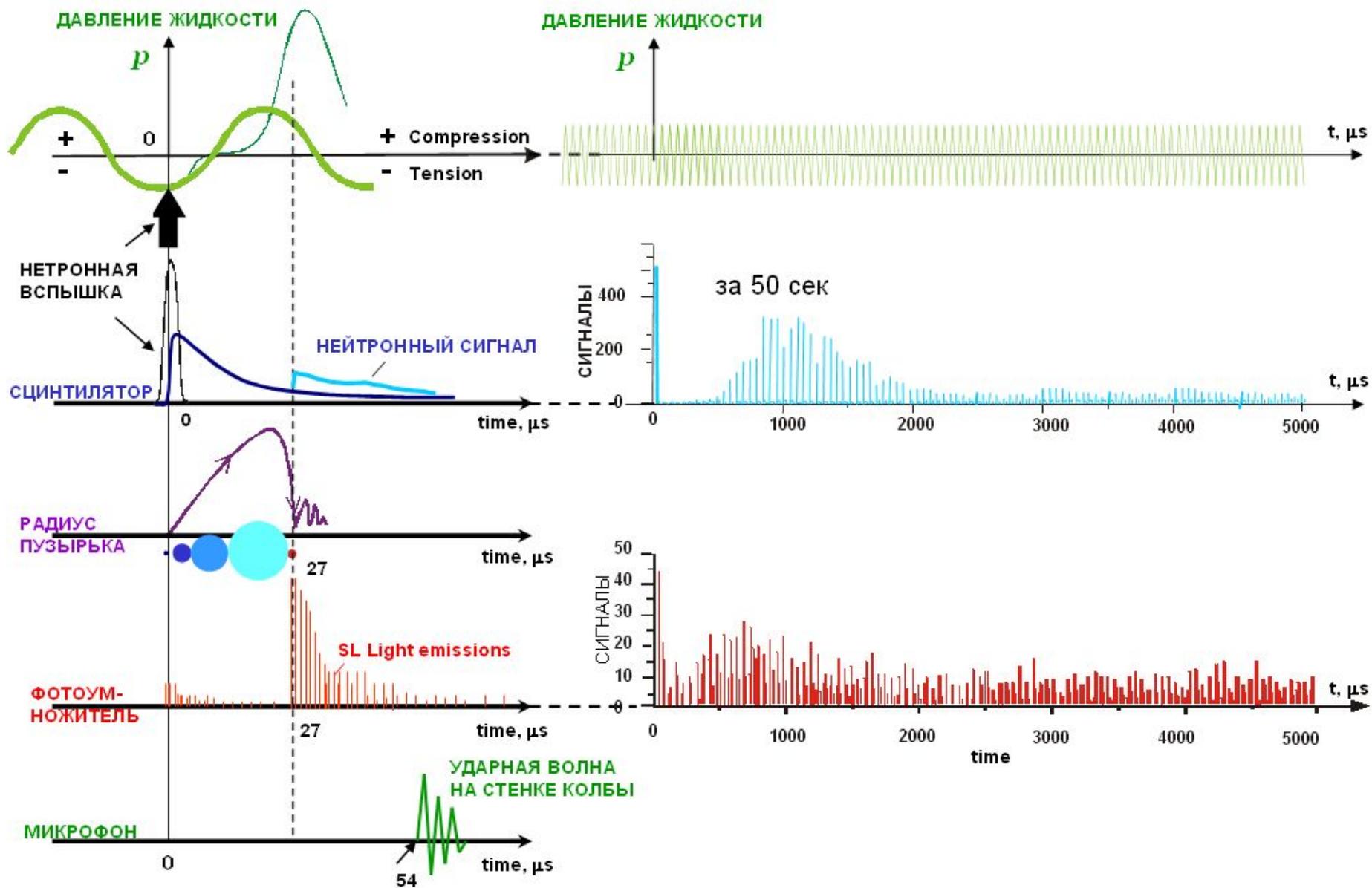
Сферичность –
- Сонолюминесценция



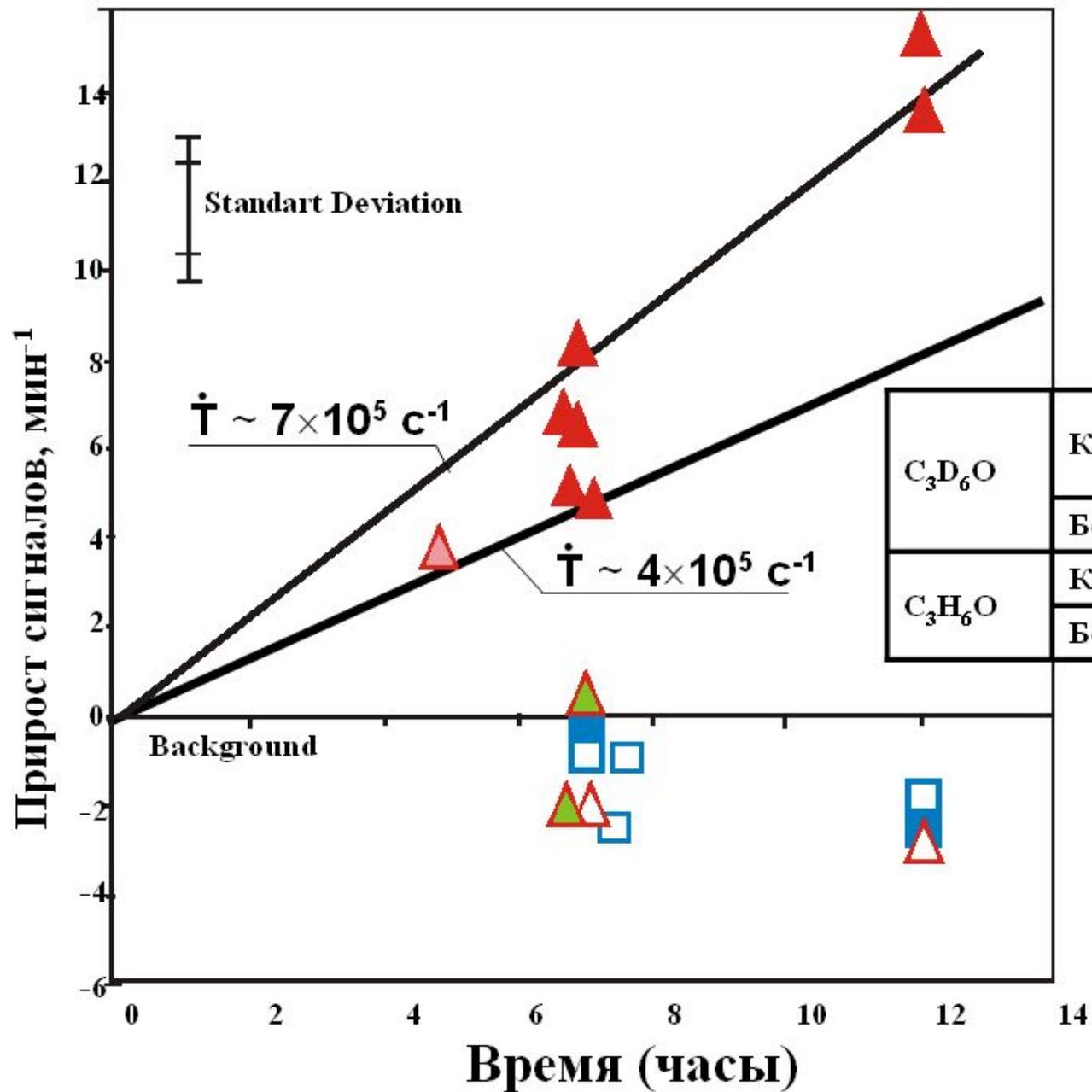
Несферичность -
- Нет сонолюминесценции



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ



Производство трития



$$N_{\text{ИГН}} \sim 10^6 \text{ c}^{-1},$$

$$N_{\text{зона}} \sim 10 \text{ c}^{-1}$$

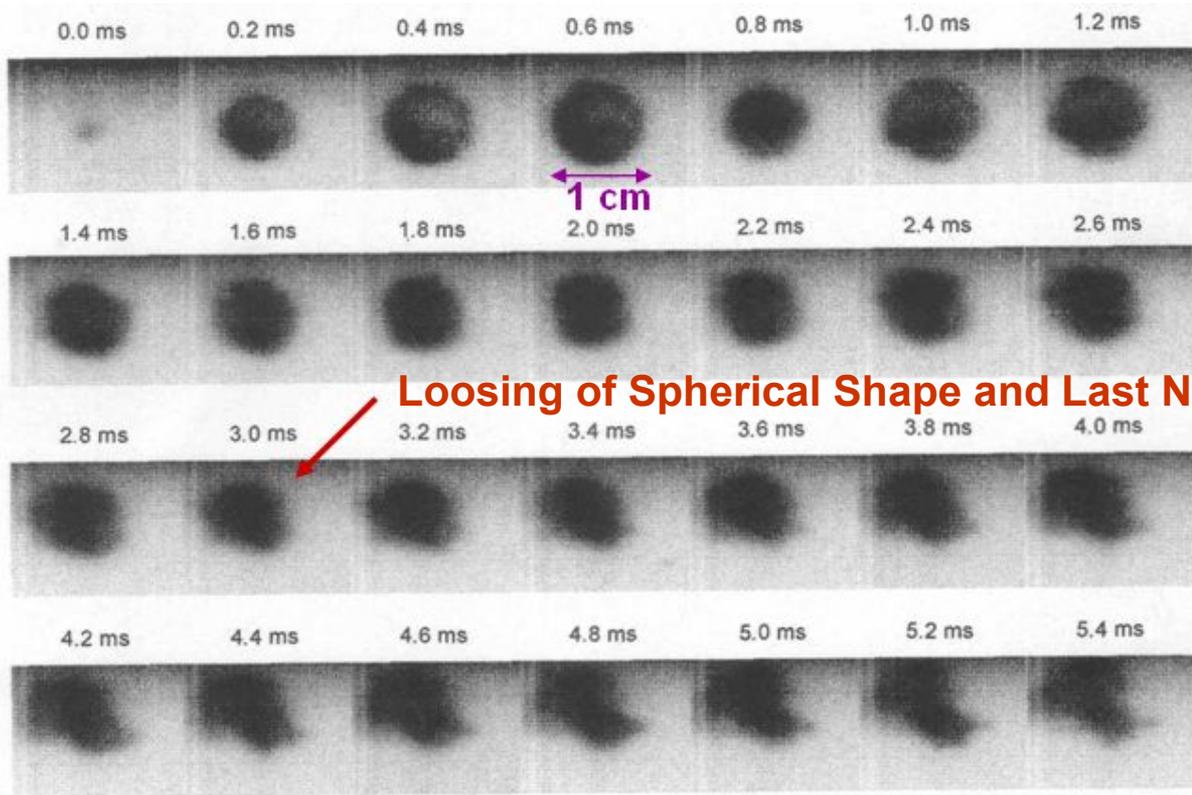
$$E = 14 \text{ MeV}$$

$$f_{\text{PNG}} = 200 \text{ c}^{-1}$$

PEER REVIEWED PAPERS

- Taleyarkhan, R., West, C., Cho, J.S., Lahey (Jr.) R., Nigmatulin, R., Block, R., **Evidence for Nuclear Emissions during Acoustic Cavitation**, *Science*, Vol. 295, pp. 1868-1873, 8 March **2002**.
- Taleyarkhan, R., West, C., Cho, J.S., Lahey (Jr.) R.T., Nigmatulin, R., Block, R., **Additional Evidence of Nuclear Emissions during Acoustic Cavitation**, *Physical Review E*, Vol. 69, p.0361091, March, **2004**.
- Nigmatulin, R., Akhatov, I., Topolnikov, A., Bolotnova, R., Vakhitova, N, Lahey, (Jr.) R., Taleyarkhan R. **The Theory of Supercompression of Vapor Bubbles and Nano-Scale Thermonuclear Fusion**, *Physics of Fluids*, Vol. 17, 107106, 1-31, **2005**.
- Nigmatulin, R. I., **Nano-Scale Thermonuclear Fusion in Imploding Vapor Bubbles**, *Nuclear Engineering and Design*, 235, **2005**, 1079-1091.
- Taleyarkhan, R., Block, R., Lahey (Jr.) R., R. I. Nigmatulin, and Y. Xu, **Nuclear Emissions During Self-Nucleated Cavitation**, *Physics Review Letters*, 96, 034301, **2006**.
- Taleyarkhan, R., West, C., Lahey (Jr.) R.T., Nigmatulin, R.I., Block, R., Y. Xu, **Reply on Naranjo Comment**, *Physical Review Letters*, Vol. 97, LQK1005, **2006**.
- R. Taleyarkhan, R., West, C., Lahey (Jr.) R.T., Nigmatulin, R.I., Block, R., Y. Xu, **Reply on Lipson Comment**, *Physical Review Letters*, Vol. 97, LQK1028, 2006.
- and 10 other papers

CLUSTER of Microbubbles: Formation and Evolution

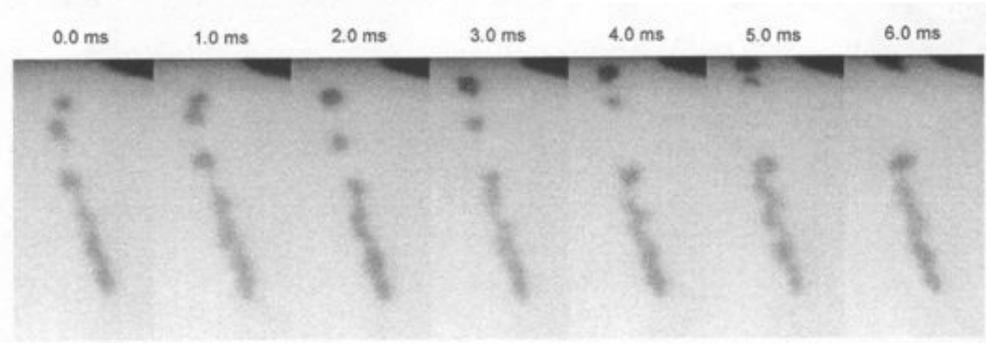


Spherical Cluster
 $d \approx 1 \text{ cm}$

Loosing of Spherical Shape and Last Neutron emissions

Acetone,
 $T_0 = 4^\circ\text{C}$, $p_0 = 16.7 \text{ kPa}$
 $\Delta p = \pm 17 \text{ bars}$,

Comet like streamers
Duration $\sim 50 \text{ ms}$
No strong Shocks on
the Glass Wall



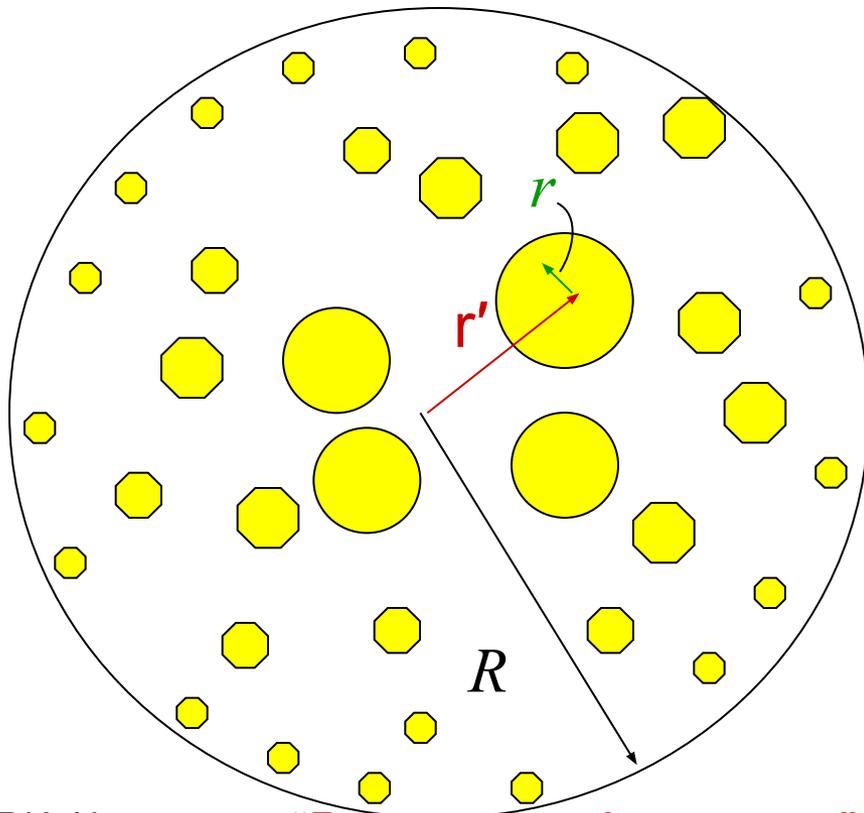
Y. Xu & A. Butt, **Confirmatory experiments for nuclear emissions during acoustic cavitation**, Nuclear Engineering and Design, 2005

Первое приближение для описания пузырьков в кластере

r' - Лагранжева координата для двухфазного континуума в кластере

r – Эйлера радиальная микро-координата для пробного пузырька
пузырька

$x(r, t)$ – Эйлера радиальная координата для двухфазного континуума



$$\frac{\partial x}{\partial t} = v \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{x}{r'} \right)^2 \frac{\partial p}{\partial r'}$$

$$(1 - \phi_1) a \frac{\partial w_{La}}{\partial t} + \frac{3w_{La}^2}{2} = \frac{p_{La} - p}{\rho_{L0}}$$

$$p_{La} = p_G(a) - \frac{2\sigma}{a} - \frac{4\mu_L w_{La}}{a}$$

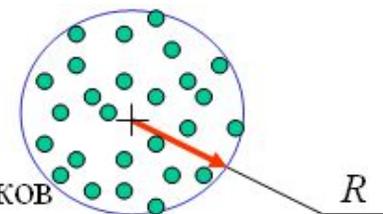
$$\rho_0 = \rho(1 - \alpha_G), \quad \phi_1 = 4.5 \alpha_G$$

$$\alpha_G = \frac{\alpha_{G0} a^3}{(1 - \alpha_{G0}) a_0^3 + \alpha_{G0} a^3}$$

Р.И. Нигматулин “Динамика многофазных сред”, Москва, Наука, 1987

R. Nigmatulin, et al. **The Theory of Supercompression of Vapor Bubbles and Nano-Scale Thermonuclear Fusion**, *Physics of Fluids*, Vol. 17, 107106, 1-31, 2005.

Усиление волны сжатия в кластере



Объемная концентрация пузырьков

$$\alpha_0 = 0,05$$

Число пузырьков: $N = 50$

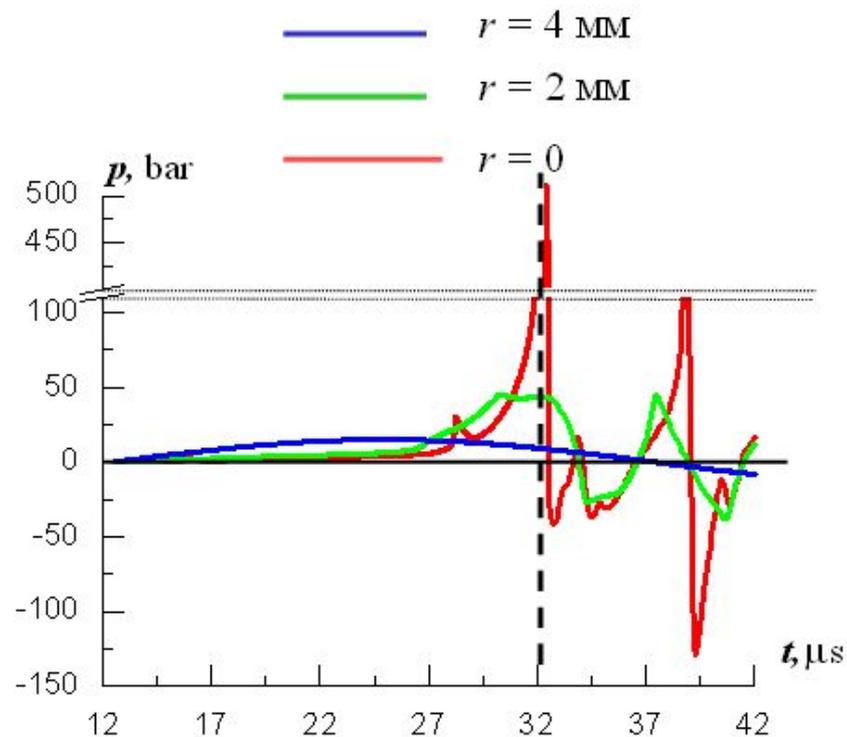
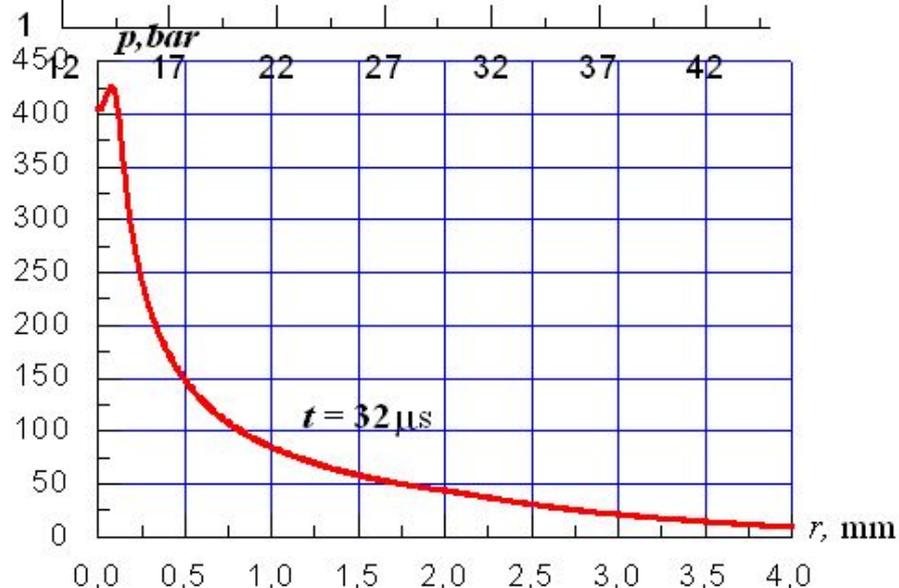
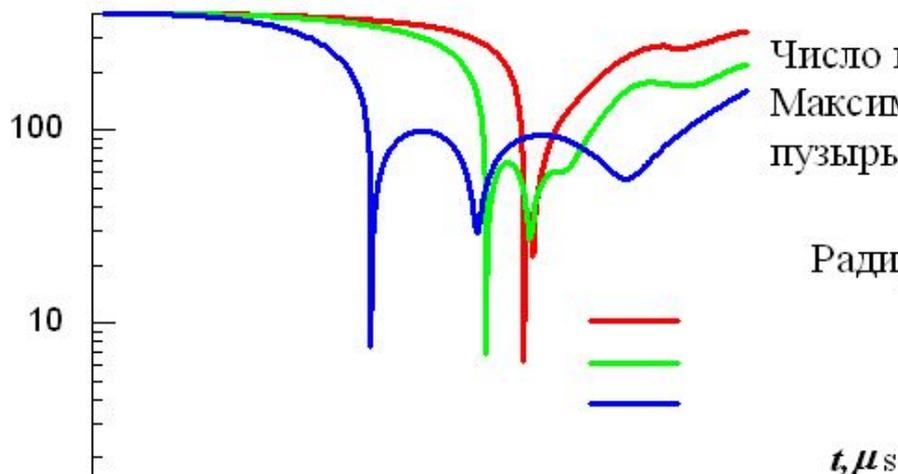
Максимальный (начальный) радиус
пузырьков:

$$a_0 = a_{\max} = 400 \mu\text{m}$$

Радиус пузырькового кластера:

$$R = 5 \text{ mm}$$

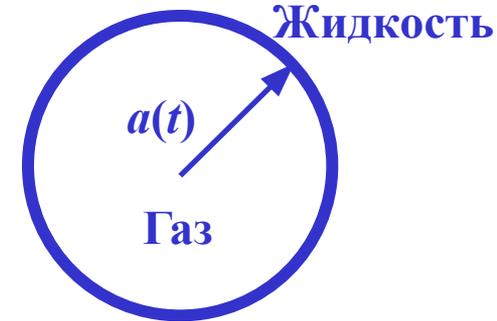
a, μ



Второе приближение для пробного пузырька

• **Масса**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho u r^2) = 0,$$



• **Импульс**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho u^2 r^2) + \frac{\partial p}{\partial r} = 0,$$

• **Энергия**

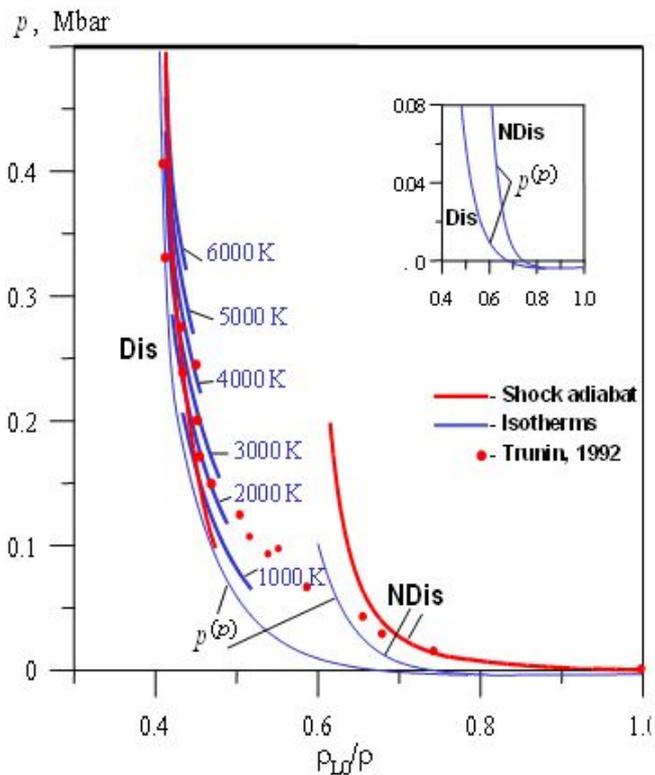
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (u r^2 (\rho e + p)) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

$$e = \varepsilon + \frac{u^2}{2}, \quad p = p(\rho, T), \quad \varepsilon = \varepsilon(\rho, T), \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_g}{T_{g0}} \right)^n.$$

Ударная адиабата и изотермы (P-V) для D-Ацетона (C₃D₆O)

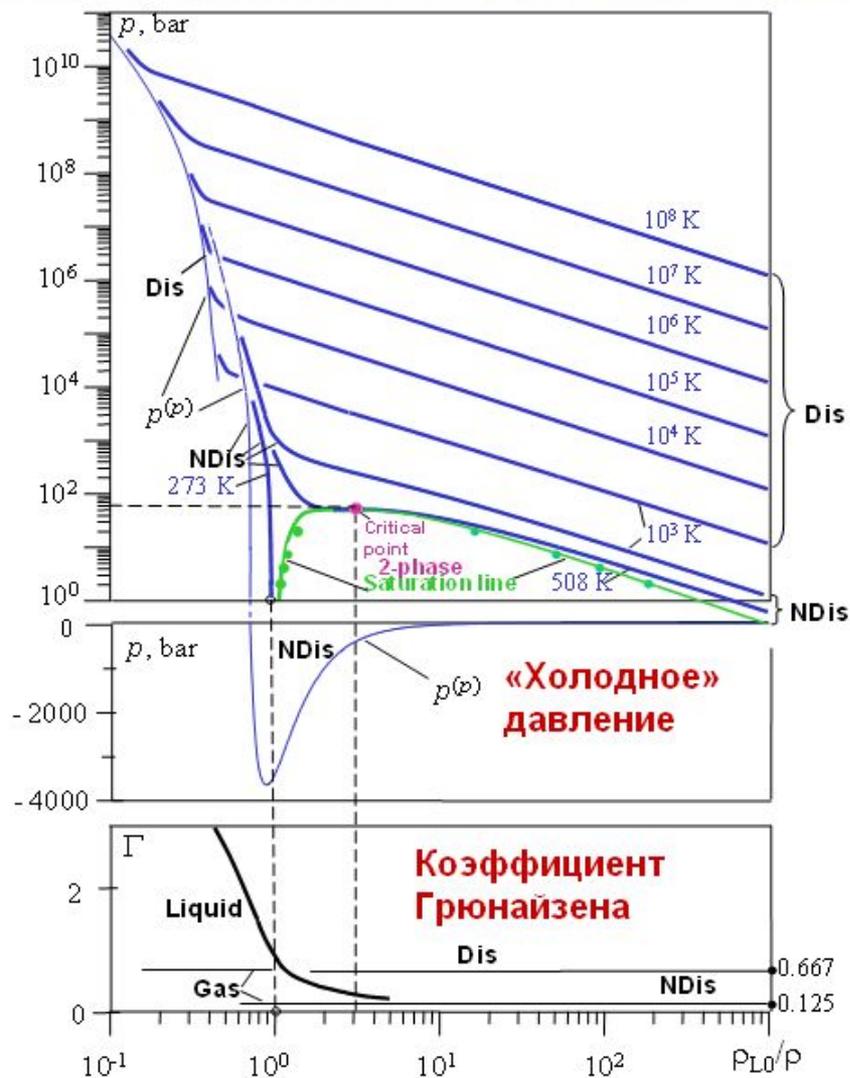
Ударная адиабата и изотермы жидкости

Жидкость, газ, двухфазное состояние, плазма



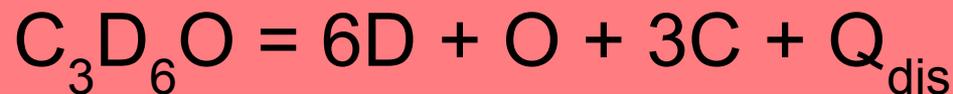
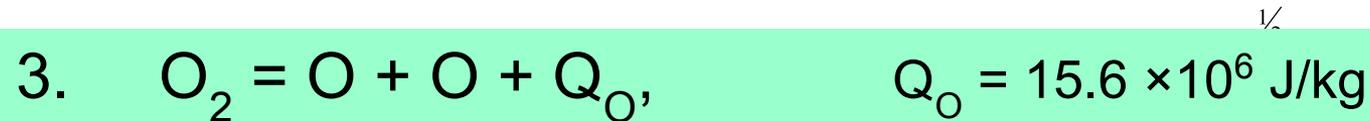
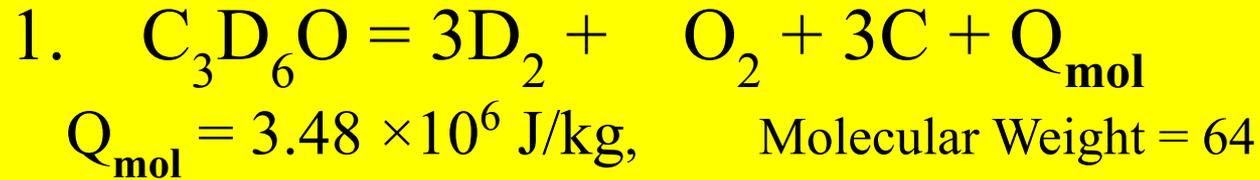
$$\rho_0 D = \rho (D - U)$$

$$p - p_0 = \rho_0 D U$$



- Nigmatulin, R., et al **The Theory of supercompression of vapor bubbles and nano-scale thermonuclear fusion**, *Physics of Fluids*, Vol. 17, 107106, 1-31, 2005.

ДИССОЦИАЦИЯ



$$Q_{\text{dis}} = Q_{\text{mol}} + \frac{12}{64} Q_{\text{D}} + \frac{16}{64} Q_{\text{O}} = 28.2 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\gamma_G = 1.125 \text{ (vapor)} \quad \rightarrow \quad \gamma = 1.667 \text{ (mono-atomic gas)}$$

ИОНИЗАЦИЯ ДИССОЦИИРОВАННОГО ГАЗА

$$\varepsilon_d^{(ch)} = \varepsilon_{d0}^{(ch)} + \varepsilon_i^{(ch)} \quad (\varepsilon_i^{(ch)} - \text{ionization energy})$$

$$\varepsilon_i^{(ch)} = \sum_k v_k x_k R_k T_k = \frac{36}{64} R_C \sum_{j=1}^6 x_{Cj} T_{Cj} + \frac{12}{64} R_D x_{D1} T_{D1} + \frac{16}{64} R_O \sum_{j=1}^8 x_{Oj} T_{Oj}$$

$C_3 D_6 O$: $M = 64$ – molecular weight

$$M_C = 12 \times 3 = 36 \quad (v_C = \frac{36}{64}) \quad - \text{carbon,}$$

$$M_D = 2 \times 6 = 12 \quad (v_D = \frac{12}{64}) \quad - \text{deuterium,}$$

$$M_O = 16 \times 1 = 16 \quad (v_O = \frac{16}{64}) \quad - \text{oxygen.}$$

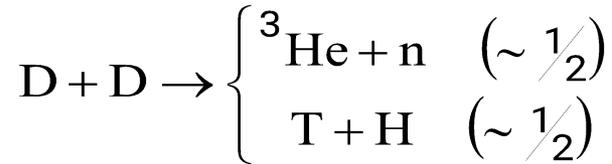
$$T_k = 11 - 800 \text{ eV}$$

$k = d, 0; C1, C2, C3, C4, C5, C6; D1; O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8.$

Z = 15 number of electron levels

$$Q_{ion} = 7.66 \times 10^9 \text{ J/kg}$$

КИНЕТИКА ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА



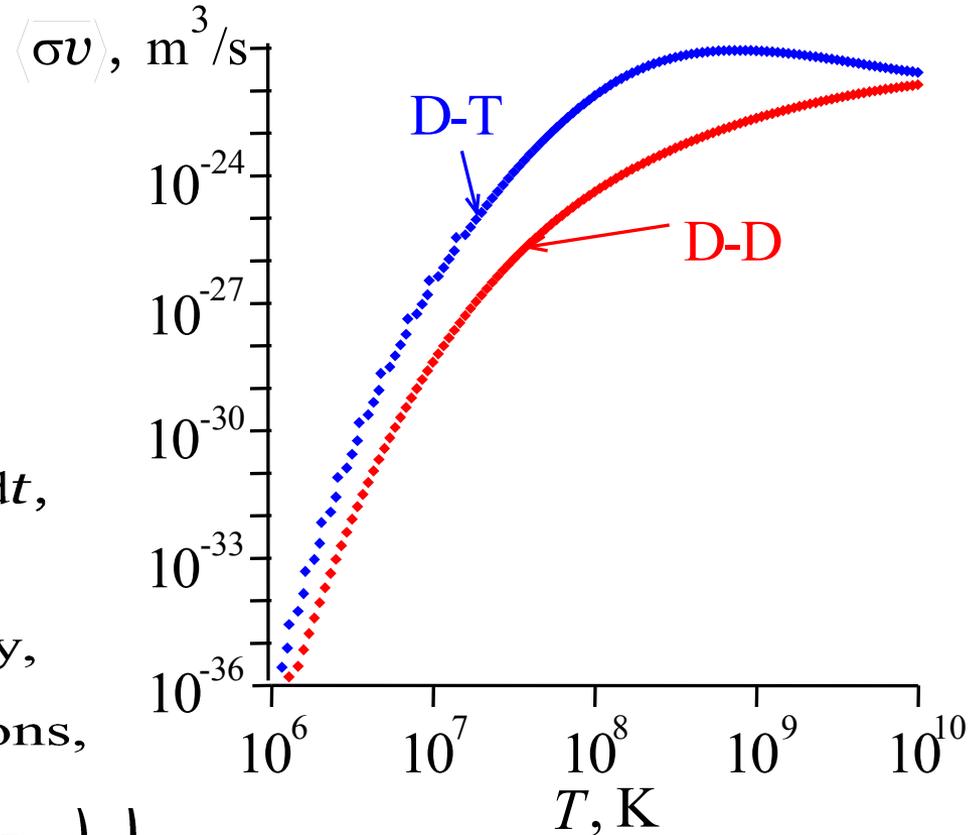
$$J = \frac{1}{2} n^2 \langle \sigma v \rangle, \quad N = \iint_t V J \, dV \, dt,$$

J – neutron emission intensity,

N – number of emitted neutrons,

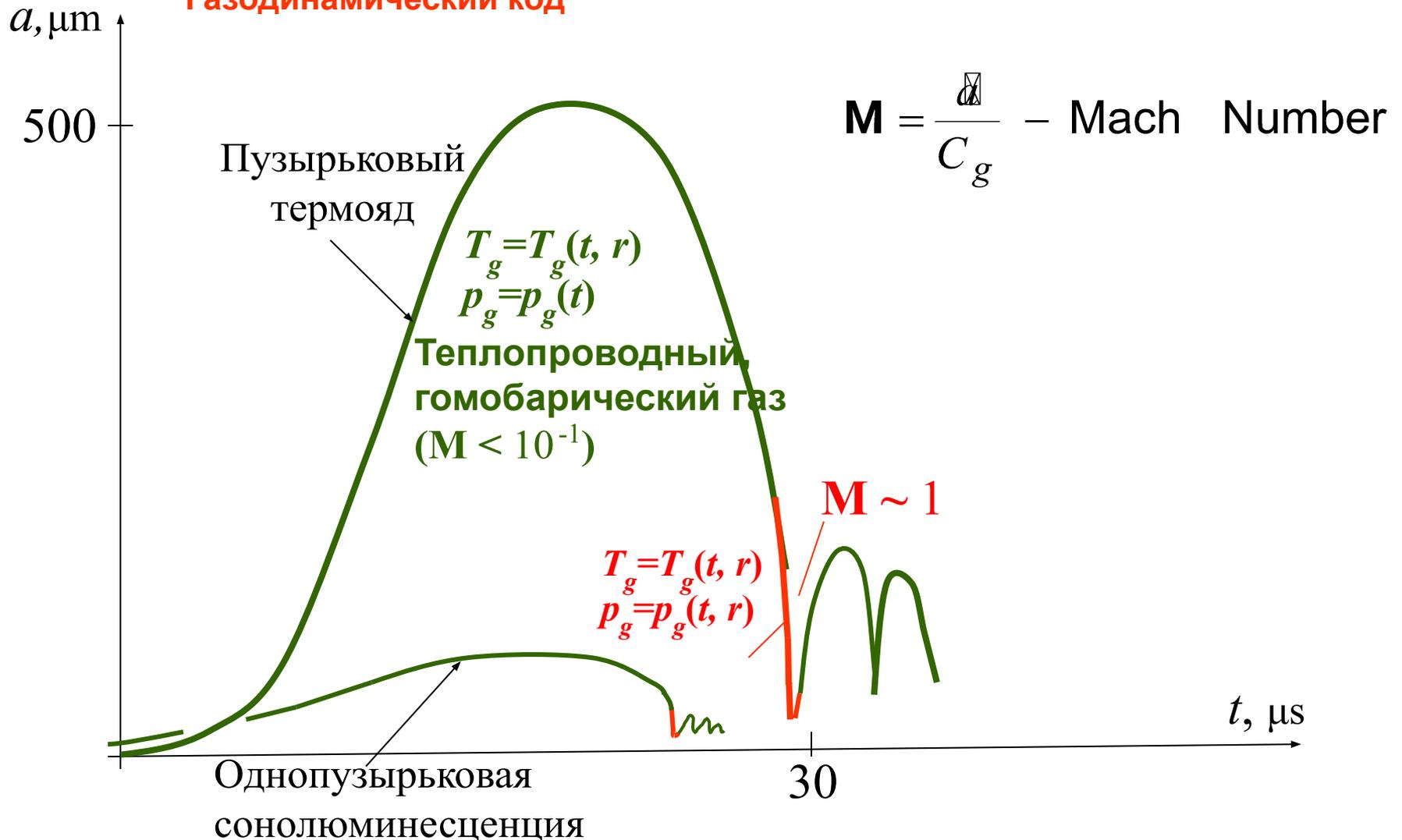
n – concentration of D atoms ($\text{CO}(\text{CD}_3)_2$)

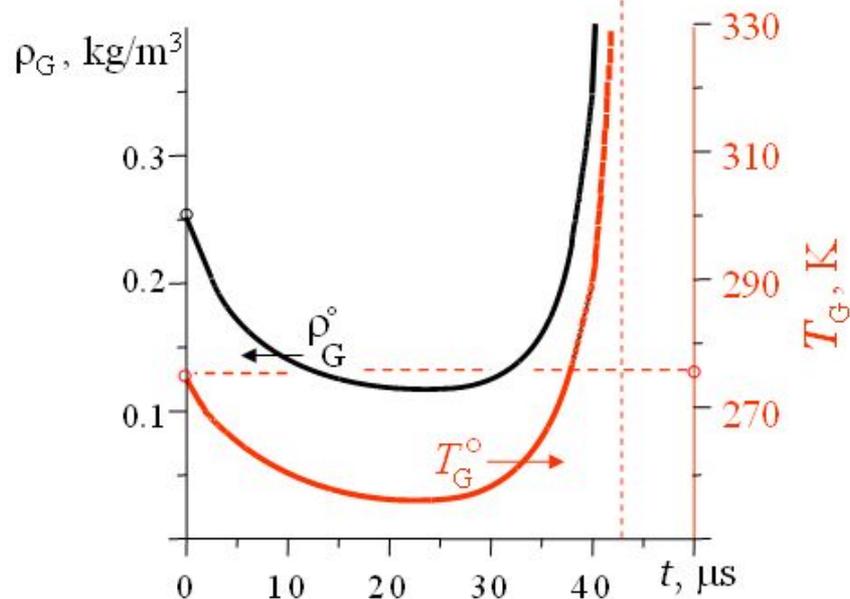
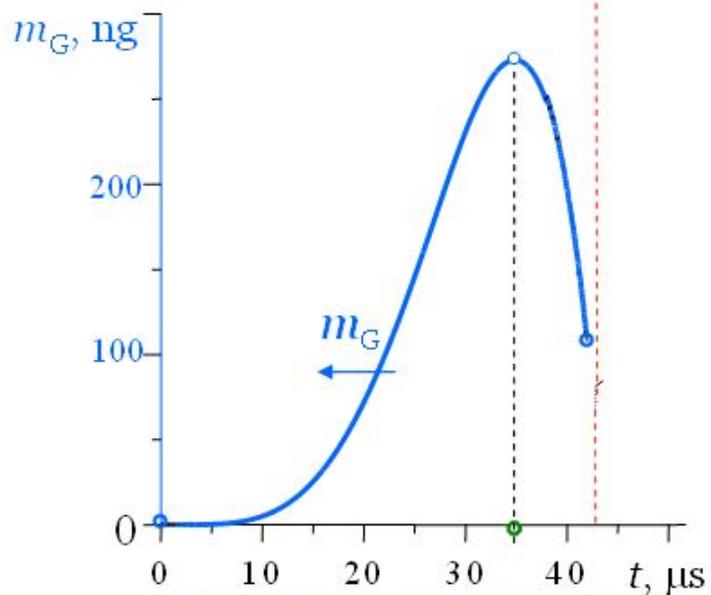
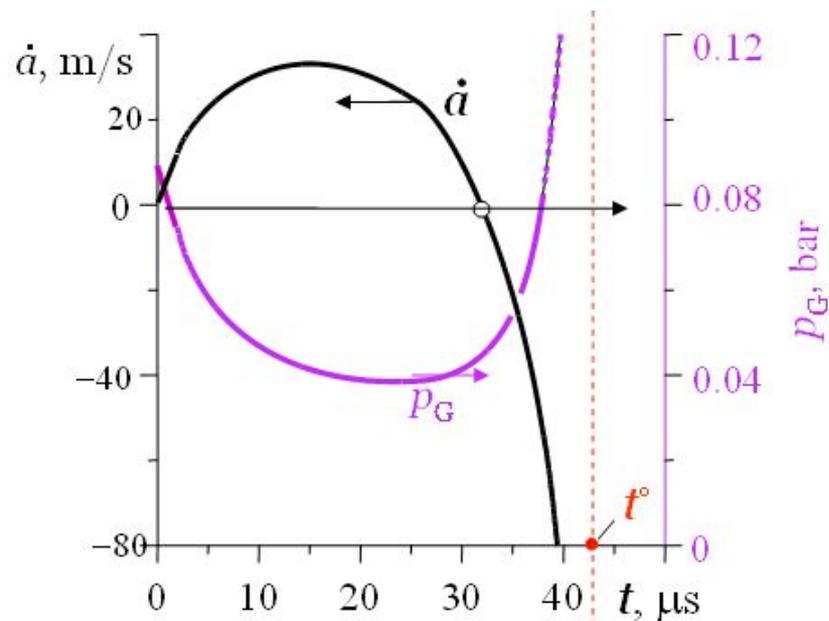
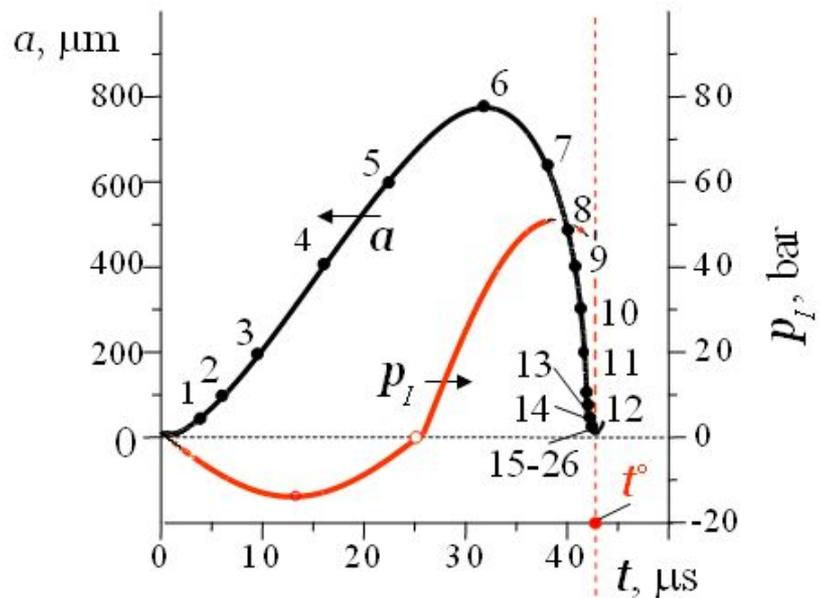
$\langle \sigma v \rangle$ – averaged product of the cross section times the deuterons thermal velocity (reactivity)



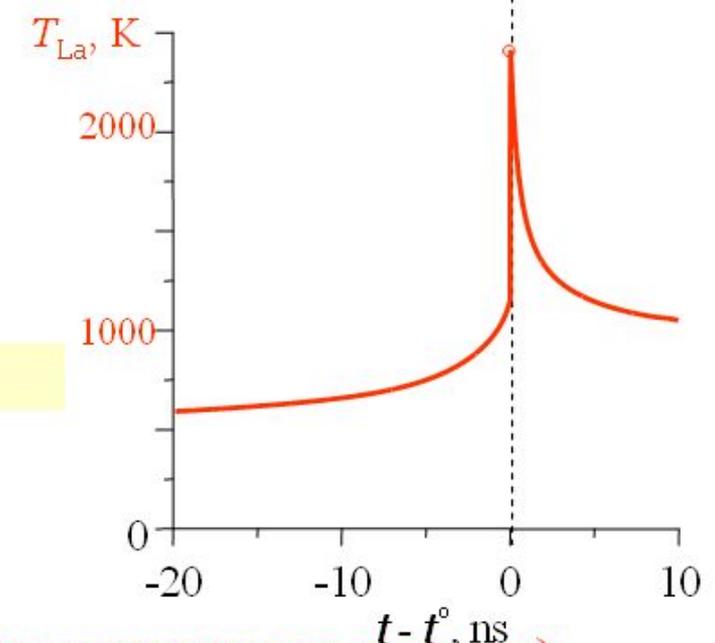
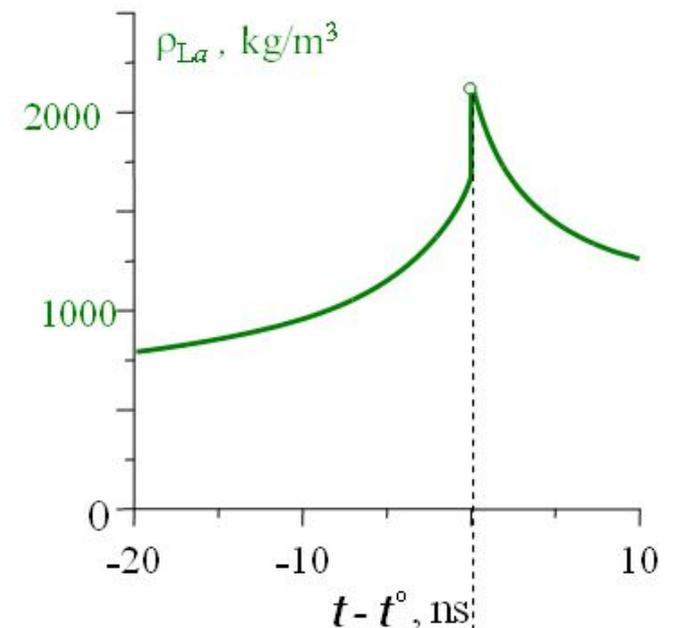
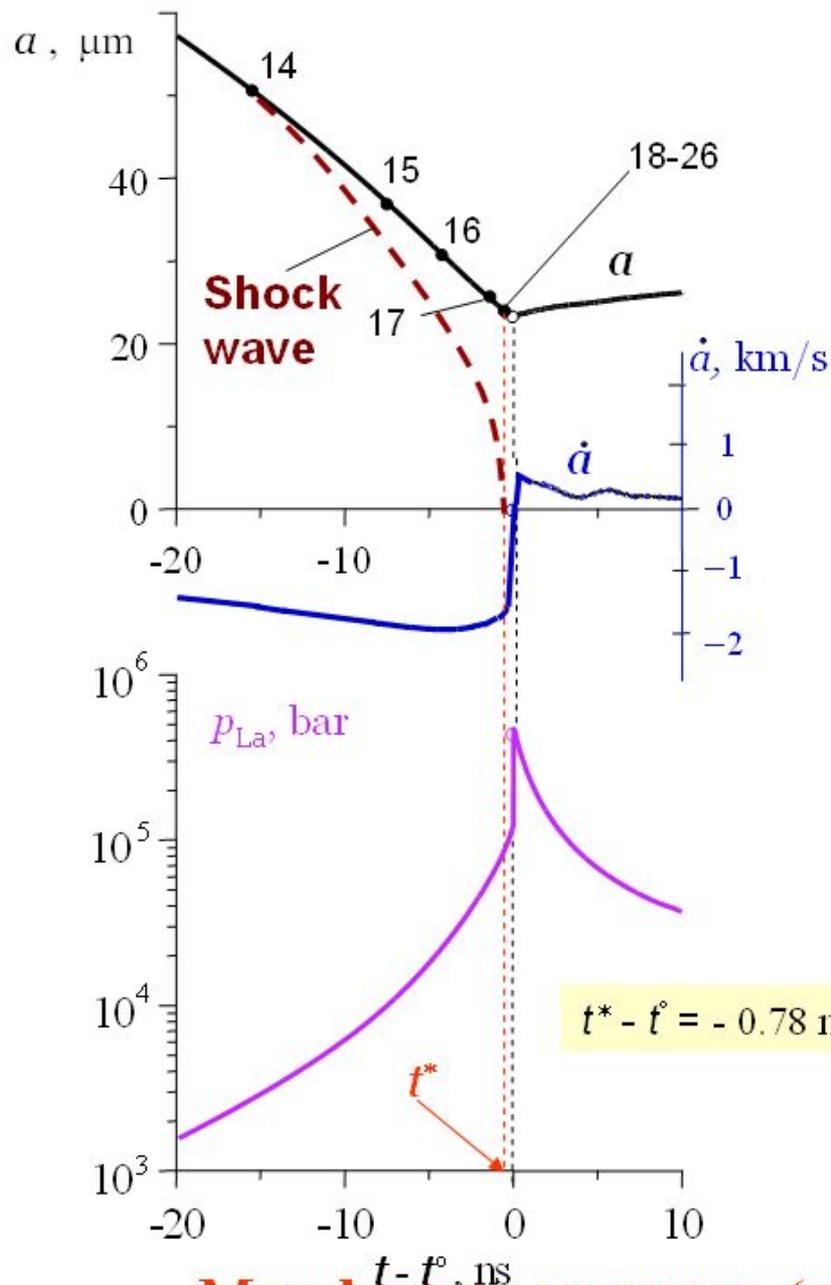
РАЗЛИЧНЫЕ СТАДИИ РАСШИРЕНИЯ И СЖАТИЯ ПУЗЫРЬКА

- Режим с малым числом Маха ($M \ll 1$) \Rightarrow ур-е Рэлея + ур-е теплопроводности
- Режим с умеренным и большим числом Маха ($M \sim 1$, and $M \gg 1$) \Rightarrow Газодинамический код



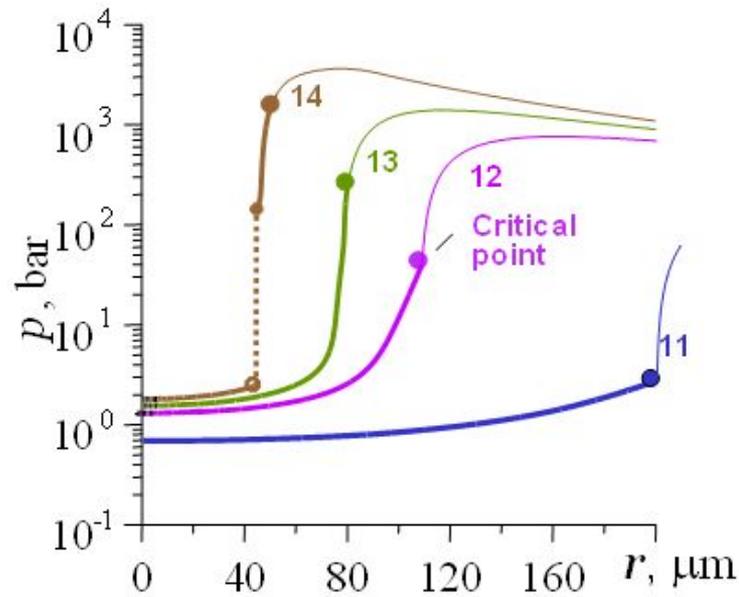
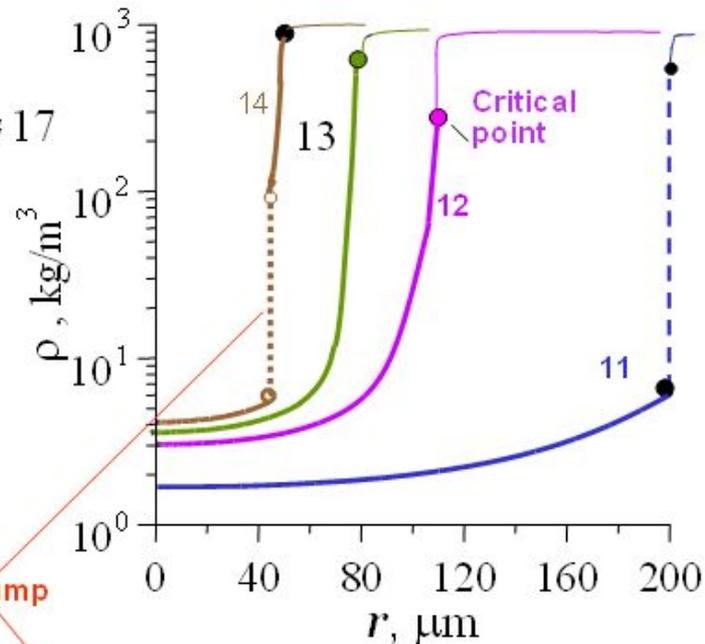


Низкомаховая стадия (микросекундная стадия)

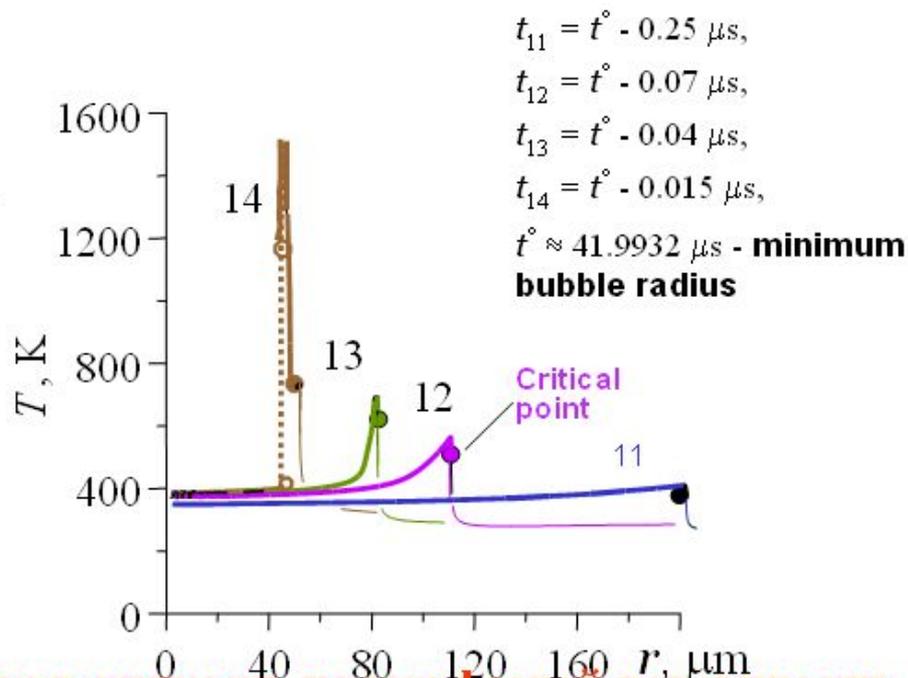
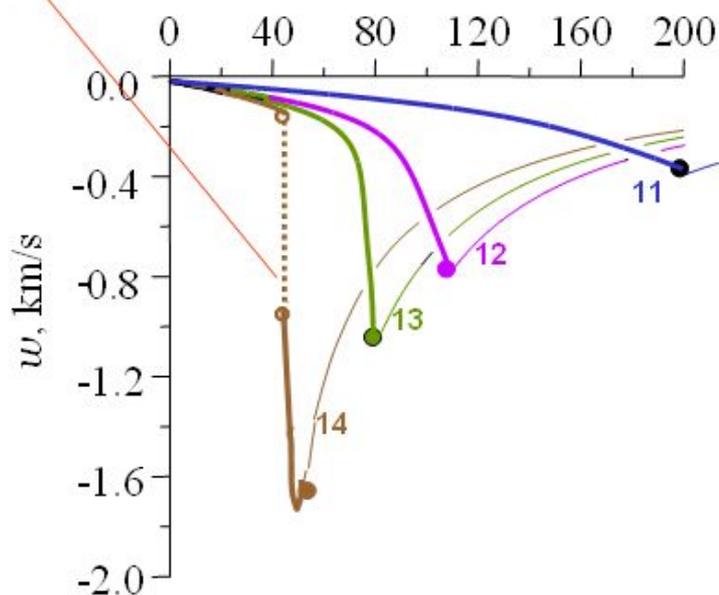


Межфазная граница (наносекундная стадия)

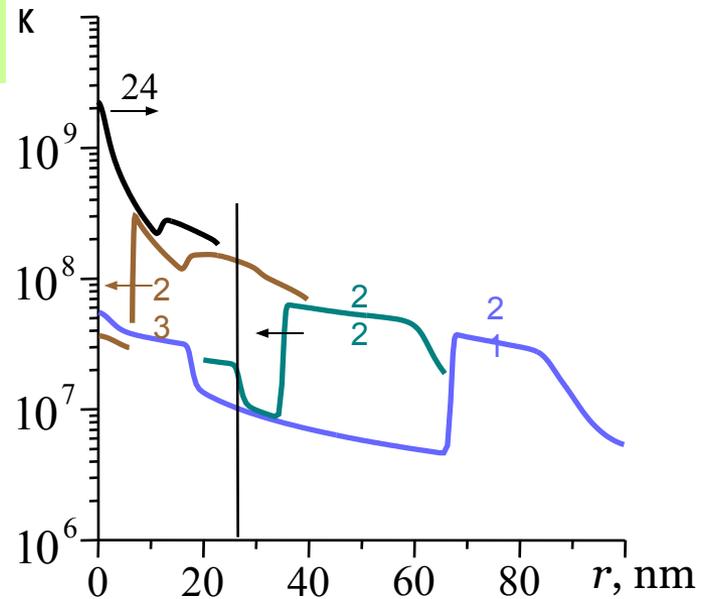
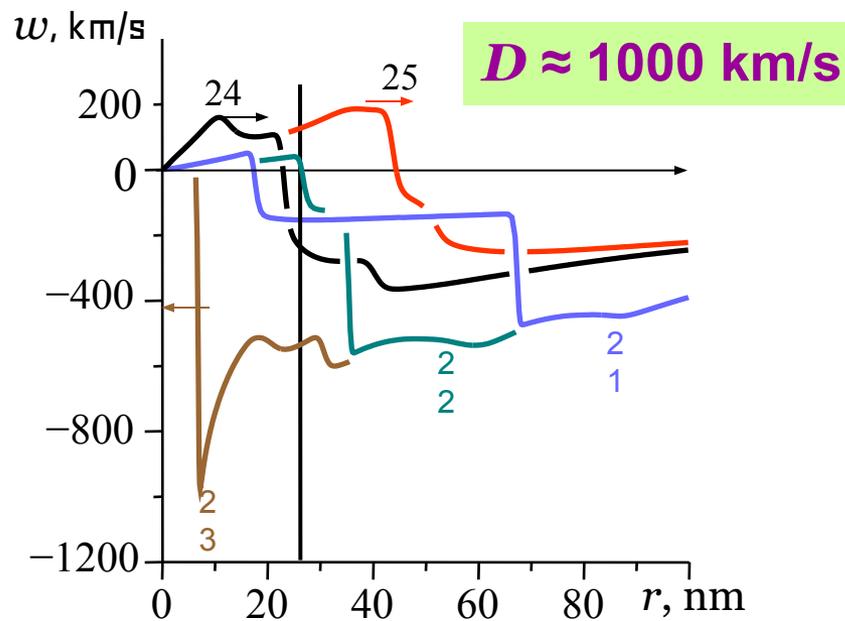
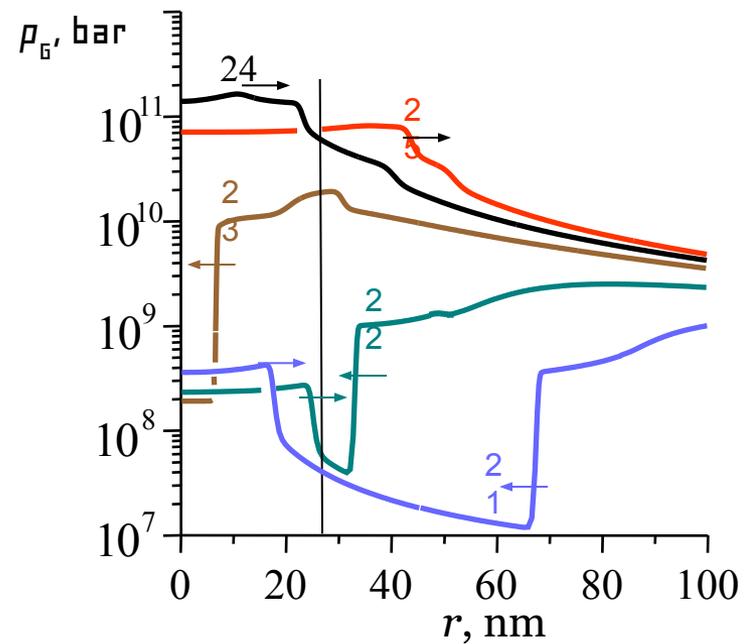
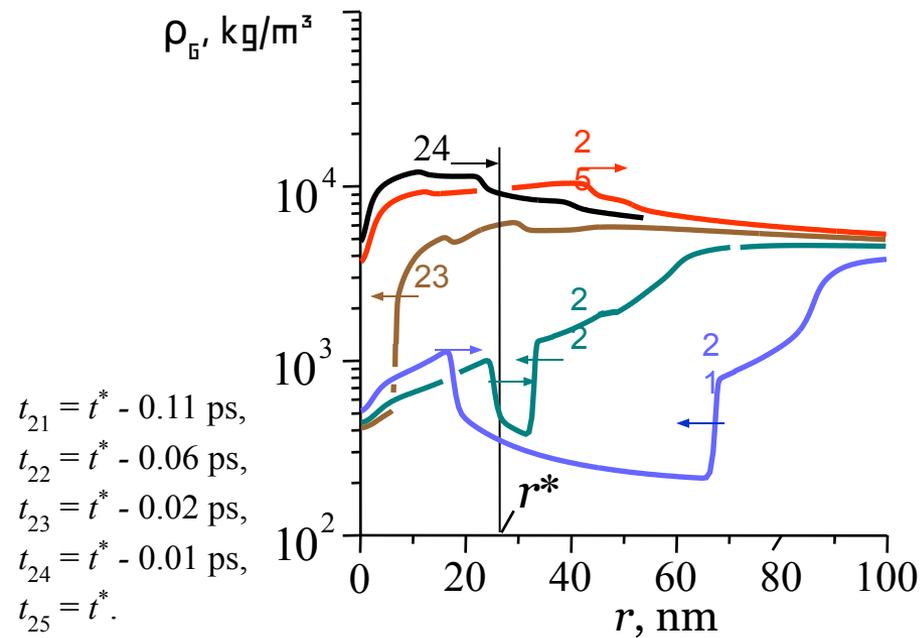
$$\frac{\rho_+}{\rho_-} = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \approx 17$$



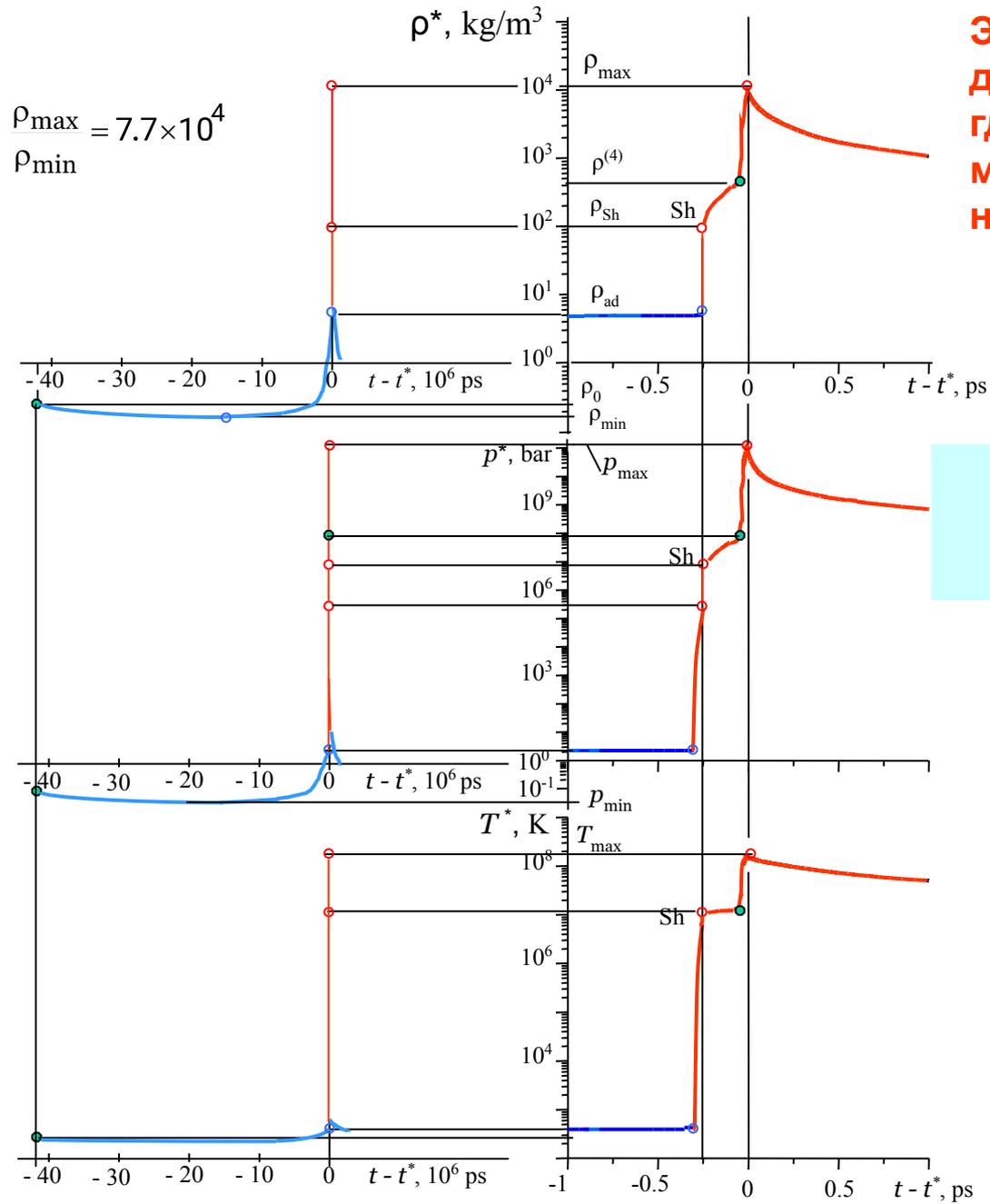
● - interface



Образование ударного скачка и критическая жидкость на межфазной поверхности (субмикросекундная стадия)



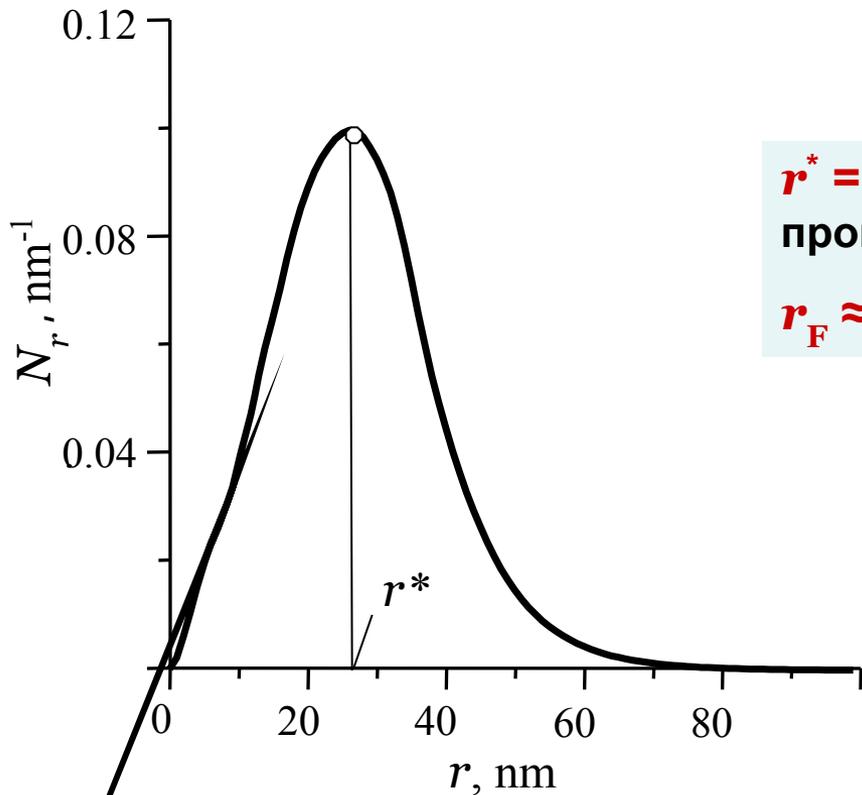
Пространственные распределения для субмикросекундной термоядерной стадии



Эволюция плотности, давления и температуры там, где происходит максимальное производство нейтронов ($r = r^*$).

Обострение

ТHERMO-NUCLEAR CORE



$r^* = 27 \text{ nm}$ – радиус, где максимальное производство нейтронов

$r_F \approx 60 \text{ nm}$ – радиус термоядерного ядра

СВЕРТКА: $(\infty \times 0)$

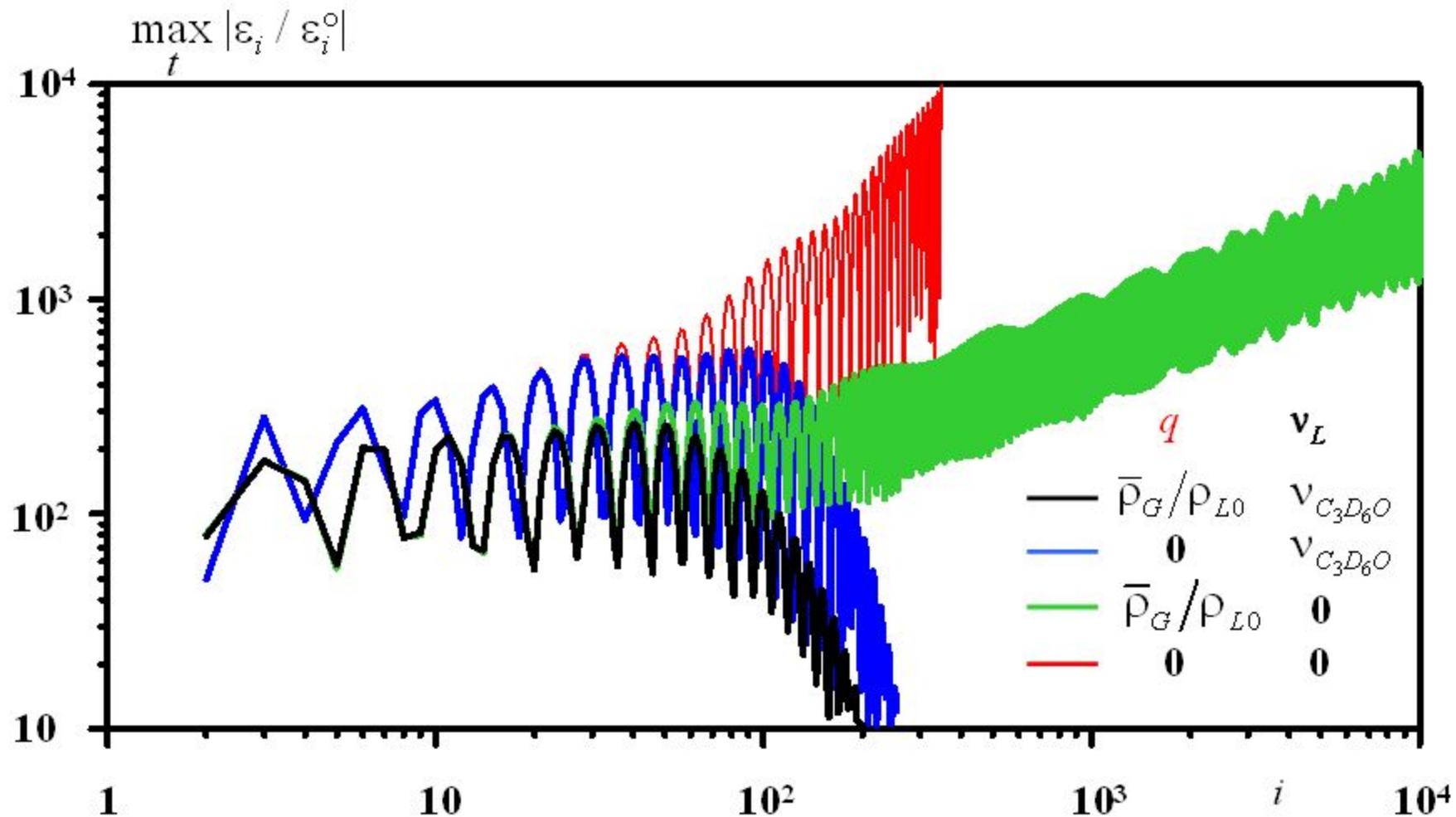


Рис.2. Зависимость амплитуды максимальных искажений на фазе сжатия пузырька (не обязательно в момент коллапса, см. рис.3) от номера гармоники i в случае $R^0 / R_m = 1$.

В случае $q = \bar{\rho}_G / \rho_{L0}$, $\mathbf{v}_L = \mathbf{0}$ (зеленая линия) используемая модель испарения-конденсации, возможно, дает не вполне правильное представление об уровнях искажений при $i > 1500$ (см. рис.5)

ПАРАДОКСЫ

- Эффект ХОЛОДНОЙ жидкости
- КОЛЛЕКТИВНЫЙ эффект КЛАСТЕРА пузырьков
- НЕДИССОЦИАЦИЯ жидкости
- “ХОЛОДНЫЕ ” электроны
- ЗАОСТРЕНИЕ:
Размер разностной сетки для термоядерного ядра
 $\Delta r \sim 0.1 \text{ нм} \ll a_* \sim 10 \text{ нм} \ll a \sim 10\,000 \text{ нм} = 10 \text{ мкм}$
- УСТОЙЧИВОСТЬ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

RESULTS OF ANALYSIS

Bubble Fusion (Ufa Branch of RAS +ORNL+RPI)

Density: $10\text{-}20 \text{ g/cm}^3$

Temperature: $10^8 \text{ K} = 10 \text{ KeV}$

Pressure: $10^{11} \text{ bar} = 10^2 \text{ Gbar}$

Velocity: 1000 km/s

Duration: $10^{-13} - 10^{-12} \text{ s} = 10^{-1} - 1 \text{ ps}$

Radius of the Thermonuclear Core: 100 nm

Number of Ions in the Thermonuclear
Core: 2×10^9

Production of the Fast Neutrons and
Tritium nucleus
 $10^5 - 10^6 \text{ s}^{-1}$

Sonoluminescence (Livermore)

Density: 10 g/cm^3

Temperature: 10^6 K

Pressure: $3 \times 10^8 \text{ bar}$

Velocity: $10 \text{ km/s} \rightarrow 1 \text{ year}$

$t(M \sim 1) \sim 300 \text{ ns} \rightarrow 2 \text{ days}$

Duration: 10 ps
 $t(\text{Dis, Ion}) \sim 2 \text{ ns} \rightarrow 20 \text{ min}$

Radius of the $T = 10^6 \text{ K}$ core: $1\text{-}3 \text{ nm}$
 $\delta t_{\text{Fusion}} \sim 0.2 \text{ ps} \rightarrow 0.1 \text{ s}$

Number of Ions in the Core:
 2×10^5

ПУЗЫРЬКОВЫЙ НАНО-ТЕРМОЯД

Получено не «термоядерное горение, а только термоядерные «искры»

Из искры пузырькового нано-термояда

возгорится

ТЕРМОЯДЕРНОЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ПЛАМЯ».