

Ничто великое не совершается без страсти.
Гегель

МОИ НАУЧНЫЕ СТРАСТИ **(с 1963 по 2022)**

Р.И. Нигматулин

80 - 82

**И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай, бог изобретатель.**
Александр Пушкин

XX ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕЛИНЕЙНЫМ ВОЛНАМ

Институт прикладной физики РАН

Нижний Новгород, 07.11.2022

**Наука – это усовершенствование повседневного
мышления.**

А. Эйнштейн

**Уравнения умнее тех, кто их
вывел.**

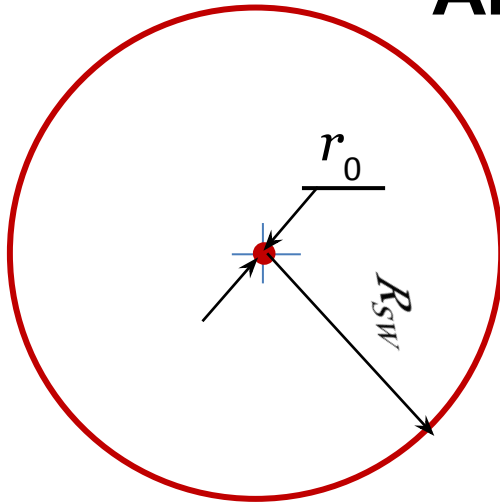
Генрих Герц (1857-1894)

Ничто великое не совершается без страсти.

Но малая доля страстей приводит к великому.

СИЛЬНЫЙ ВЗРЫВ СФЕРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ

Быстрое выделение энергии (E_0)



$$E_0 \sim 10 \text{ kt TNT} \sim 4 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Сильная ударная волна:

$$p_{\text{Shock}} = p_0 + \rho_0 Dv$$

$$p_{\text{Shock}} \gg p_0 \approx 10^5 \text{ Pa}$$

$$R_{\text{SW}} = f(t, t_0, r_0, \rho_0, p_0, \gamma, E_0).$$

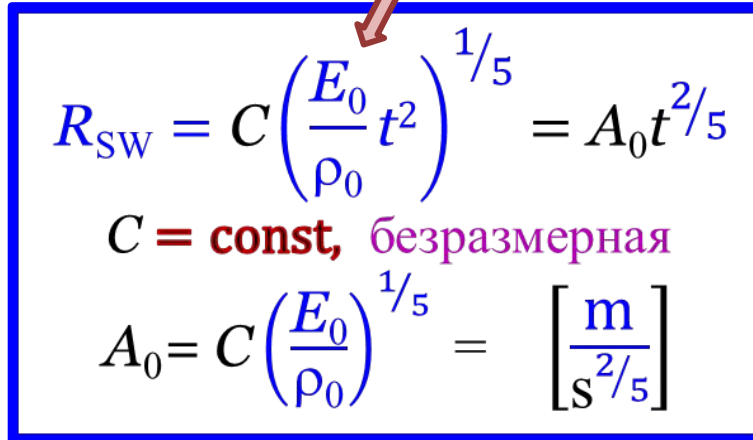
$$t \sim 10^{-1} \text{ s} \gg t_0 \sim 10^{-5} \text{ s}, \quad R_{\text{SW}} \sim 10^3 \text{ m} \gg r_0 \sim 1 \text{ m},$$

$$R_{\text{SW}} = f(t, \rho_0, \gamma, E_0)$$

$$R_{sw} = f(t, \rho_0, \gamma, E_0)$$

$$[t] = s, \quad [\rho_0] = \text{kg/m}^3, \quad [E_0] = \text{J} \equiv \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$$

(точечный взрыв)



$$R_{sw} = C \left(\frac{E_0}{\rho_0} t^2 \right)^{1/5} = A_0 t^{2/5}$$

$C = \text{const}$, безразмерная

$$A_0 = C \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} = \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^{2/5}} \right]$$

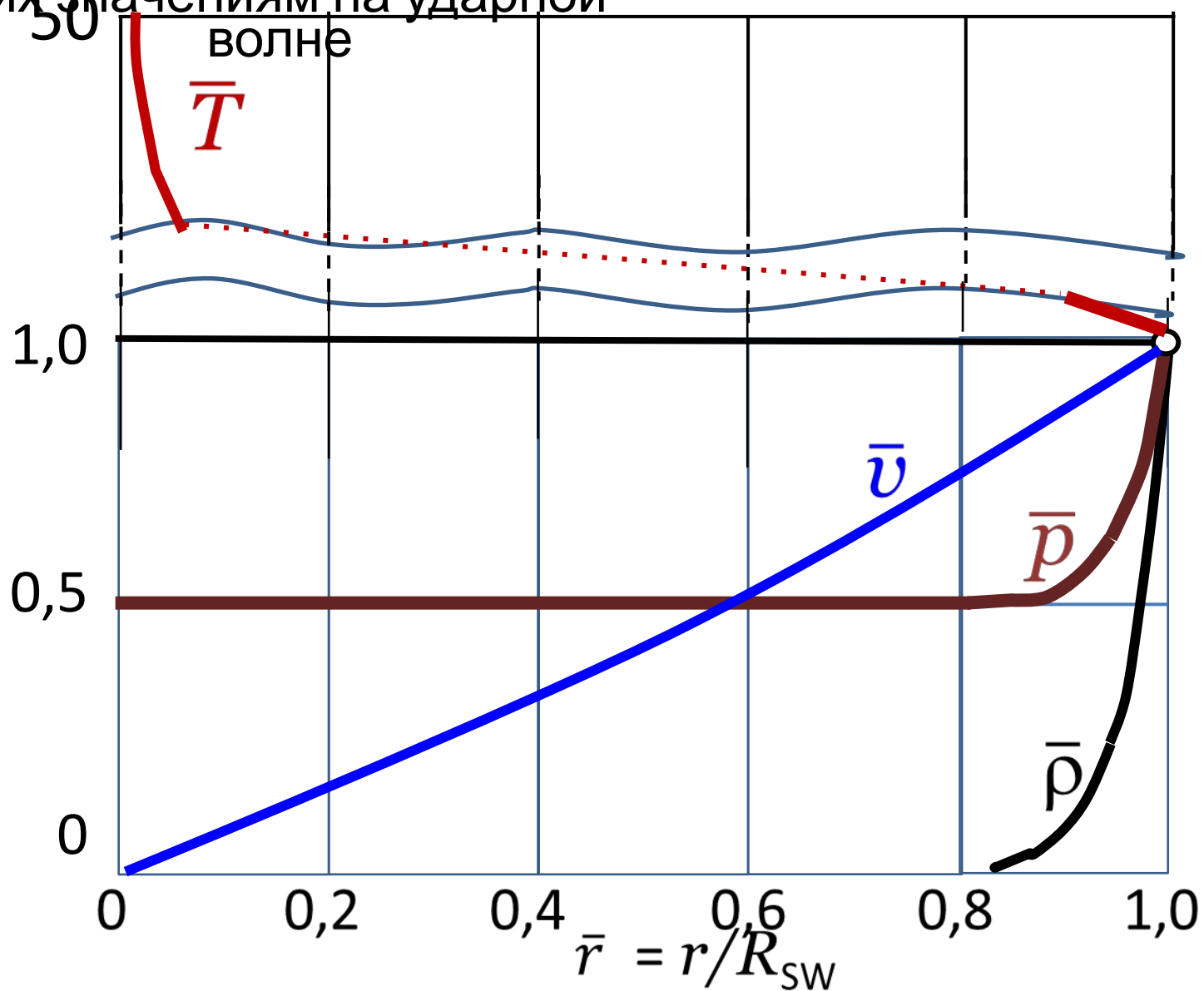
Дж. Тейлор, 1941
фон Нейман, 1941
Л.И. Седов, 1946

АВТОМОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ SELF SIMILAR SOLUTION

$$\bar{p} = \frac{p}{p_{sw}(t)}, \quad \bar{v} = \frac{v}{v_{sw}(t)}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{sw}(t)}, \quad \bar{r} = \frac{r}{R_{sw}(t)} \leq 1$$

$$\bar{p} = f_p(\bar{r}), \quad \bar{v} = f_v(\bar{r}), \quad \bar{\rho} = f_\rho(\bar{r})$$

Значения T, v, p, ρ ,
отнесенные
к их значениям на ударной

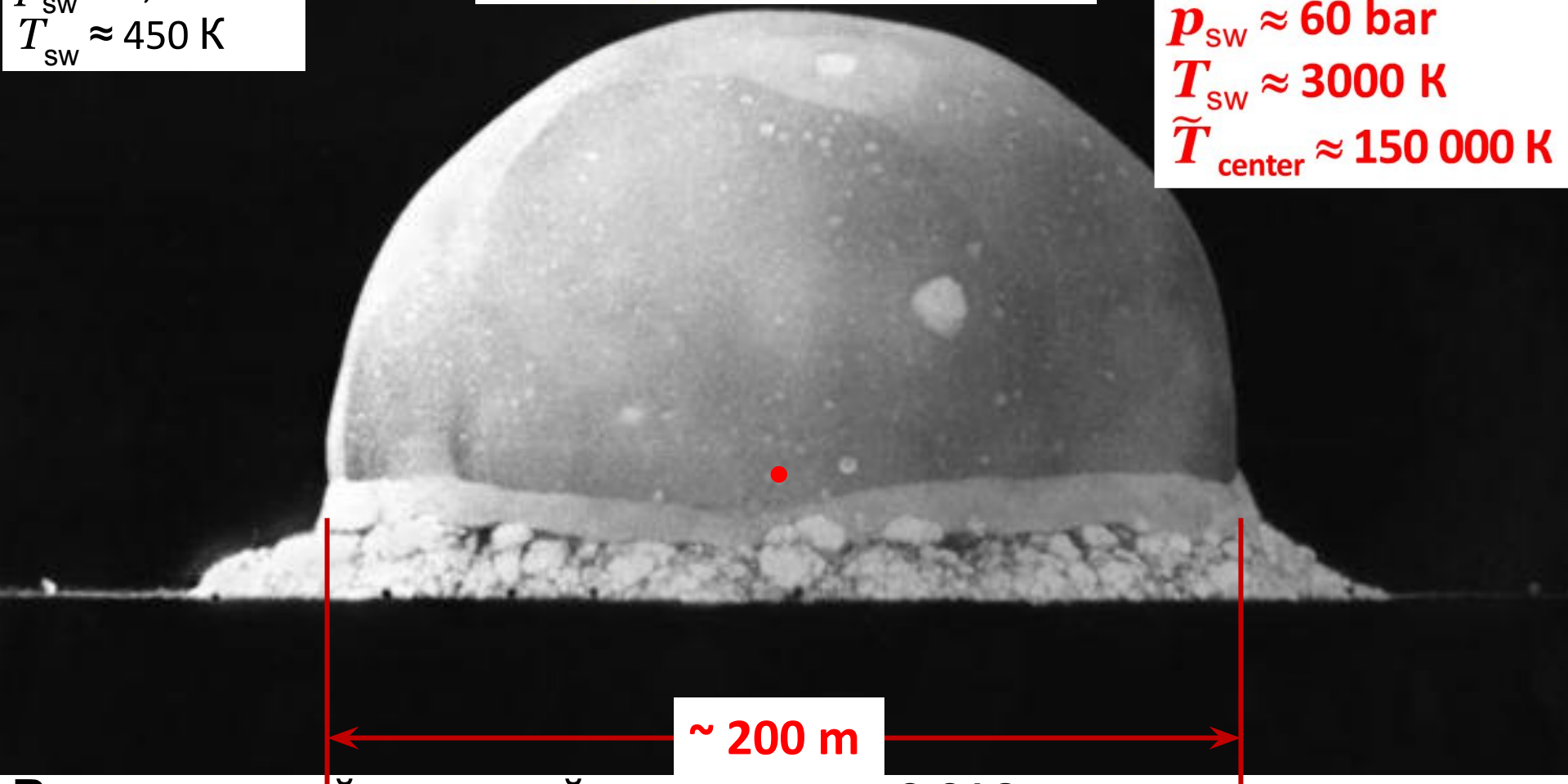


$R_{sw} \approx 200 \text{ m}$
 $D_{sw} \approx 880 \text{ m/s}$
 $v_{sw} \approx 700 \text{ m/s}$
 $p_{sw} \approx 7,7 \text{ bar}$
 $T_{sw} \approx 450 \text{ K}$

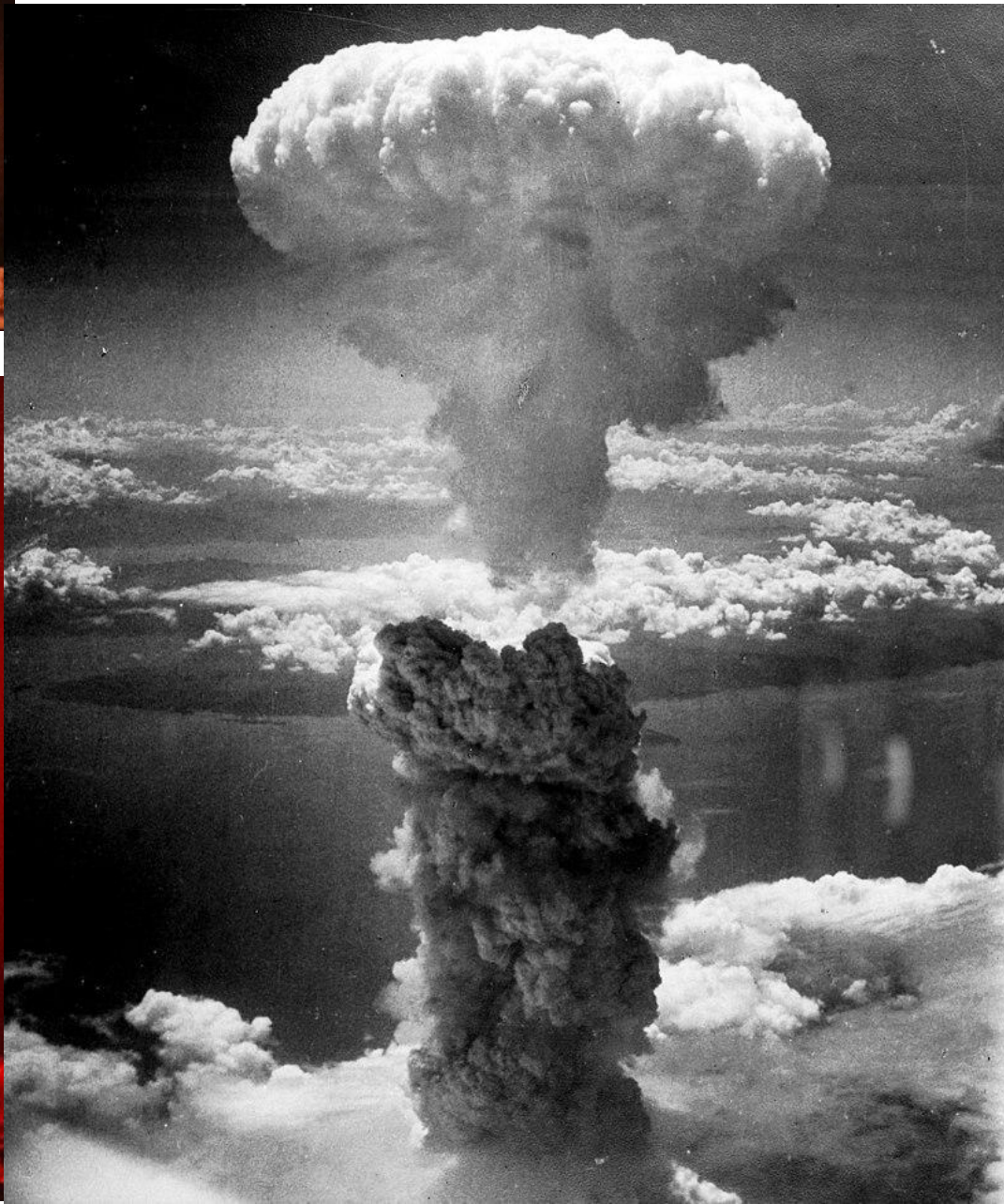
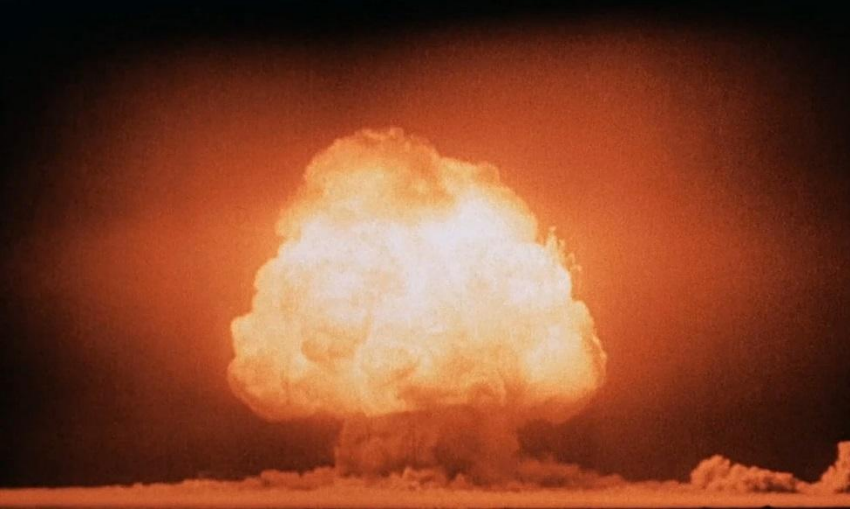
$$R_{sw} = C \left(\frac{E_0}{\rho_0} t^2 \right)^{1/5} = A_0 t^{2/5}$$

$A_0 = 520 \frac{\text{m}}{\text{s}^{2/5}}, \quad E_0 \sim 10^{14} \text{ J} \sim 10^4 \text{ TNT}$

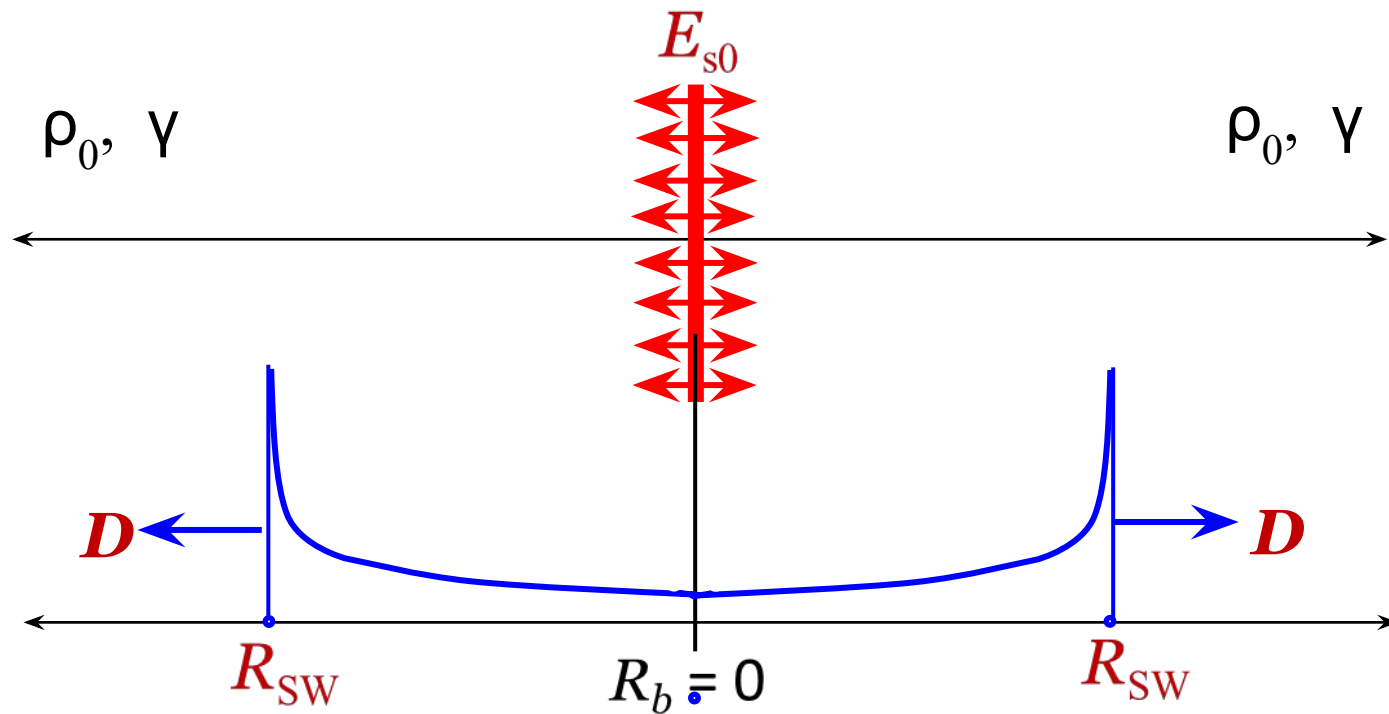
$R_{sw} \approx 100 \text{ m}$
 $D_{sw} \approx 2500 \text{ m/s}$
 $v_{sw} \approx 2100 \text{ m/s}$
 $p_{sw} \approx 60 \text{ bar}$
 $T_{sw} \approx 3000 \text{ K}$
 $\tilde{T}_{center} \approx 150\,000 \text{ K}$



Раскаленный газовый шар при $t = 0,016 \text{ с}$ после ядерного взрыва перед формированием ядерного гриба.
Испытание ядерного оружия «Тринити» 16 июля 1945 года



ПЛОСКИЙ СИЛЬНЫЙ ВЗРЫВ



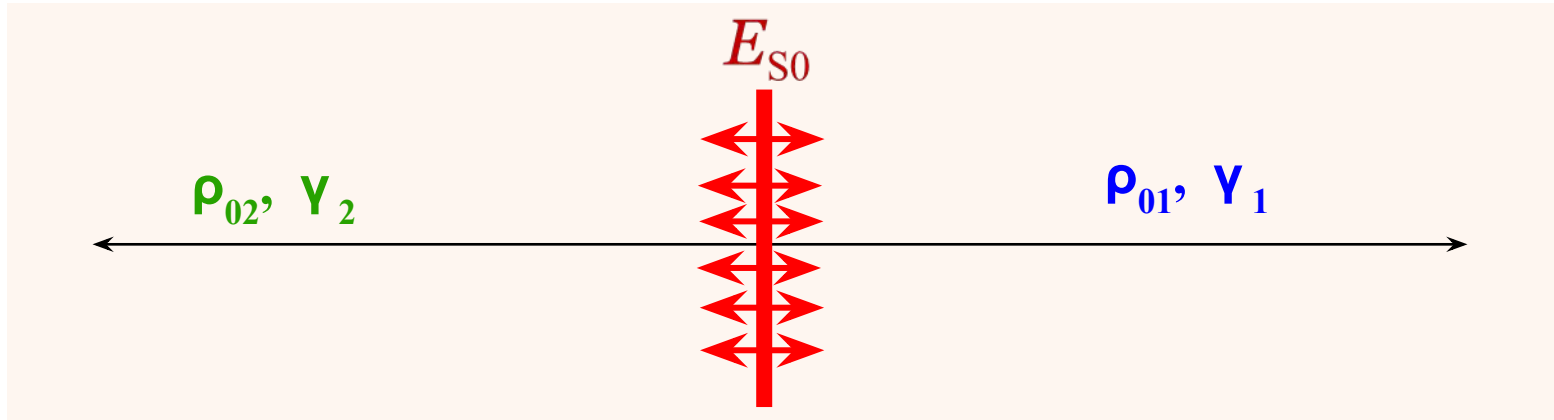
$$R_{sw} = f_R(t, \rho_0, \gamma, E_0),$$

$$[t] = s, \quad \rho_0^{2/3} \quad [\rho_0] = \text{kg/m}^3, \quad [E_{s0}] = \text{J/m}^2 \equiv \text{kg/s}^2 \quad (\text{плоский взрыв}), \quad \left[\frac{E_0}{\rho_0} \right] = \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$$

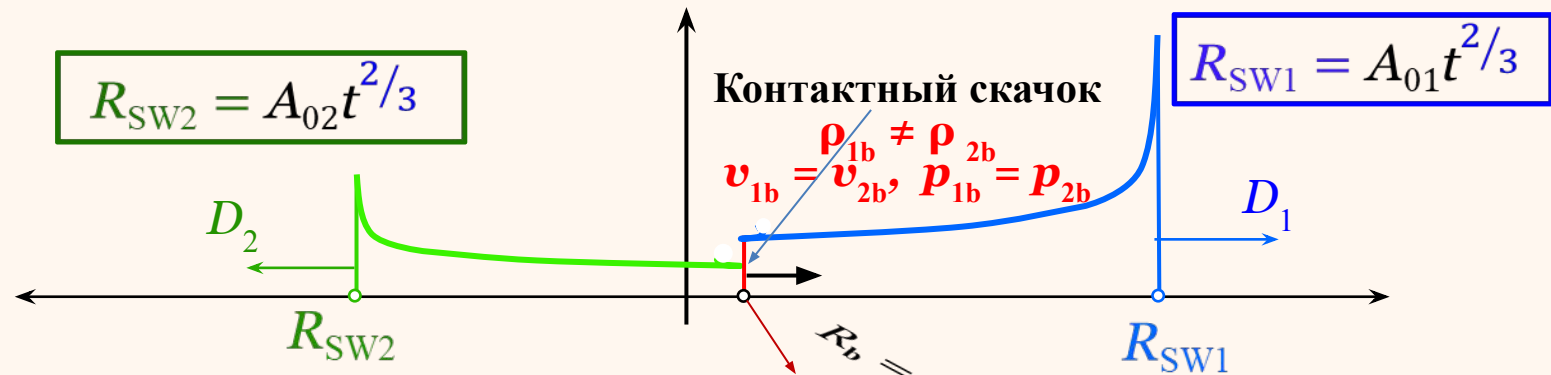
Симметричное автомодельное решение (Седов, 1946)

$$R_{sw} = C \left(\frac{E_0 t^2}{\rho_0} \right)^{1/3} = A_0 t^{2/3}, \quad A_0 = C \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/3} = \text{const}, \quad [A_0] = \frac{\text{m}}{\text{s}^{2/3}}$$

ПЛОСКИЙ СИЛЬНЫЙ ВЗРЫВ НА ГРАНЦЕ МЕЖДУ ДВУМЯ РАЗНЫМИ ГАЗАМИ



$$R_{SW} = f_R(t, \rho_{10}, \rho_{20}, \gamma, E_{S0})$$



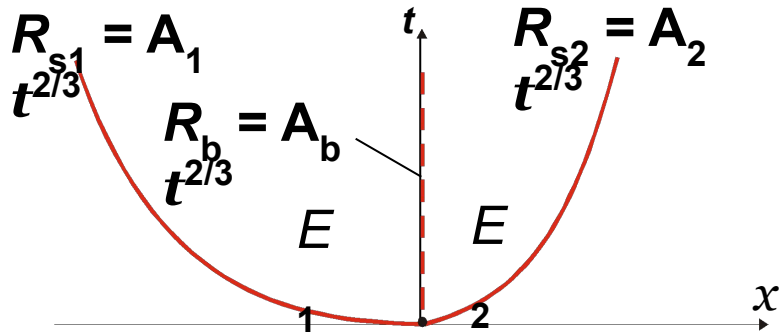
$$A_{01}, A_{02}, A_{0b} = \text{const} = \left[\frac{\text{m}}{\text{S}^{2/3}} \right],$$

Решение для несимметричного взрыва

$$(\rho_1, \gamma_1) \neq (\rho_2, \gamma_2), \quad \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$$

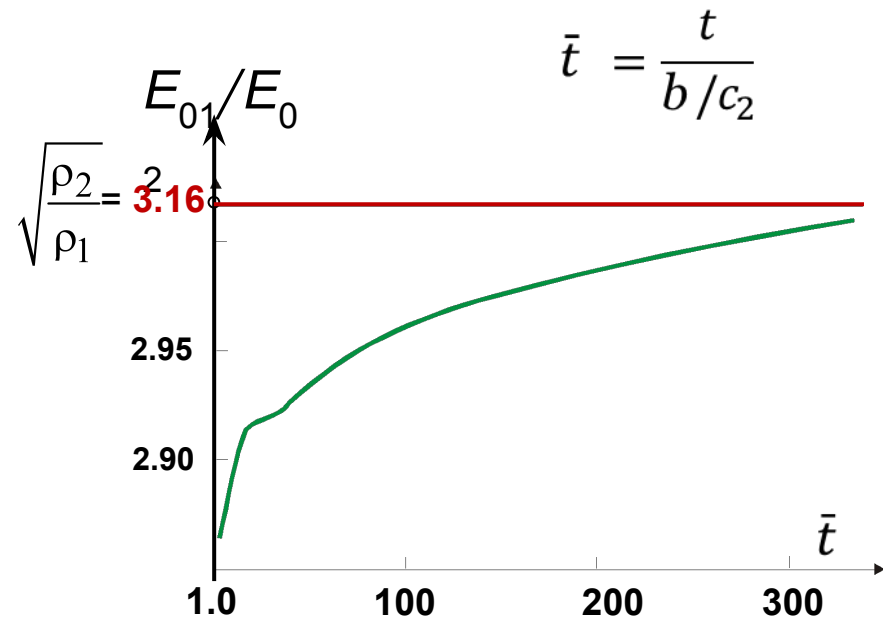
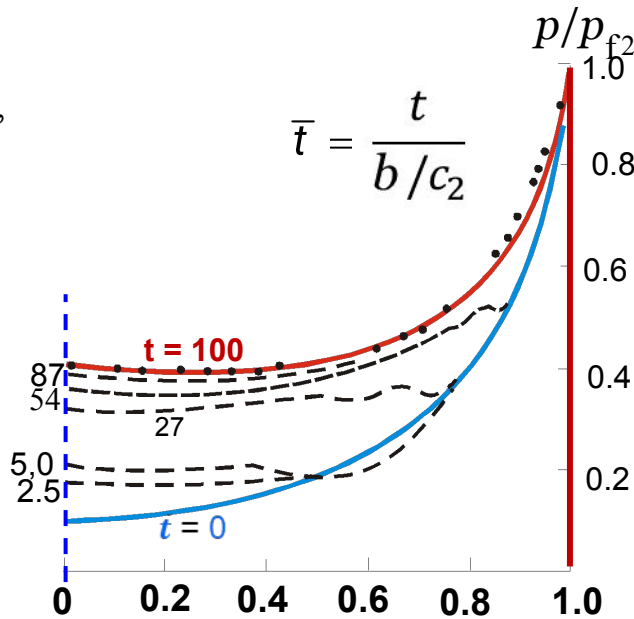
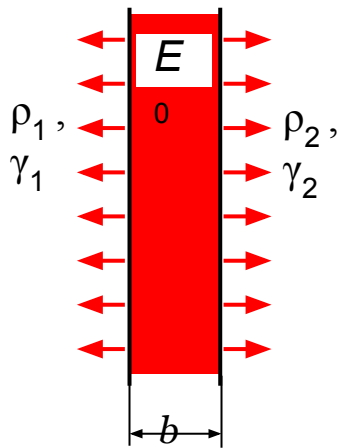
Теорема: Для автомодельного решения

(Нигматулин Р.И., 1964) $A_b = 0 \Rightarrow R_b = 0$



$$E_1 + E_2 = E_0 = \text{const}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} = \text{const}$$



Сходящиеся цилиндрические и сферические детонационные волны (1965 и ПММ, 1967).

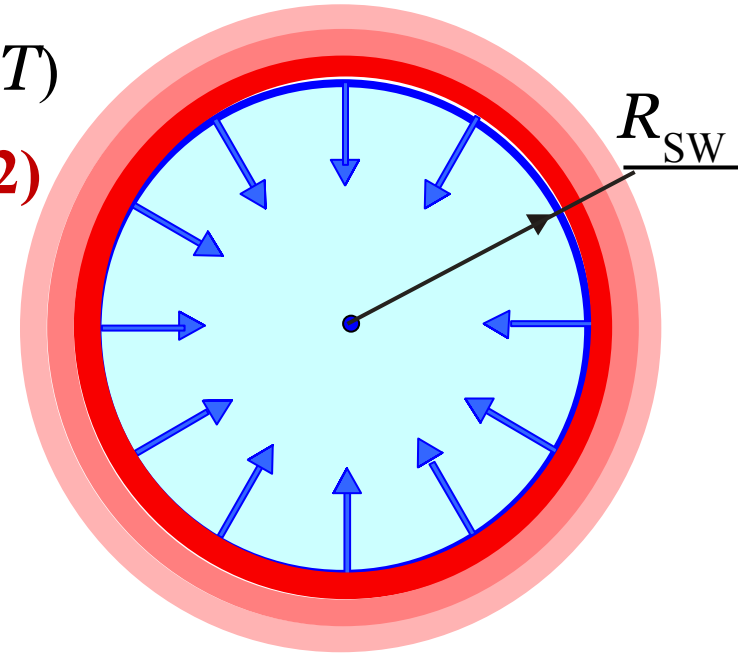
Совершенный газ: ρ_0, γ ($p = \rho RT, u = cT$)

Автомодельное решение Гудерля (1942)

for $Q = 0$,

$$R_{SW} = a_n (-t)^n, \quad n = f(\gamma)$$

$t = 0$ – Коллапс ударной волны



Уравнения сохранения на ударном детонационном скачке:

$$\rho_{sw} = \rho_0 \frac{\gamma + 1}{\gamma - \alpha}, \quad v_{sw} = \frac{\alpha + 1}{\gamma + 1} D, \quad p_{sw} = \frac{\alpha + 1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2$$

$$\alpha = \left[1 - 2(\gamma - 1)(\gamma + 1) \frac{Q}{D^2} \right]^{1/2}$$

$$D = \frac{dR_{sw}}{dt} = -a_n n (-t)^{n-1}$$

$\alpha = 1$ - для $Q = 0$ (Решение Гудерля)

$\alpha = 0$ - для режима Чепмена-Жуге

Q – теплота горения (m^2/s^2)

$$\alpha = \left[1 - 2(\gamma - 1)(\gamma + 1) \frac{Q}{D^2} \right]^{1/2}$$

Автомодельные (а/м) решения

$$\bar{r} = \frac{r}{R_{sw}(t)} \geq 1: \quad \bar{p} = \frac{p}{p_{sw}(t)}, \quad \bar{v} = \frac{v}{v_{sw}(t)}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{sw}(t)},$$

$$\bar{p} = f_p(\bar{r}), \quad \bar{v} = f_v(\bar{r}), \quad \bar{\rho} = f_\rho(\bar{r})$$

Теорема 1: Существует (а/м) решение с расходящейся детонационной ударной волной с $D = \text{const}$, $\alpha = 0$ (режим Чепмена-Жуге). (Зельдович, 1952)

Теорема 2: Для любого $Q = \text{const} > 0$ не существует (а/м) решения со сходящейся детонационной волной $D = \text{const}$ ($Q = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$). (Нигматулин, 1965)

Теорема 3: Для режима Чепмена-Жуге: $\alpha = 0$, существует (а/м) решение со сходящейся ударной волной (Нигматулин, 1965)

$$R_{sw} = a_n (-t)^n, \quad n = \frac{3(\gamma + 1)}{3(\gamma + 1) + \nu\gamma}$$

$$D = \frac{dR_{sw}}{dt} = -a_n n(-t)^{n-1}$$

$n < 1$

$$Q(r) = \frac{D^2}{2(\gamma - 1)(\gamma + 1)}$$

Автомодельное решение со сходящейся детонационной волной

$$D = \frac{dR_{sw}}{dt} = -a_n n(-t)^{n-1}$$

$n < 1$

$$n = \frac{3(\gamma + 1)}{3(\gamma + 1) + v\gamma}$$

$$Q(r) = \frac{D^2}{2(\gamma - 1)(\gamma + 1)} \xrightarrow[t \rightarrow 0]{} \infty$$

Симметрия	Цилиндрическая, $v = 1$		Сферическая, $v = 2$	
	$\gamma = 1.4$	$\gamma = 3.0$	$\gamma = 1.4$	$\gamma = 3.0$
Гудерлей ($Q = 0$)	0.834	0.800	0.720	0.667
Нигматулин ($Q \rightarrow \infty$)	0.838	0.810	0.717	0.638

Турбулентность в XX веке

Турбулентность в 1920-е годы

– Никурадзе

Турбулентность в 1930-е годы

Длина пути перемешивания
– Прандтль и Карман

Турбулентность в 1960-е годы

“Статистическая” турбулентность
- Колмогоров, Монин и Яглом

Турбулентность в 1970-1980-е годы

Турбулентность “ k - ϵ ”

**Турбулентность двухфазных (газожидкостных)
ПОТОКОВ**

Турбулентность в 1990-е годы

–Турбулентность “Навье-Стокса”

Монографии по многофазной потокам

(Турбулентность двухфазных (газожидкостных потоков))

Hewitt, G.F., Hall-Taylor, N.S. *Annular Two-Phase Flow*, Pergamon, Oxford, 1970

Wallis, G.B., *One-Dimensional Two-Phase Flows*, McGraw-Hill, 1969

Whalley P.B., *Boiling, condensation, and gas-liquid flow*, Clarendon Press, Oxford, 291 p., 1987

Нигматулин Р.И. *Основы механики гетерогенных сред*, М.: Наука, 1978

Нигматулин Р.И. *Динамика многофазных сред*, Т. 1 и 2, М.: Наука, 1987

Nigmatulin R.I. *Dynamics of multiphase media*, Vol. 1 & 2, Hemisphere, 1991

Турбулентные двухфазные газожидкостные потоки

- **Вязкость** (μ_L or μ_G) + **Инерция** (ρ_L or ρ_G)

$$\text{Re}_L = \frac{\rho_L v_L L}{\mu_L}, \quad \text{Re}_G = \frac{\rho_G v_G L}{\mu_G}$$

- **Поверхностное натяжение** (σ)

Гетерогенные структуры: пузырьки, капли, волновые пленки

Множество линейных масштабов:

$$L_1 \equiv D, \quad L_2 \equiv a, \quad L_3 \equiv \delta, \quad L_4 \equiv \Delta\delta, \dots$$

Коагуляция. Дробление. Срыв и осаждение

$$\text{We}_i = \frac{\rho_L v^2 L}{\sigma}, \quad \text{We}_g = \frac{\rho_G v^2 L}{\sigma}$$

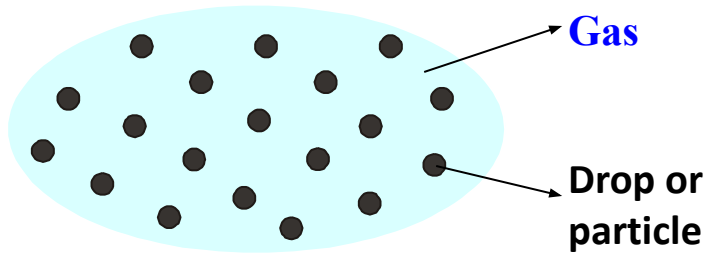
- **Фазовые переходы**

Теплофизика ($l, c_G, c_L, \lambda_G, \lambda_L$)

Сильные изменения объемов (ρ_G, ρ_L)

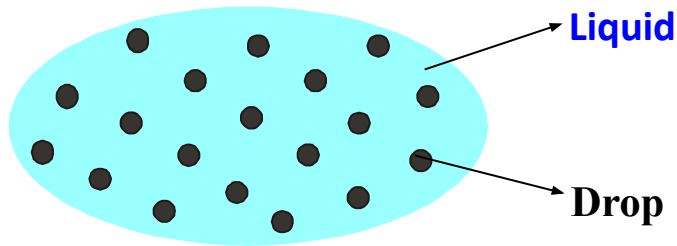
ЕГО ВЕЛИЧЕСТВО - ДЕТАЛЬ

ДИСПЕРСНЫЕ СМЕСИ



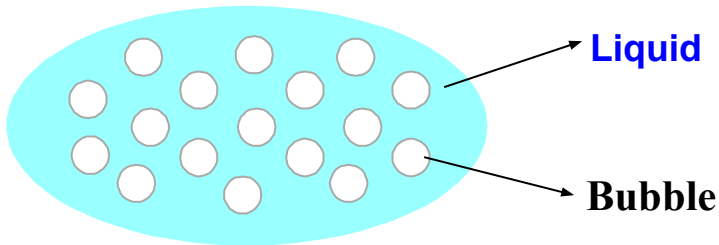
Взвеси газа с каплями или твердыми частицами

Пыльный газ, туманы, дым
Горючие смеси



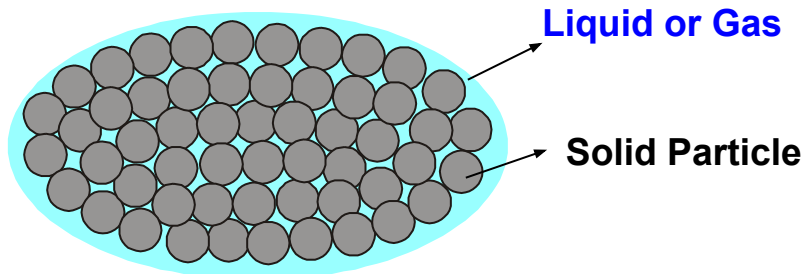
Эмульсии

Нефть
Биологические жидкости
(кровь, молоко)



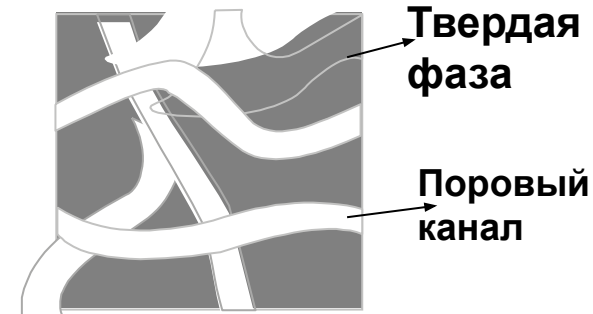
Пузырьковые жидкости

Химические и ядерные реакторы
Обтекание кораблей, кавитация



Пористые насыщенные среды

Химический реактор
Нефтяной пласт
Геологические процессы



1 – Несущая фаза

2 – Дисперсная фаза

Вязкость суспензии

$\mu = \mu_1(1 + \frac{5}{2} \alpha_2)$ - формула Эйнштейна ($\alpha_2 \ll 1$)
из диссипативной функции

Ландау и Лифшиц - из осреднения тензора напряжений

В.Н. Покровский, ЖЭТФ, 1968: $\mu = \mu_1(1 + \frac{3}{2} \alpha_2)$

$$e_{\infty}^{kl} = \frac{e^{kl}}{1 - \alpha_2} \quad k, l = 1, 2, 3 - \text{координатные индексы}$$

“Регулярная” турбулентность в разреженной ($\alpha_2 \ll 1$) дисперсной смеси из-за относительного движения фаз

$$\sigma_{1*}^{kl} = -p_1 \delta^{kl} + \mathbf{T}^{kl}$$

$$\mathbf{T}^{kl} = \alpha_2 \rho_1^0 \left\{ w^2 \delta^{kl} - \frac{1}{2} [w^k w^l - \frac{1}{12} w^2 \delta^{kl}] \right\} \quad \text{-Турбулентное напряжение}$$

а не +1 (Ю.Л. ЯКИМОВ)

ρ_1^0 - истинная плотность несущей фазы

α_2 - объемная доля дисперсных частиц

$w^k = v_1^k - v_2^k$ - скорость относительного движения фаз

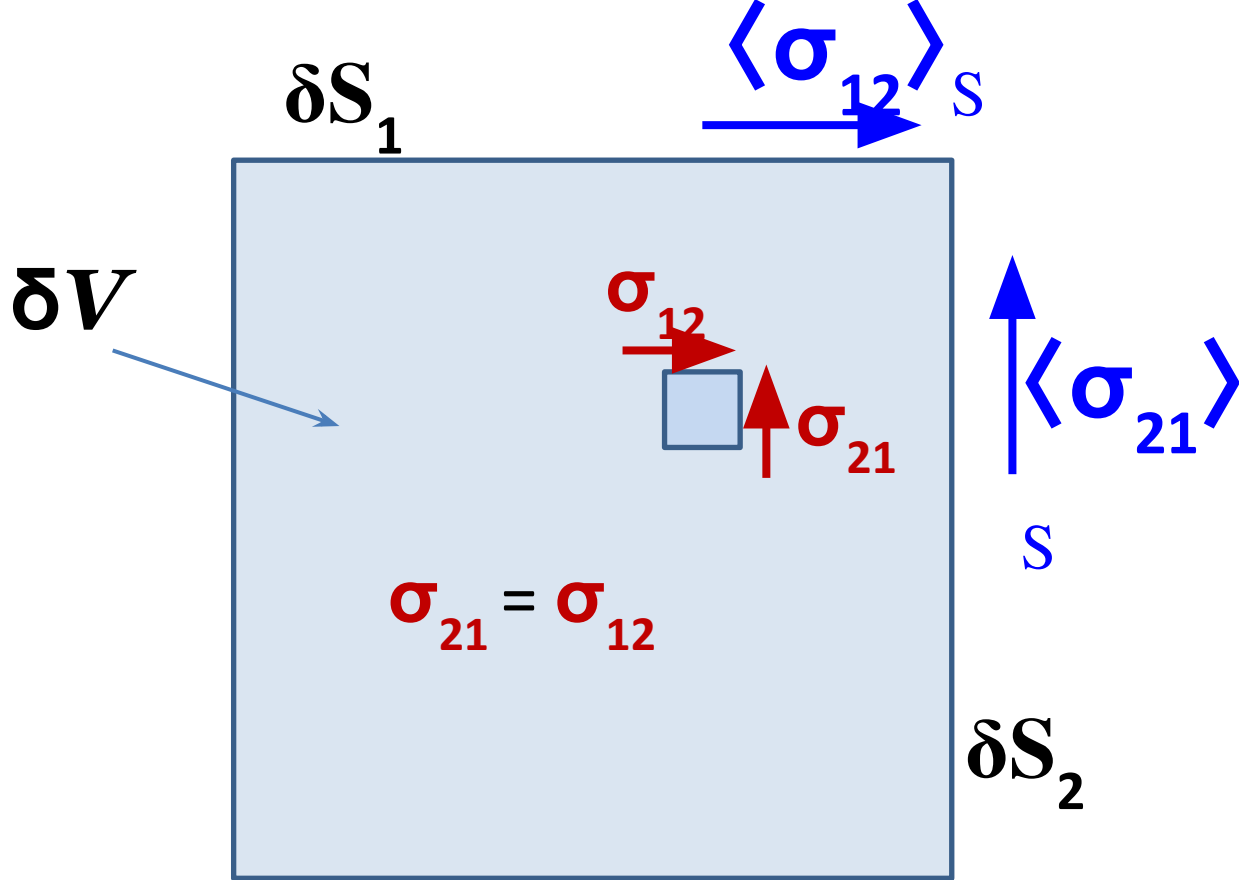
δ^{kl} - символ Кронекера

$k, l = 1, 2, 3$ - координатные индексы

**Спор с Х.А.
Рахматулиным
1967**

**Спор с Ю.А.
Бувичем
1967**

**Спор с В.Н.
Николаевским
1978**



$$\langle \sigma_{21} \rangle_V = \frac{1}{\delta V} \int_{\delta V} \sigma_{21} ds = \langle \sigma_{12} \rangle_V = \frac{1}{\delta V} \int_{\delta V} \sigma_{21} ds$$

$$\langle \sigma_{21} \rangle_S = \frac{1}{\delta S_2} \int_{\delta S_2} \sigma_{21} ds \neq \langle \sigma_{12} \rangle_S = \frac{1}{\delta S_1} \int_{\delta S_1} \sigma_{12} ds$$

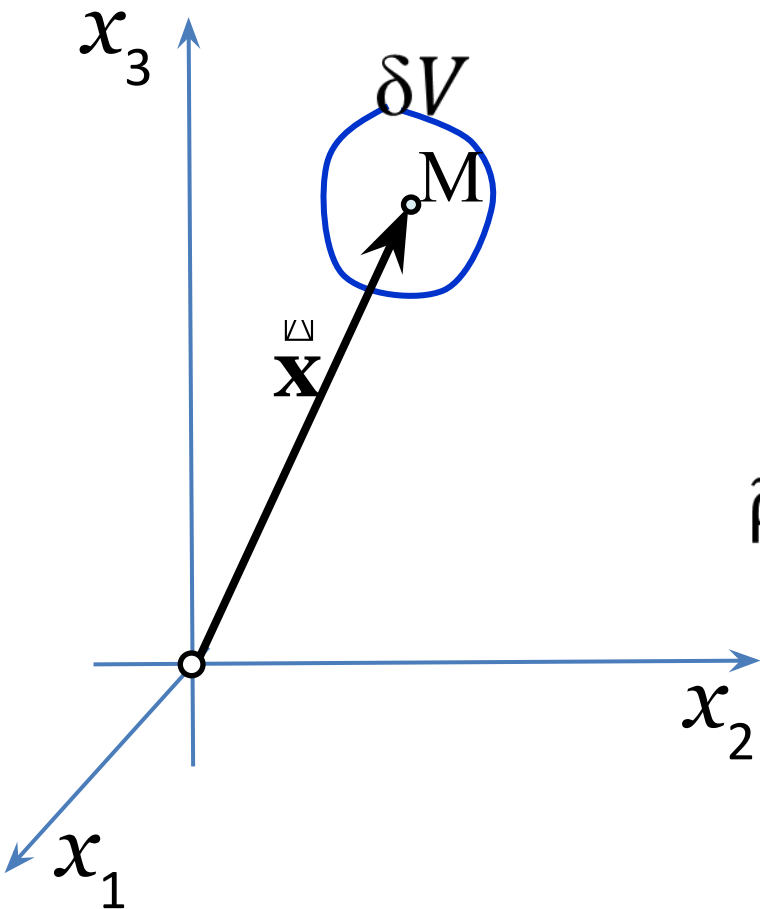
AVERAGE (MACROSCOPIC) VALUES

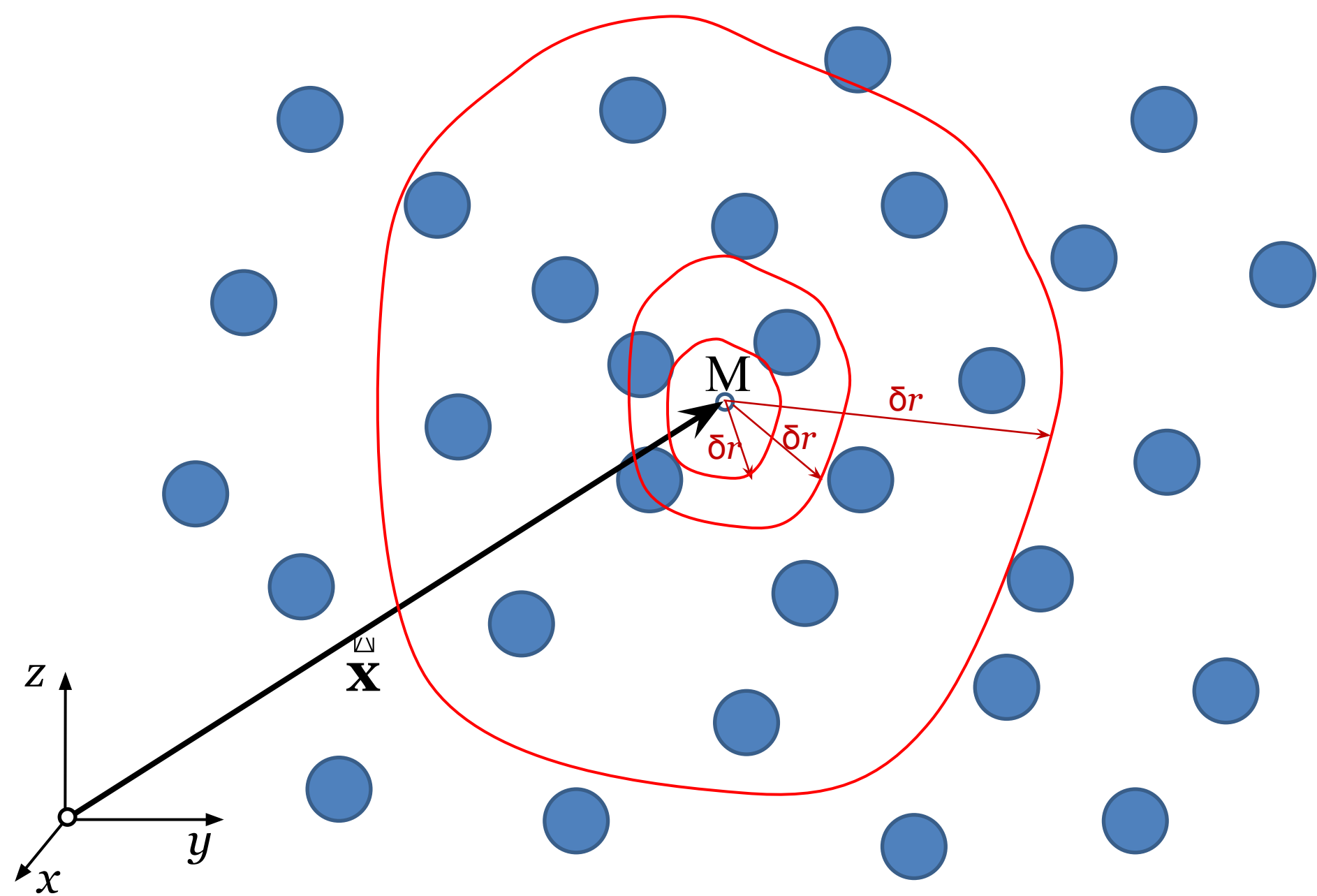
$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{\delta V} \int_{\delta V} \mathbf{x}' dV \quad \text{– Center of the volume} \quad (\delta V \sim (\delta r)^3)$$

$$\delta m = \sum_{i=1}^{i=\delta N} \mu_i$$

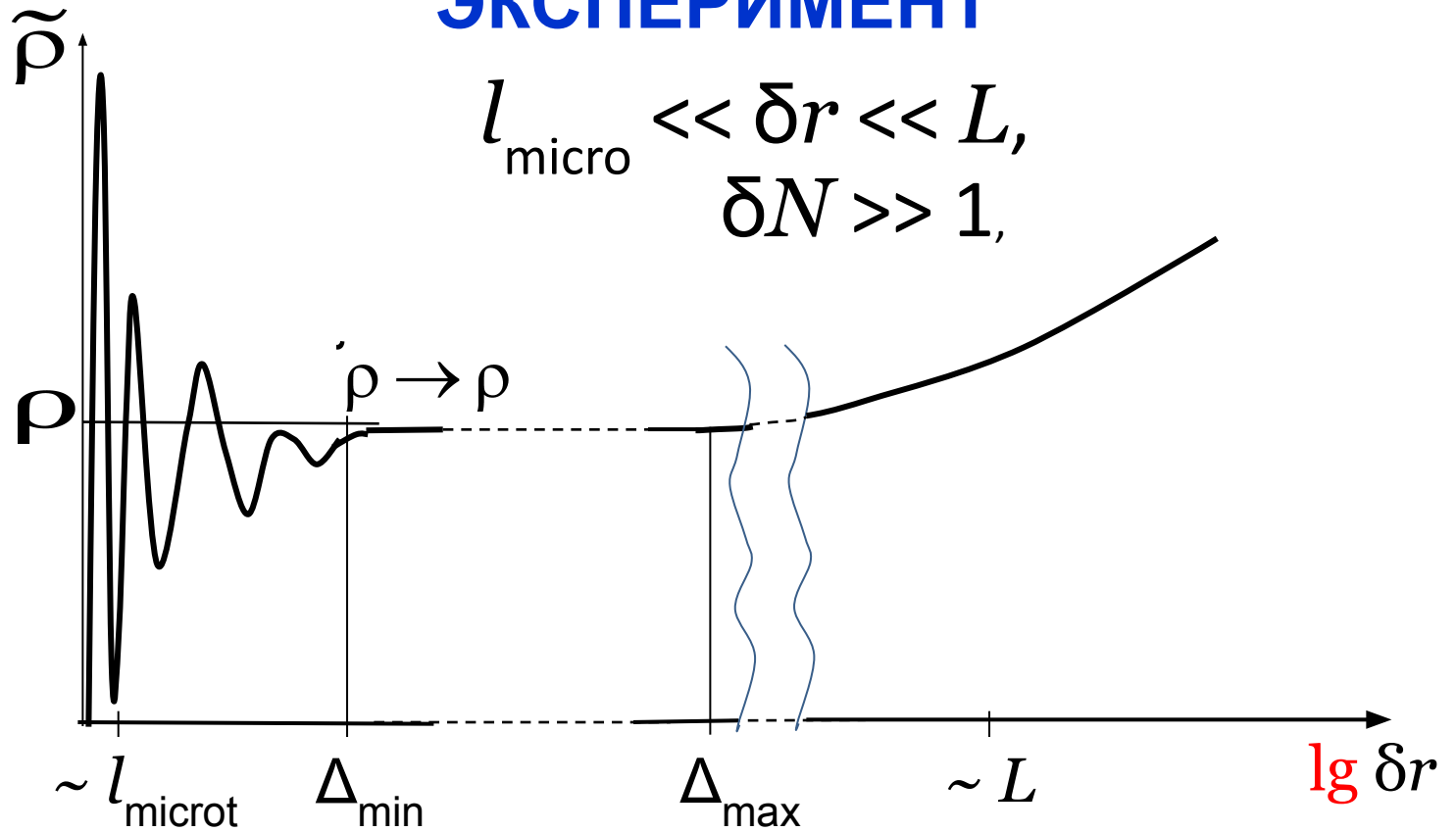
$$\bar{\rho} = \frac{\delta m}{\delta V}$$

$$\bar{\rho} = f(x^{(M)}, y^{(M)}, z^{(M)}, \text{ shape of } \delta V)$$





МЫСЛЕННЫЙ (thoughtful, mental) ЭКСПЕРИМЕНТ



1. $l_{\text{micro}} \ll \Delta_{\text{min}} \ll \Delta_{\text{max}} \ll L$ – Плато - Plateu
 l_{mol} $L_{\text{construction}}$

2. Представительность - Representativity

For any volume

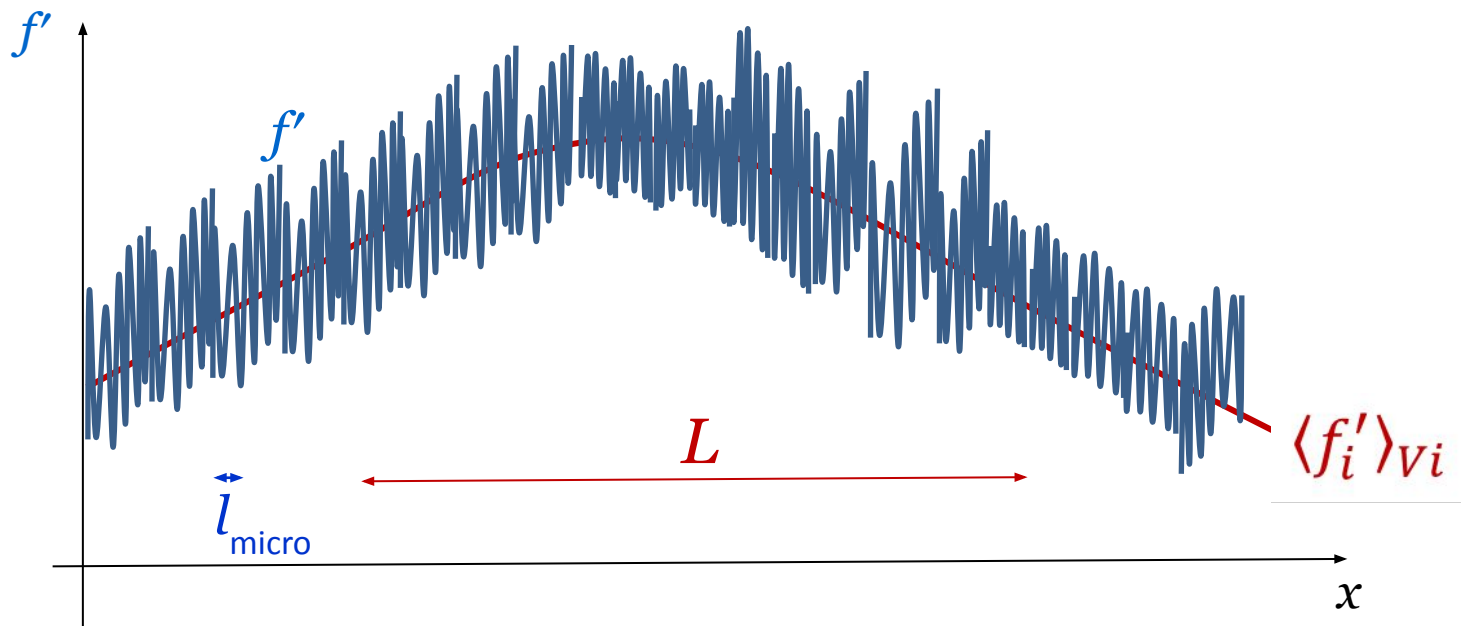
$$m_V = \int_{\Delta V} \rho(t, \mathbf{x}) dV$$

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V}, \quad dm = \rho dV$$

3. Регулярность - Regularity

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \lesssim \frac{\rho_0}{L} \quad L \gg \Delta_{\max}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} \lesssim \frac{\rho_0}{t_0}, \quad \frac{t_0}{\Delta_{\max}} \gg \dots$$

Definition. Непрерывно дифференцируемая функция $\rho(\vec{\mathbf{x}}, t)$ пространственные и временные производные которой не превышают величины порядка ρ_0/L и ρ_0/t_0 , называется регулярной на масштабе длины L и времени t_0 .



1. Плато или устойчивость осреднения

$$l_{\text{micro}} \ll \Delta_{\text{min}} \ll \Delta_{\text{max}} \ll L$$

2. Регулярность

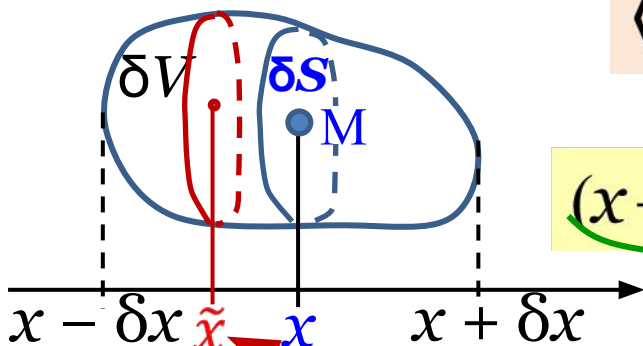
$$\frac{\partial \langle f' \rangle_V}{\partial x^k} \sim \frac{\partial \langle f' \rangle_S}{\partial x^k} \sim \frac{f_0}{L}$$

3. Представительность

$$\int_V f' d'V = \int_V \langle f' \rangle_V dV \quad \int_S f' d'V = \int_V \langle f' \rangle_S ds$$

Теорема. Если **средние поверхностные** и **среднеобъемные** величины **устойчивые** и **регулярные**, тогда они равны между собой в каждой точке

$$\langle f' \rangle_V = \langle f' \rangle_S = \langle f' \rangle$$



$$(x - \delta x < x, \tilde{x} < x + \delta x), \quad \Delta_{\min} < \delta x < \Delta_{\max} \ll L$$

$$\langle f' \rangle_V(x) = \frac{1}{\delta V} \int_{\delta V} f' dV = \frac{1}{\delta V} \int_{x-\delta x}^{x+\delta x} f' dV = \frac{1}{\delta V} \int_{x-\delta x}^{x+\delta x} f' \delta S(x') d'x' =$$

$$\langle f' \rangle_V(x) \text{ и } \langle f' \rangle_S(x)$$

НЕ ЗАВИСЯТ ОТ δx
Устойчивость от вариации δx
ПЛАТО

Теорема о среднем

$$\frac{\langle f' \rangle_S(\tilde{x})}{\delta V}$$

$$\int_{x-\delta x}^{x+\delta x} \delta S(x') d'x'$$

$$\left[\frac{\partial \langle f' \rangle_S}{\partial x} \delta x \right] = \frac{f_0}{L}$$

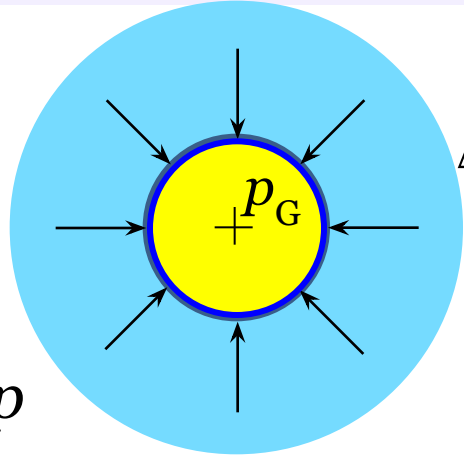
$$= \langle f' \rangle_S(x) + f_0 \mathcal{O}\left(\frac{\delta x}{L}\right) \rightarrow 0$$

1. Лорд Рэлей

(вязкость $\mu_L = 0$, $\rho_L = \text{const}$, 1990)

2. Академик Е.И. Забабахин (вязкость $\mu_L > 0$, $\rho_L = \text{const}$, ПММ, 1960)

$$Za = \frac{a_0}{\mu} \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho_L}}$$



p_L

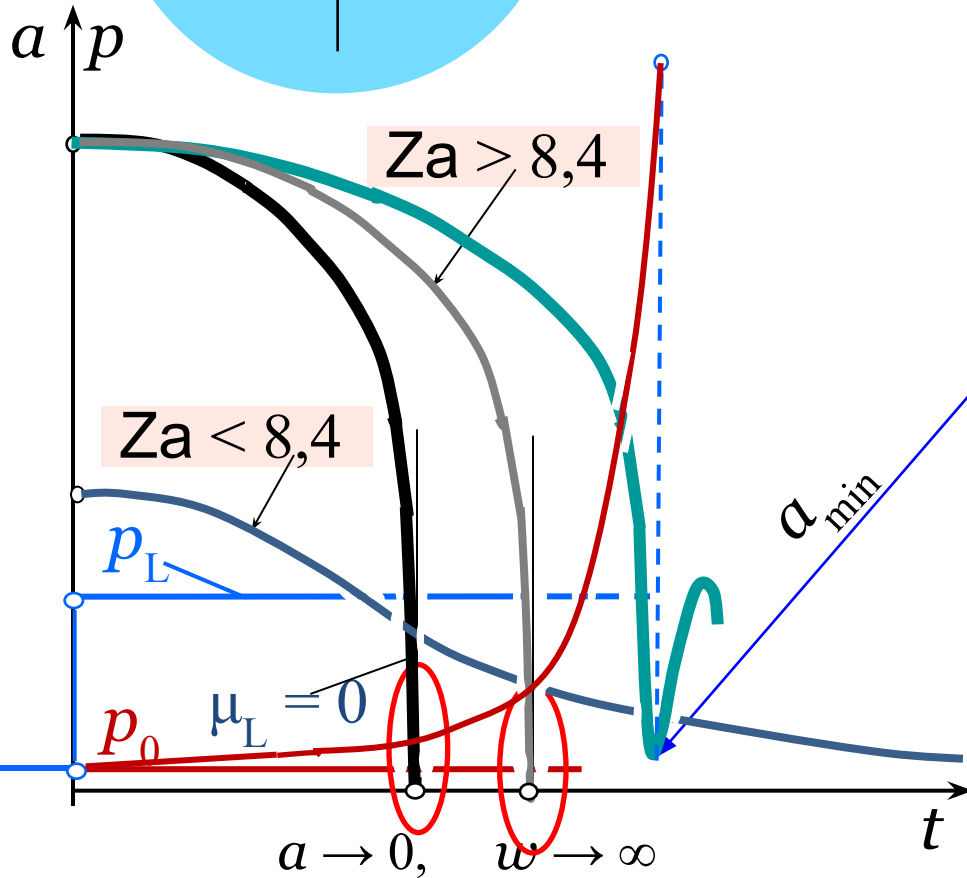
$$\Delta p_0 = p_L - p_0 = \text{const}$$

$$a \frac{d^2 a}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 = - \frac{\Delta p_0}{\rho_L} - 4\mu_L \frac{da}{dt}$$

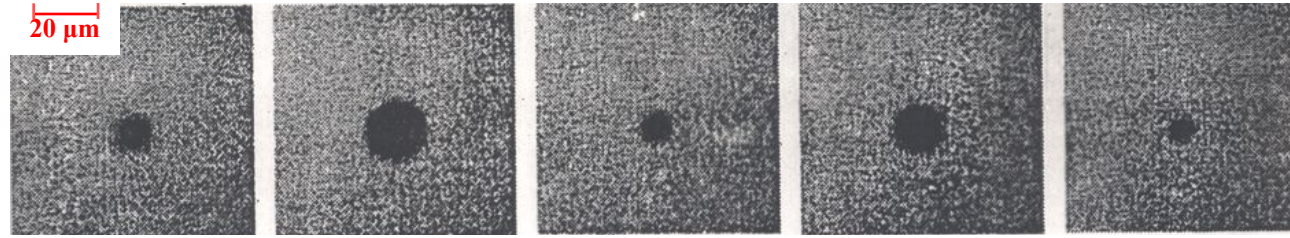
- уравнение Рэлей-Плессета

3. Gas or vapor in the bubble

- Thermal Conductivity
- **Compressibility of the Liquid**
- Evaporation and Condensation
- **SHOCK WAVES**
- Dissociation
- Extreme pressure
- Extreme temperature
- Ionization
- **INSTABILITY of spherical focusing !!!!!**

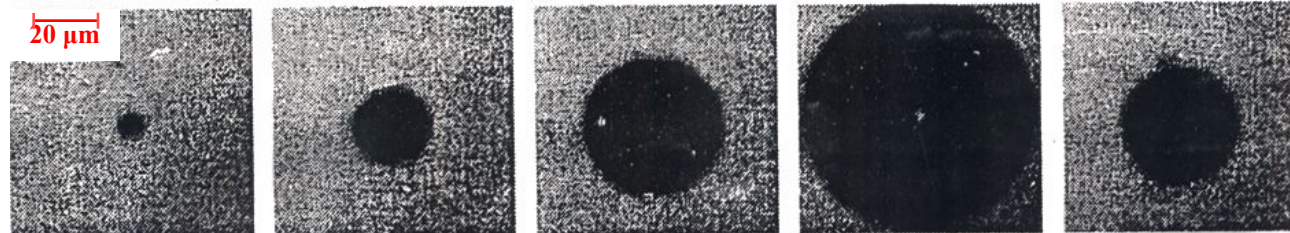


Images of oscillating bubbles

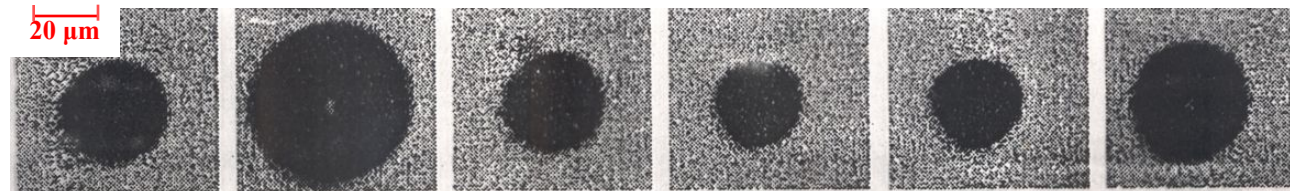


Frame 0 65 95 150 180
Time: μs 0.0 13.3 19.4 30.6 36.7

with
SONOLUMINESCENCE

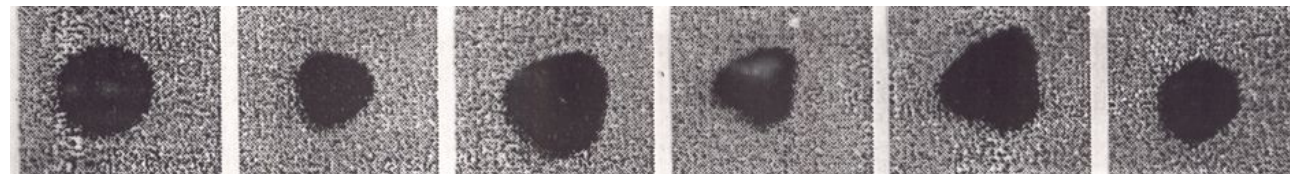


Frame 185 190 199 204 209
Time: μs 37.7 38.7 40.6 41.6 42.6



Frame 45 120 155 160 165 180
Time: μs 9.2 24.5 31.6 32.6 33.6 36.6

Nonspherical shapes and
NO SONOLUMINESCENCE



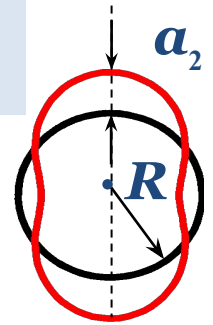
Frame 190 195 210 220 230 245
Time: μs 38.7 39.8 42.8 44.8 46.9 49.9

Рост амплитуды несферических возмущений к моменту их максимального сжатия

Surface of the bubble

$$r = R(t) [1 + \varepsilon_i(t) Y_i(\theta, \phi)],$$

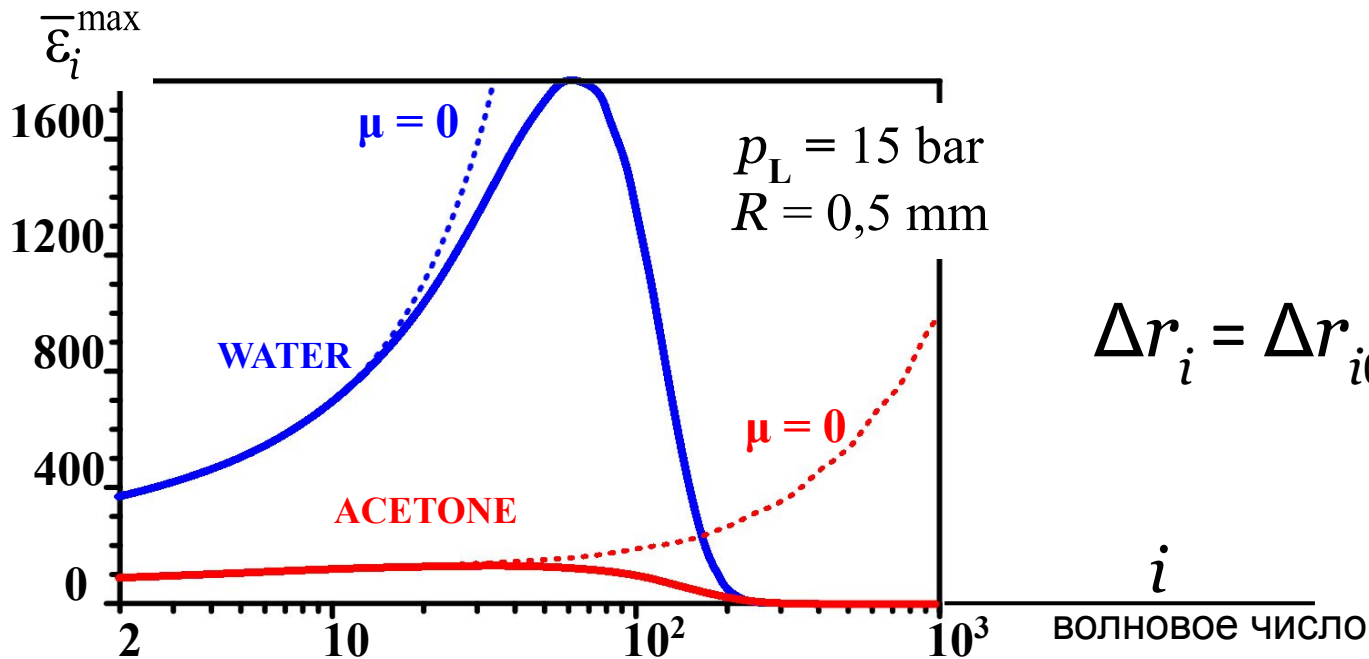
$$\varepsilon_i \equiv \frac{a_i}{R}$$



$$\varepsilon_i(t=0) \equiv \varepsilon_{i0}$$

$$\varepsilon_i^{\max} \equiv \max_t |\varepsilon_i|$$

$$\bar{\varepsilon}_i^{\max} \equiv \frac{\varepsilon_i^{\max}}{\varepsilon_{i0}}$$



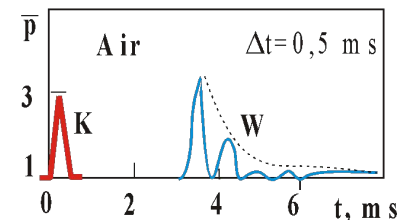
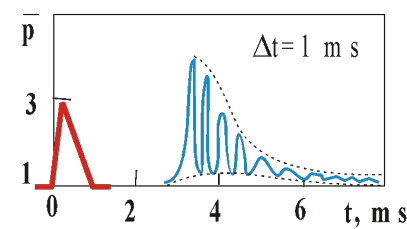
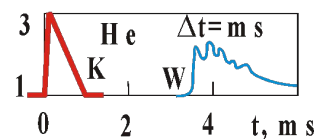
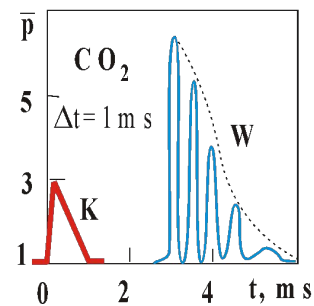
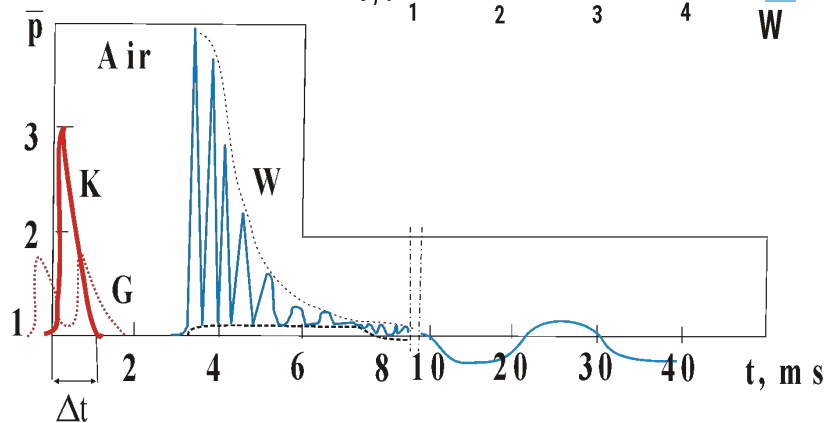
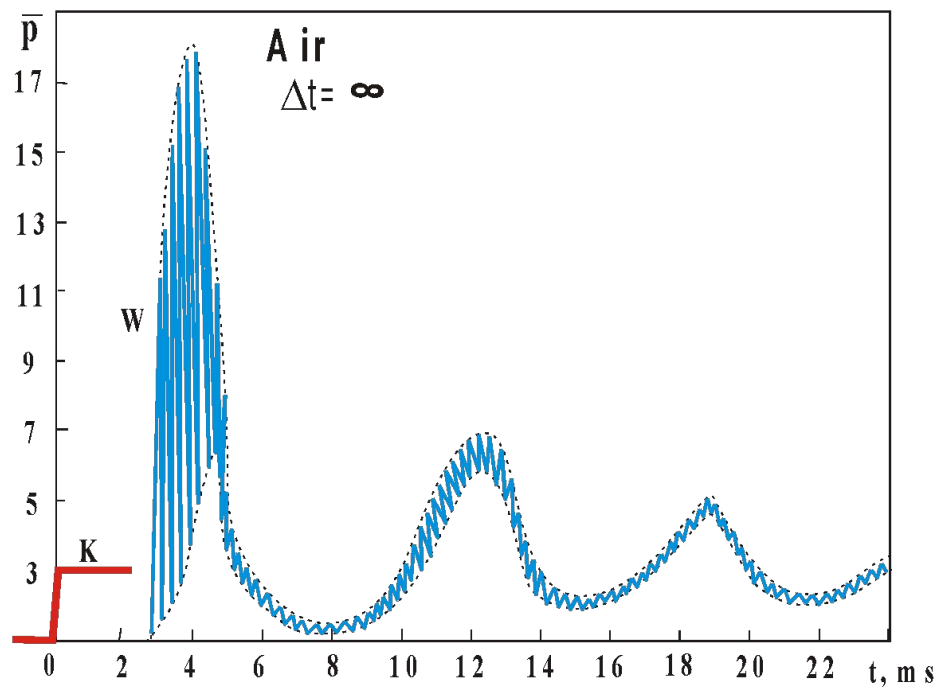
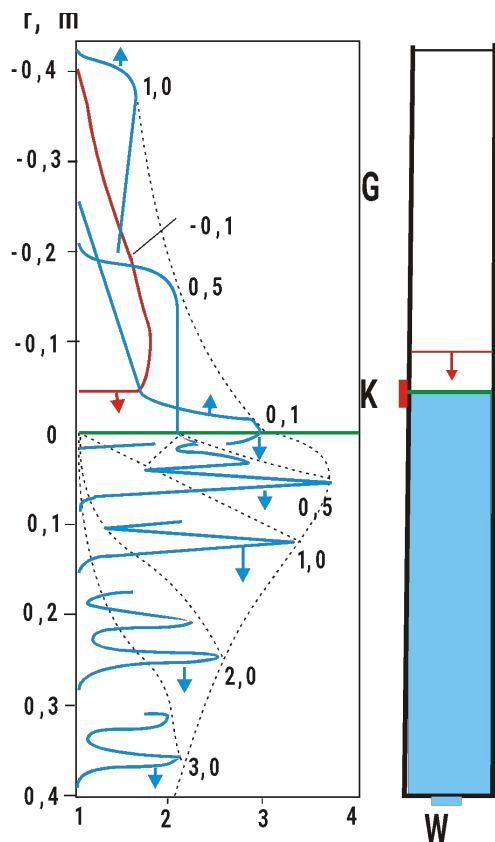
$$\Delta r_i = \Delta r_{i0} \exp \varepsilon_i t$$

i

ВОЛНОВОЕ ЧИСЛО

Усиление ударных волн при отражении от пузырькового экрана

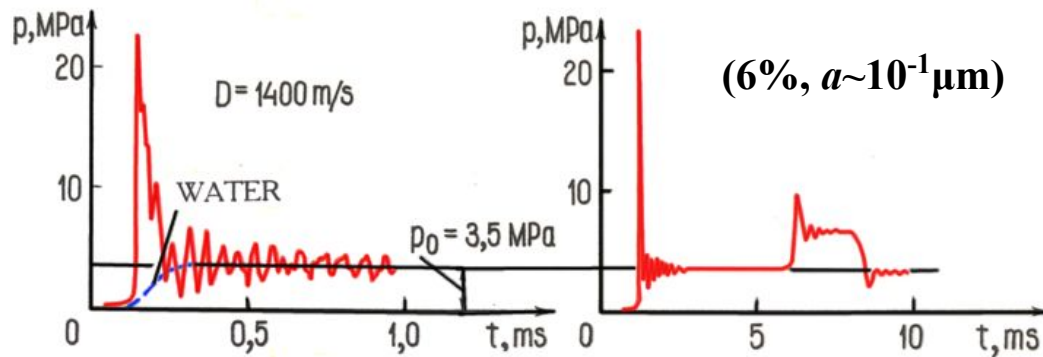
— No bubbles
 — With bubbles
 $\alpha_0 = 1\%$



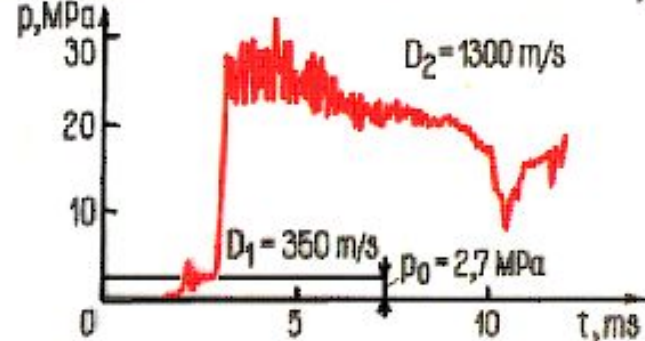
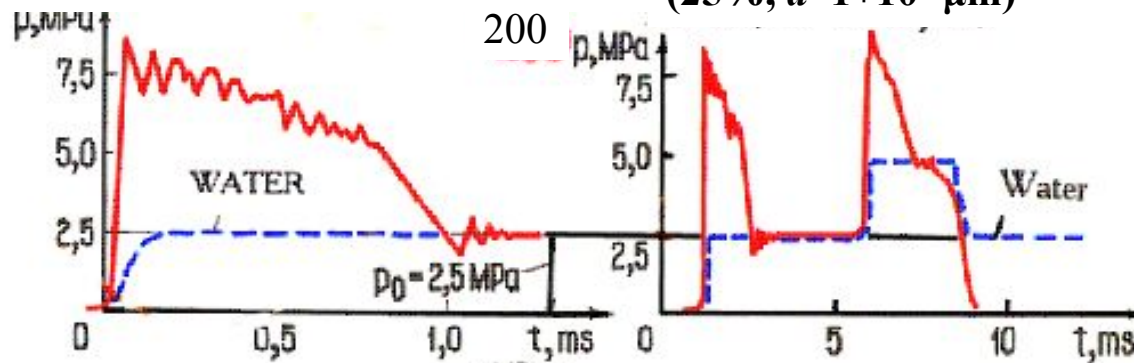
Δt ↑

AMPLIFICATION OF SHOCK WAVES IN CLAY SUSPENSIONS (with bubbles)

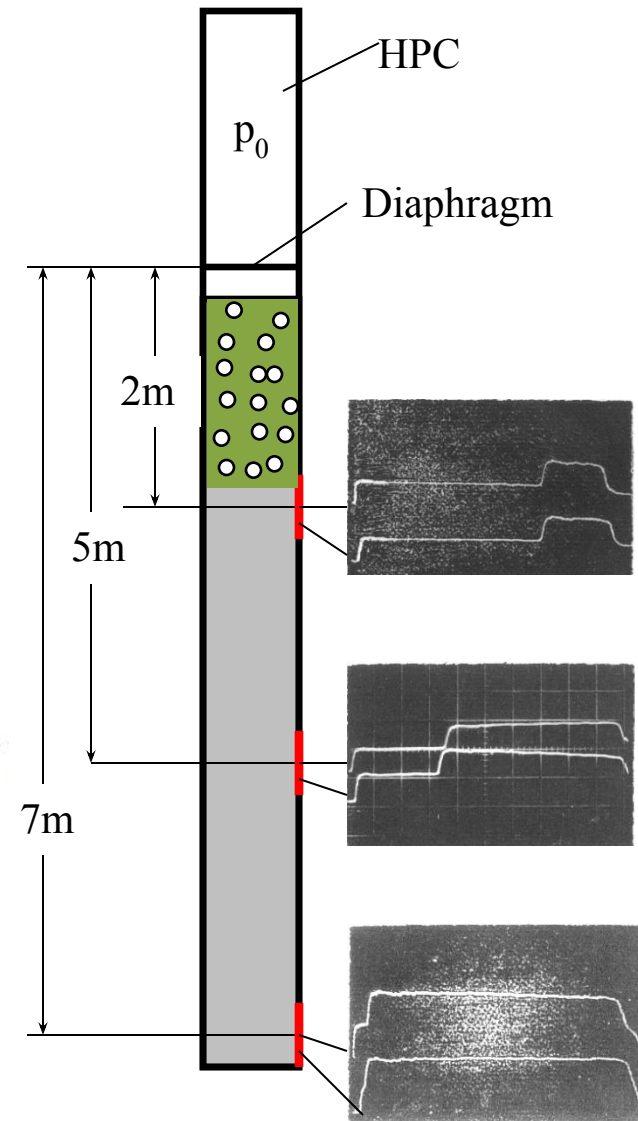
WATER+MONTMORILLONITE



WATER+KAOLINITE (25%, $a \sim 1+10^{-1} \mu\text{m}$)



Reflection from the wall
Water+Montmorillonite
(15%, $a \sim 10^{-1} \mu\text{m}$)



Теплофизические параметры пузырьковой жидкости

a - радиус пузырьков (монодисперсная смесь)

n - числовая концентрация пузырьков

$\alpha_G = \frac{4}{3} \pi a^3 n$ - Объемная концентрация пузырьков ($\alpha_G < 0,1$)

ρ_L - Плотность жидкости ($\rho_L \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$)

ρ_G - Плотность газа ($\rho_G \approx 10^0 \text{ kg/m}^3$)

$\rho \approx \rho_L = \rho_L (1 - \alpha_G)$ - плотность двухфазной среды

λ_i теплопроводность жидкости ($i = L$) and gas ($i = G$)

c_i - теплоемкость жидкости ($i = L$) and gas ($i = G$)

C_i - скорость звука в жидкости ($i = L$) и газе ($i = G$)

γ_G - показатель адиабаты газа

μ_L - вязкость жидкости

Σ - поверхностное натяжение

l - теплота парообразования

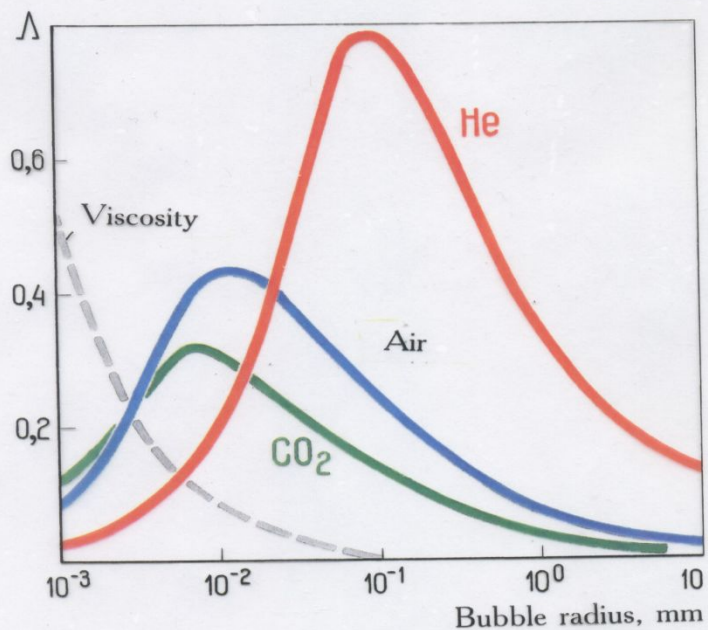
Классическое уравнение состояния

$$\rho = F(p, T)$$

Локальная деформационная инерция в пузырьковых жидкостях

$$\rho_L a^3 \dot{\rho} = F(p, \rho, \mu_L \dot{\rho}, \dots, v_G^{(T)}, v_L^{(T)}).$$

Коэффициент (декремент) затухания свободных колебаний объема пузырька Λ



$$\Delta r = \Delta r_0 e^{-\Lambda \frac{\omega t}{2\pi}}$$

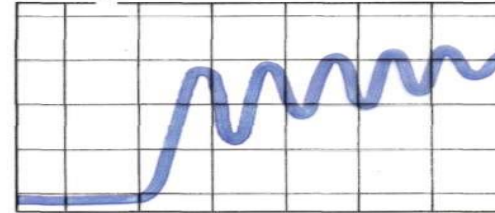
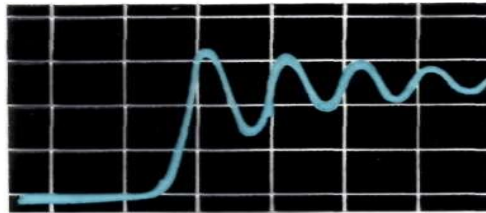
THERMAL RELAXATION

THERMAL RELAXATION OF SHOCK WAVES IN BUBBLY LIQUIDS

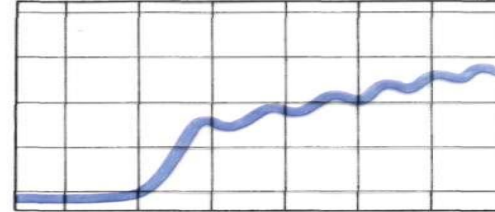
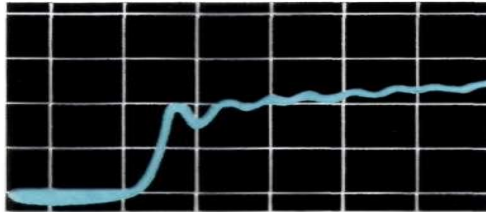
Experiment

Theory (*Nigmatulin*)

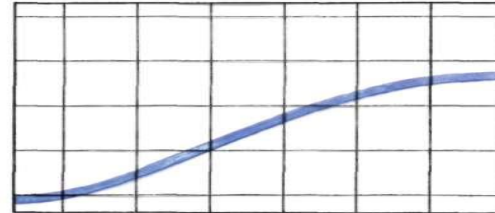
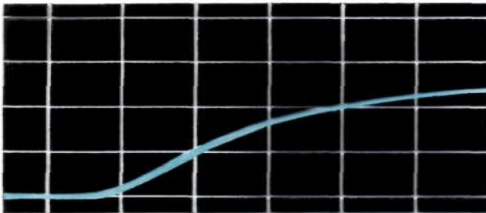
Water+CO₂



Water+Air



Water+He



0,2 bar

2 ms

$T_0 = 300 \text{ K}$; $p_0 = 1,2 \text{ bar}$; $\alpha_0 = 1\%$; $a_0 = 1 \text{ mm}$

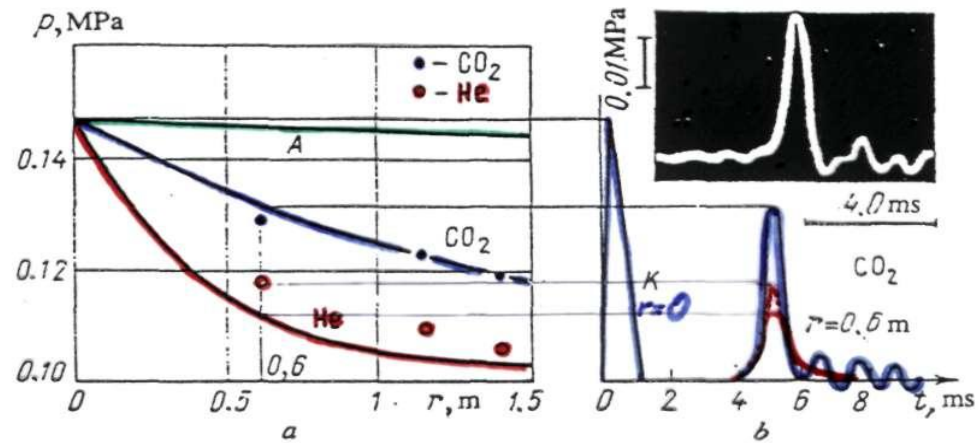
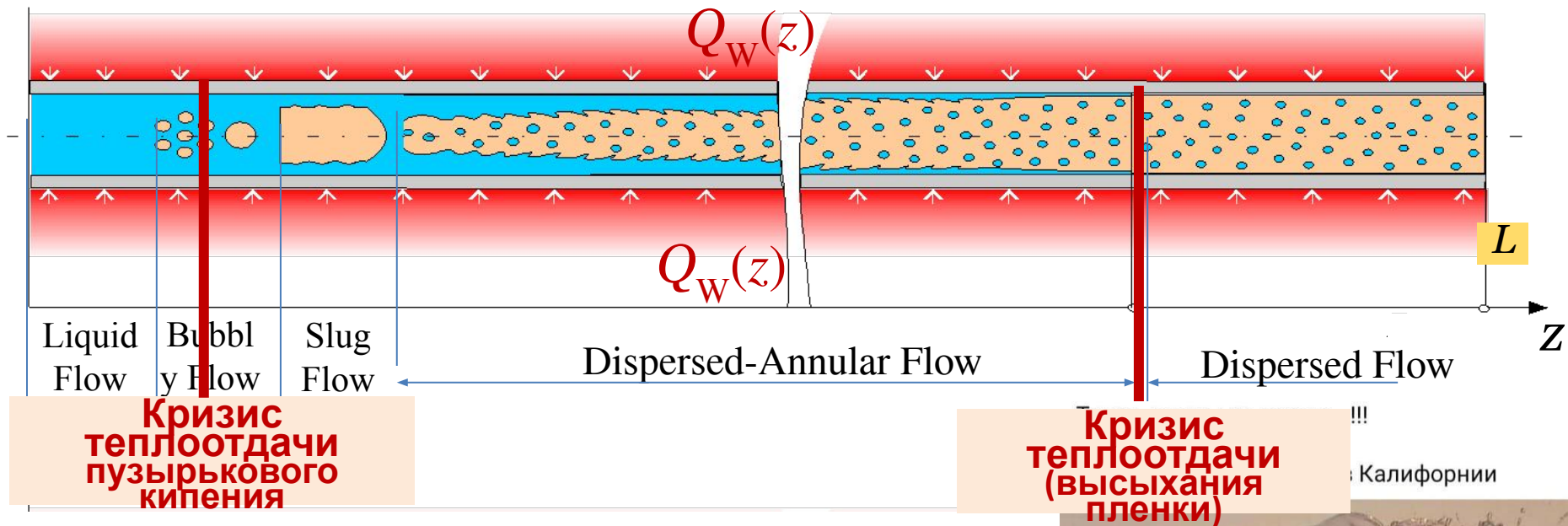


Figure 6.7.8 Predicted (A. A. Gubaidullin) and experimental (V. V. Kuznetsov et al., 1977) data on the attenuation of a triangular impulse whose reference oscillogram at $r = 0$ is shown by line K (intensity of the original impulse $\Delta\bar{p}_0 = \Delta p_0/p_0 = 0.48$, duration (length) $\Delta t_0 = 1.0$ microseconds) related to water with bubbles of carbon dioxide (CO_2), helium (He), and hypothetical adiabatic (A) gas. The mixture parameters: $p_0 = 0.01$ MPa, $T_0 = 293$ K, $\alpha_{20} = 0.01$, $a_0 = 1.4$ mm. Figure 6.7.8a shows variation of maximum pressure with depth r ; Fig. 6.7.8b shows both predicted and experimental pressure oscillograms $p(t)$ for the CO_2 bubble case on depth $r = 0.6$ m.

$$\alpha_{G0} = 0,01, \quad a_0 = 1,4 \text{ mm}$$

$$m_{G0} = \frac{\rho_G \alpha_G}{\rho_L \alpha_L} = 10^{-5}$$

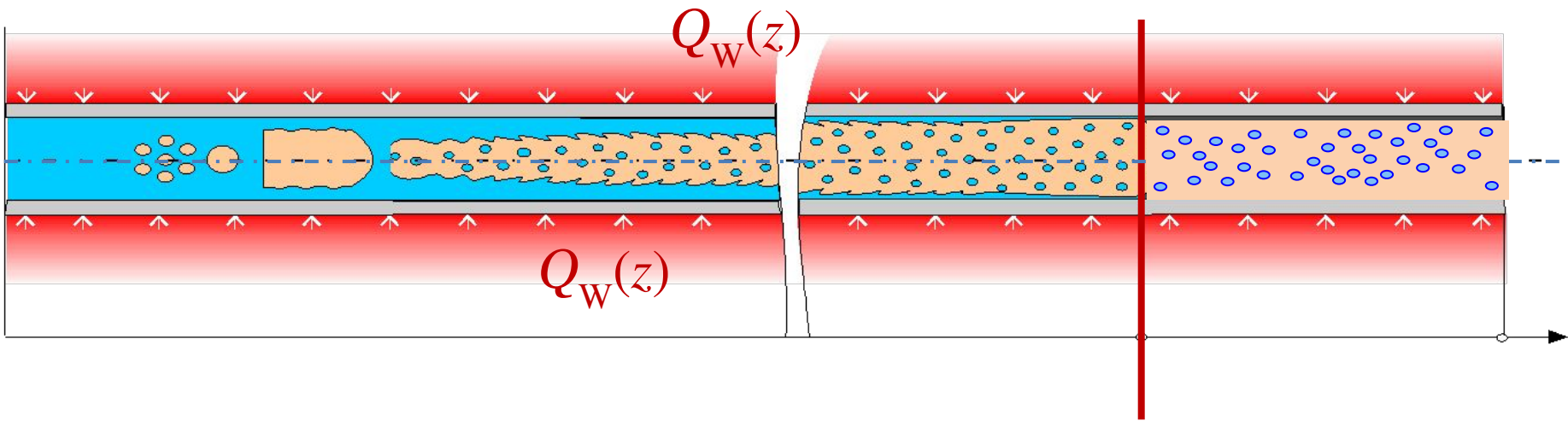


- 1. Vertical flow – axis-symmetrical.
- 2. Horizontal flow – axis-symmetrical, if

$$\frac{\rho_G v^2}{\rho_L g D} \gg 1, \quad \Rightarrow \quad \frac{\rho_G}{\rho_L} \mathbf{Fr} \gg 1 \quad \left(\mathbf{Fr} = \frac{v^2}{gD} \right)$$
- 3. Dispersed – annular flow, if $\phi \equiv \alpha_G \geq 0.8, \quad v \geq 10 \text{ m/s}$

Ядерный реактор и парогенератор
 $D \sim 1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}, \quad L \sim 10 \text{ m}$





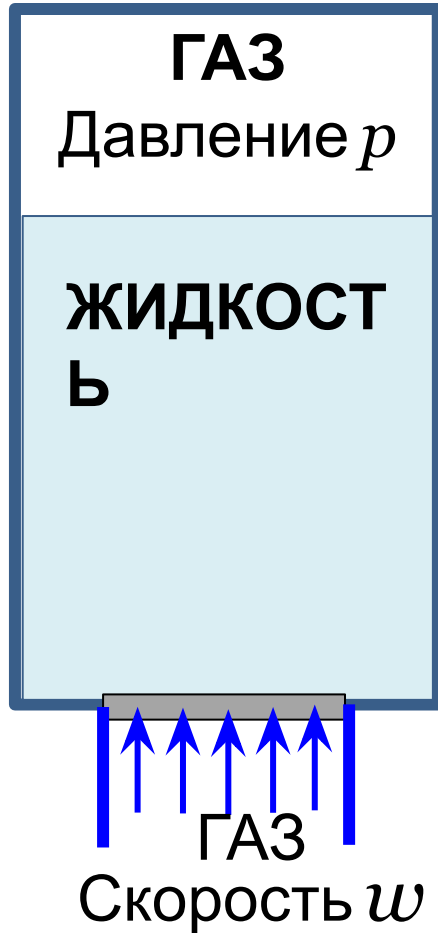
$$L \sim 1 \text{ km}, D = 0,1 \text{ m}$$

Трубчатая печь для нефтепереработки
(производства нефтяного кокса)

$$D \sim 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}, L \sim 10^3 \text{ m (horizontal)}$$

А.С.
Эйгенсон
Водяная модель
Нигматулина

Критическая скорость: $w_* = f(\rho_L, \rho_G, \mu_L, \Sigma, p, g) \sim 10^{-1}$ м/с



$$w_{(\Sigma g \rho)} = \sqrt[4]{\frac{\Sigma g}{\rho_L}} \sim 10^{-1} \text{ м/с,}$$

$$p_{(\Sigma g \rho)} = \rho_L (w_{(\Sigma g \rho)})^2 = \sqrt{\rho_L \Sigma g} \sim 25 \text{ Па,}$$

$$\delta_{(\Sigma g \rho)} = \sqrt{\frac{\Sigma}{\rho_L g}} \sim 10^{-2} \text{ м,}$$

$$\mu_{(\Sigma g \rho)} = \rho_L w_{(\Sigma g \rho)} \delta_{(\Sigma g \rho)} = \sqrt[4]{\frac{\rho_L \Sigma^3}{g}} \sim 10^{-1} - 10^0$$

$$\mathbf{Re}_{(\Sigma g \rho)} \sim \frac{\rho_L \delta_{(\Sigma g \rho)} w_{(\Sigma g \rho)}}{\mu_{(\Sigma g \rho)}} \sim 10^1$$

$$\rho_G (w_*)^2 = k_*^2 \rho_L w_{(\Sigma g \rho)}^2$$

(k_*^2 - безразмерный коэффициент)

$$k_* = \frac{w_*}{w_{(\Sigma g \rho)}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

(С.С.

(С.С.

Кутателадзе)

$$k_* = \frac{w_*}{w_{(\Sigma g\rho)}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

(С.С.

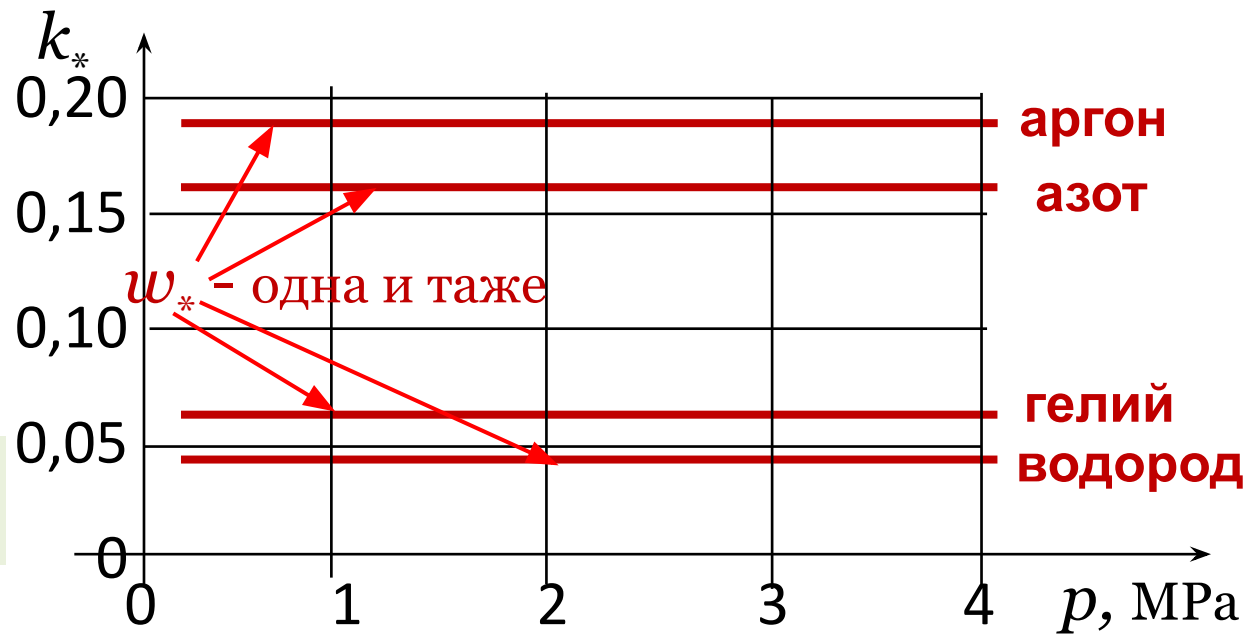
Кутателадзе)

$$\rho_G = \frac{M p}{R T}$$

M – молекулярный вес

R = 8310

$$C_G = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho_G}}, \quad M_* = \frac{w_*}{C_G}$$



$$k_* = \frac{w_*}{w_{(\Sigma g\rho)}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{w_*}{w_{(\Sigma g\rho)}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L} \times \frac{\gamma p}{\rho_L}} = \frac{M_*}{w_{(\Sigma g\rho)}} \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho_L}}$$

Капиллярно-акустический эффект при $M_ \sim 10^{-3}$ (???)*

Критическая скорость w_* **не зависит** от ρ_G , M и C_G .
От них **зависит только** безразмерный параметр k_*

$$\rho_G (w_*)^2 = k_*^2 \rho_L w_{(\Sigma g\rho)}^2$$

(k_*^2 - безразмерный коэффициент)

Опыт

$p \downarrow$ тогда **Галилея** $v \uparrow$

$$F = C_D \frac{\rho_G v^2}{2} \frac{\pi D^2}{4} \quad (C_D \approx 0,5 \text{ только для } \mathbf{Re} > 10^3)$$

$$D < 100 \text{ мкм}$$

$$\text{Если } \mathbf{Re} = \frac{\rho_G D v}{\mu_G} \leq \sim 10^1, \text{ тогда } C_D = \frac{24}{\mathbf{Re}}$$

$$F = \frac{24 \mu_G \rho_G v^2}{\rho_G v D} \frac{\pi D^2}{4} = \mathbf{3\pi\mu_G D v} \quad (\text{не зависит от } \rho_G)$$

Сила

Стрелка

$$3\pi\mu_G D v = \rho_L \frac{\pi D^3}{6} g, \quad v = \frac{\rho_L D^2 g}{18 \mu_G}$$
$$\mathbf{Re} = \frac{\rho_G \rho_L D^3 g}{18 \mu_G^2} \leq 10$$

для $\rho_G \sim 1 \text{ кг/м}^3$, $\rho_L \sim 10^3 \text{ кг/м}^3$, $g \approx 10 \text{ м/с}^2$, $D < 100 \text{ мкм}$

Закон Дарси: скорость w от плотности ρ не зависит

$$\mu w = -k \frac{dp}{dz}$$



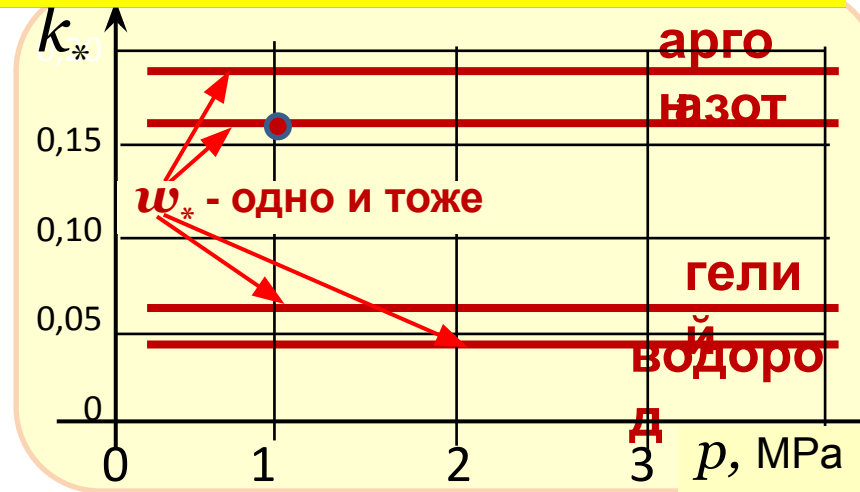
$$\rho_G (w_*)^2 = k_*^2 \rho_L w_{(\Sigma g \rho)}^2 \quad (k_*^2 - \text{безразмерный коэффициент, С.С. Кутателадзе})$$

$$k_* = \frac{w_*}{w_{(\Sigma g \rho)}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

$$\rho_G = \frac{\chi p}{\mathcal{R} T}$$

$$\sqrt{p} w_* = f(\rho_L, g, \mu_L, \Sigma)$$

(согласно эксперименту)



$$\mu_L w_* = k_{**} \mu_{(\Sigma g \rho)} w_{(\Sigma g \rho)} \quad (k_{**} - \text{безразмерный коэффициент})$$

• $k_* = 0,16$, $p = 10^6$ Pa, $w_* = 0,24$ m/s,

Вода+Азот, $\rho_L = 10^3$ kg/m³, $\rho_G = 11,5$ kg/m³, $\Sigma = 0,073$ kg/s²

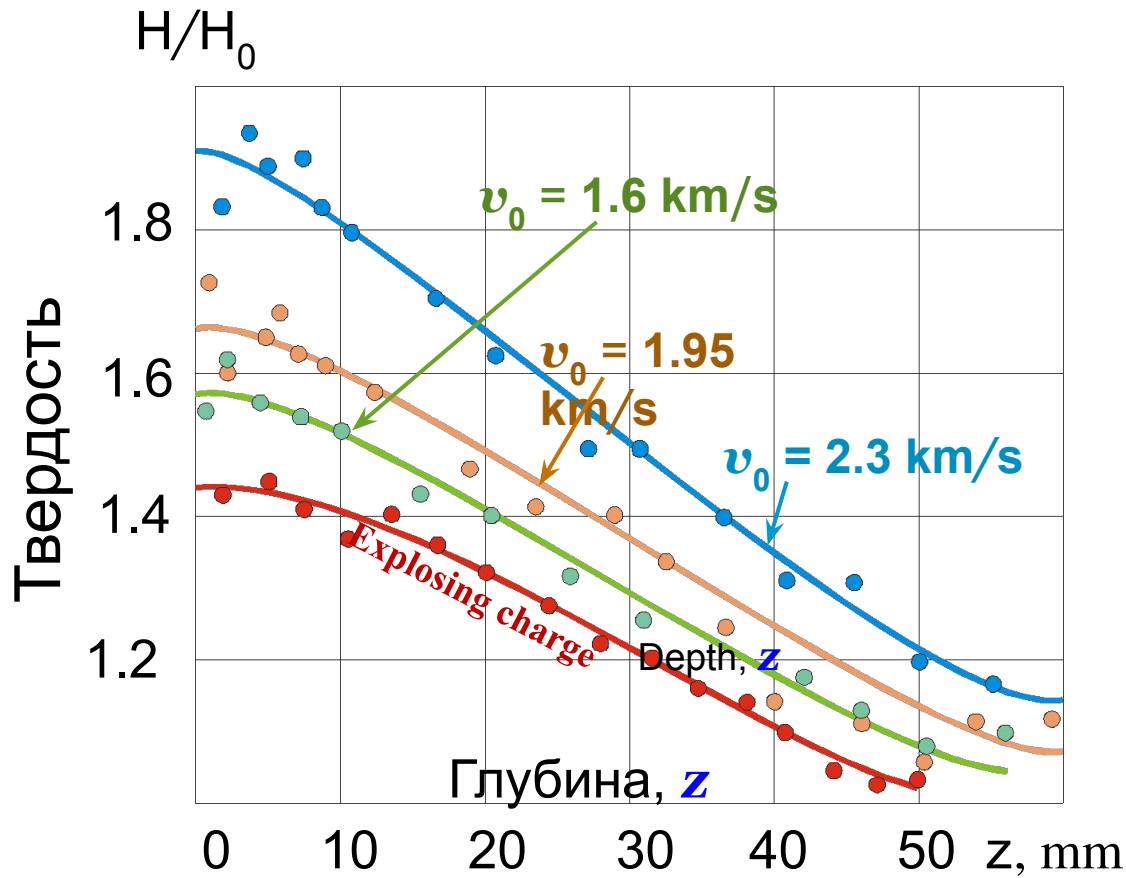
$$k_{**} = \frac{w_{(\Sigma g \rho)}}{w_*} \left(\frac{\mu_L}{\mu_{(\Sigma g \rho)}} \right) \sqrt{\frac{p}{p_{(\Sigma g \rho)}}} = \frac{\mu_L}{\Sigma} \frac{\sqrt{p}}{\sqrt[4]{\rho_L \Sigma g}} w_*, \quad k_{**} = 0,64$$

$$w_* = 0,64 \frac{\Sigma}{\mu_L} \frac{\sqrt[4]{\rho_L \Sigma g}}{\sqrt{p}}$$

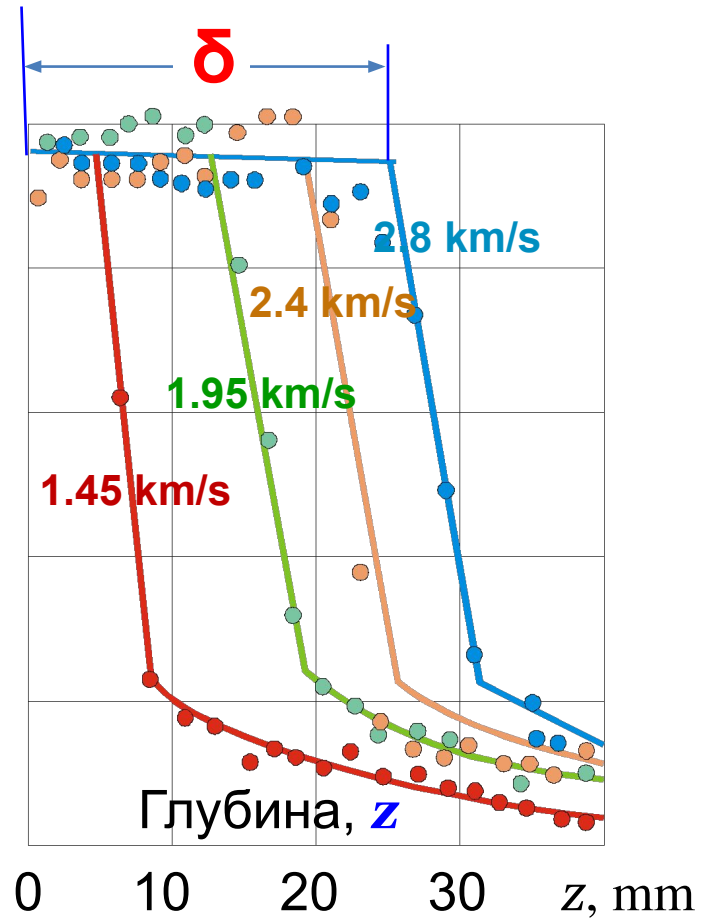
Ударные волны в металлах с фазовыми переходами



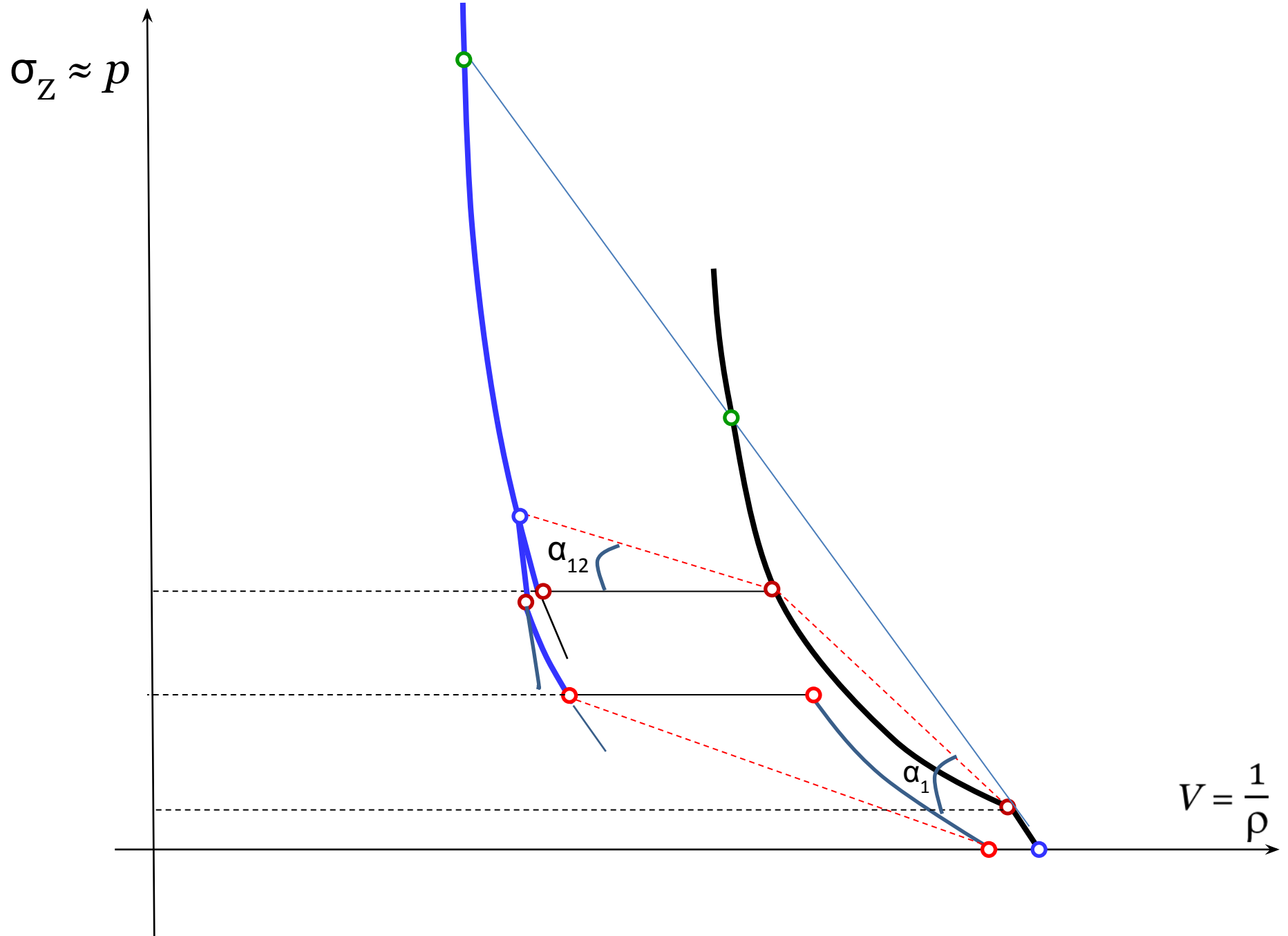
Упрочнение взрывом

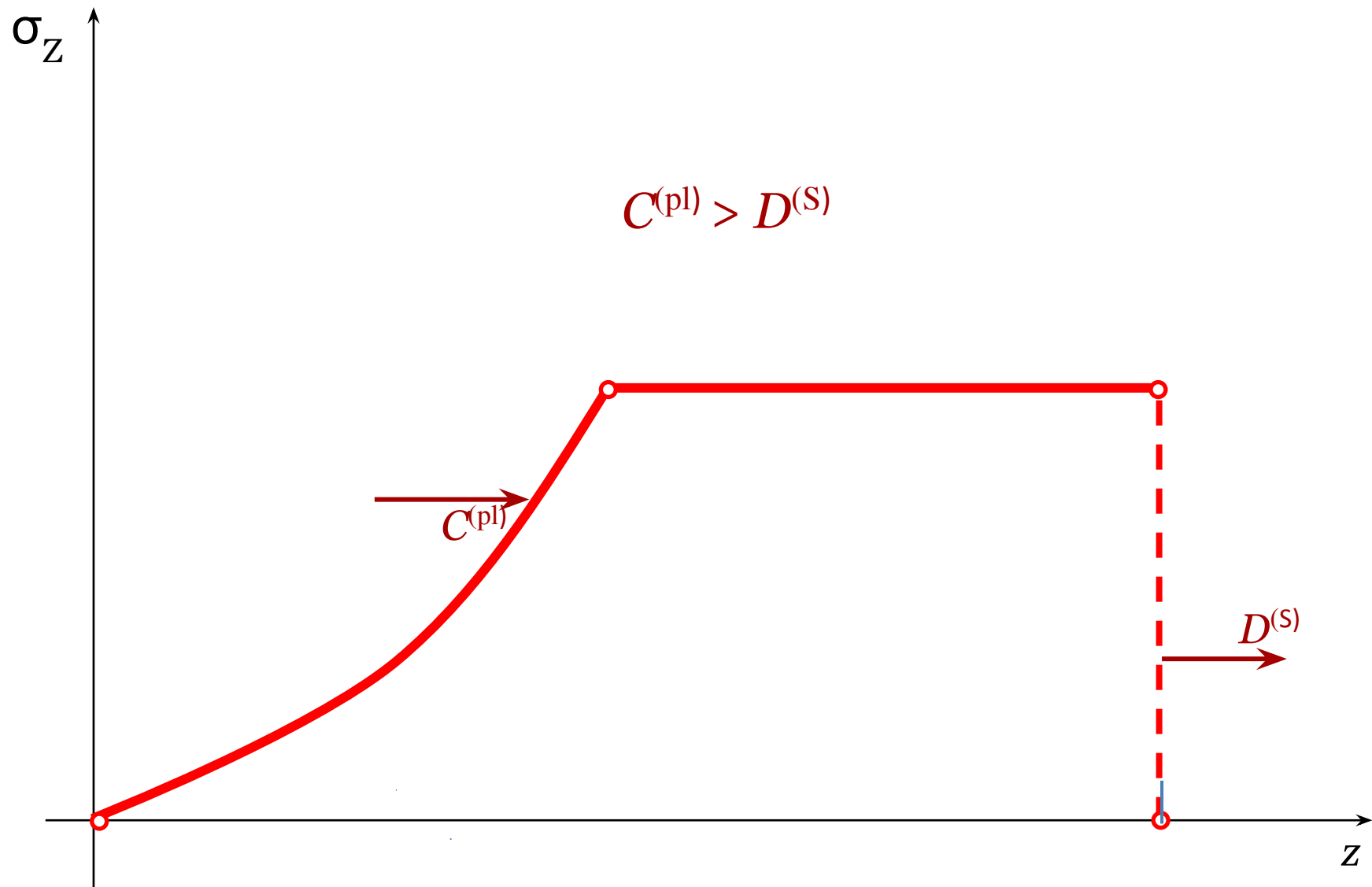


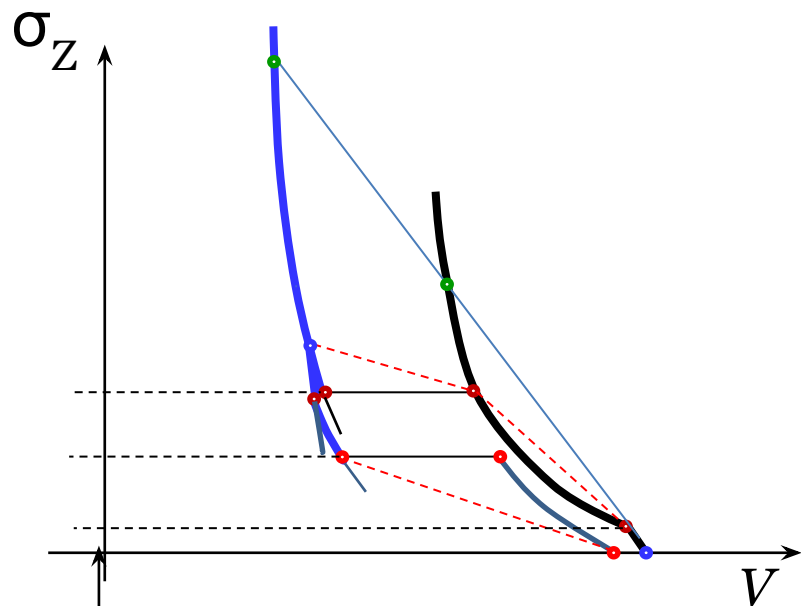
Марганцевистая сталь
(Fe = 87%, Mn = 13%)



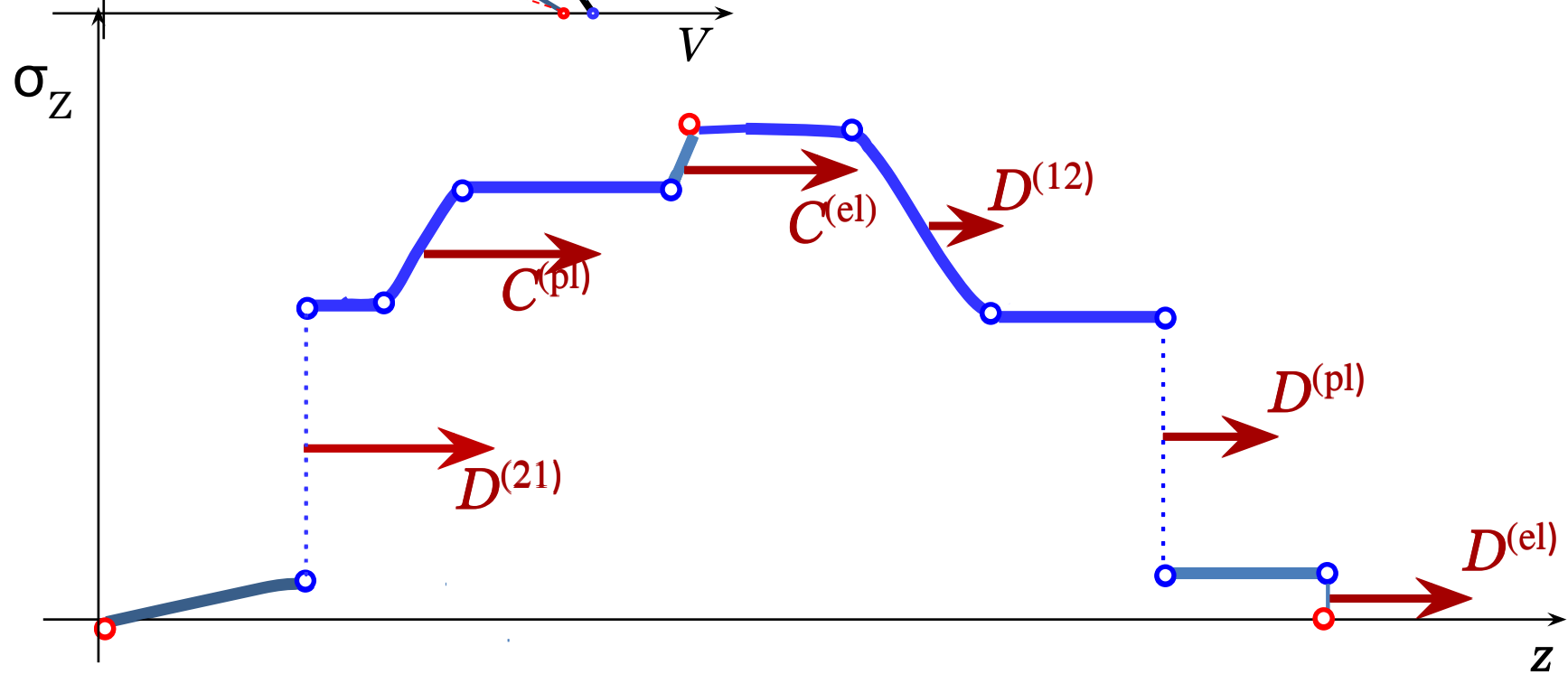
Железо (Fe \approx 100%)

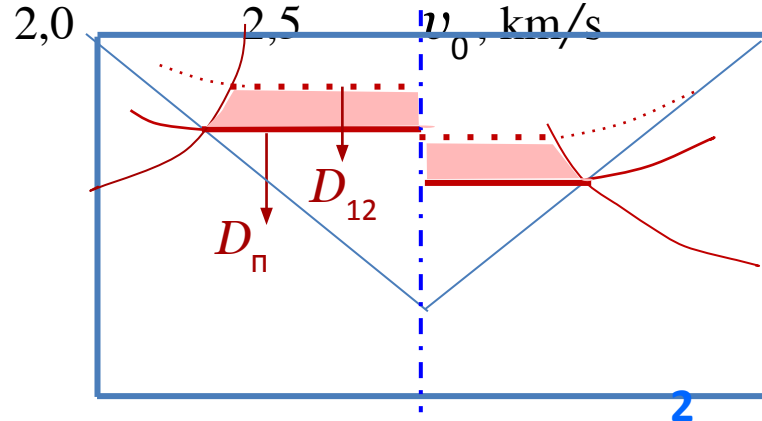
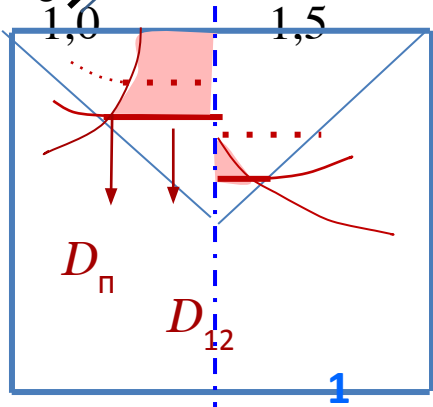
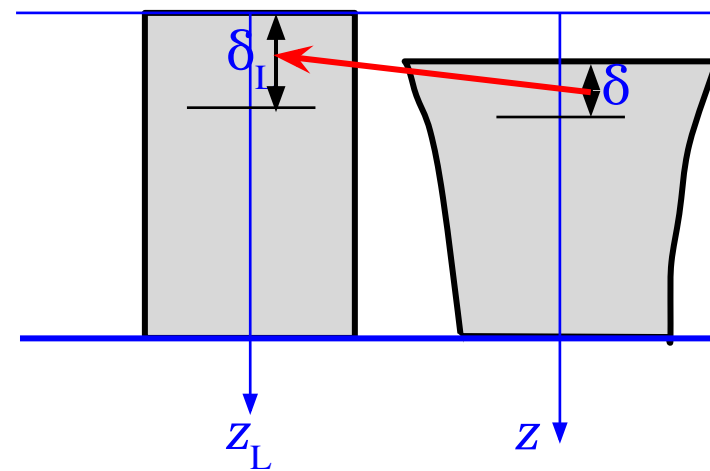
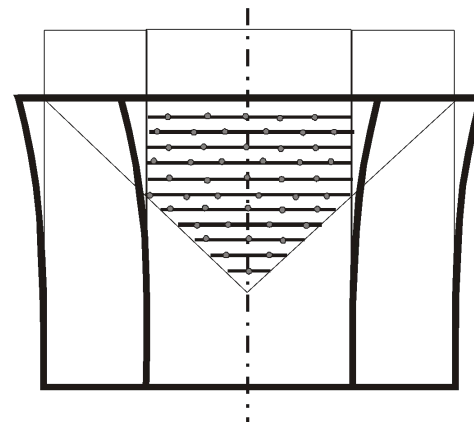
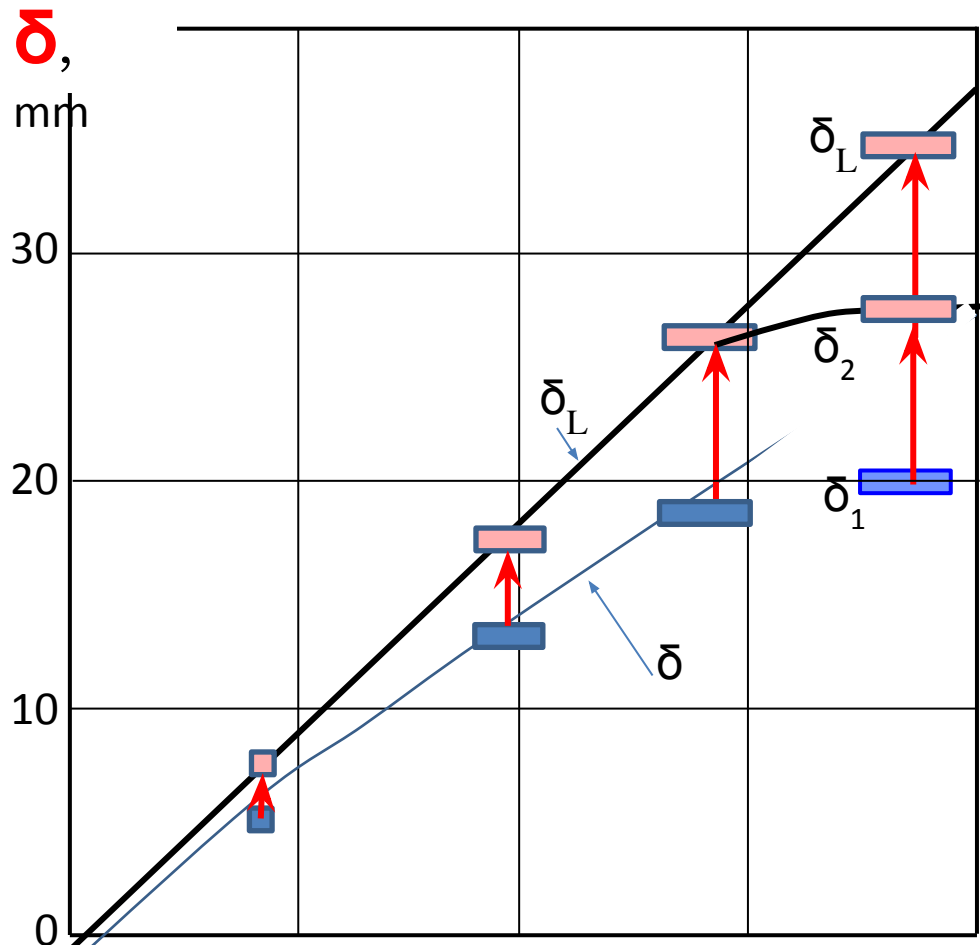






$$D^{(12)} < D^{(p1)}$$





1968 – 1970 гг.

**КОНЦЕПЦИЯ
ПРЕОДОЛЕНИЯ СТАГНАЦИИ И ПЕРЕХОДА
РОССИИ
К УСТОЙЧИВОМУ
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ РОСТУ**

Тезис –
**социально-экономические дела отдать чиновникам,
политическим партиям и менеджерам
(чтобы ученые занимались только наукой),
ошибочен и ВРЕДЕН.**

Это приводит к тому, что

- наука и мнение научных работников игнорируется
- чиновник, «менеджер» и партийные деятели командуют учеными

Для науки это очень сильный тормоз.

**В решении крупных социально-экономических проблем
всегда есть научная компонента**

**Вместо научного подхода происходит МЕНЕДЖЕРИЗАЦИЯ
реальности и
снижение уровня принимаемых решений
происходит во всем мире.
Пример: решения Европы по энергетике**

Нигматулин Р.И. **Об оптимальной доле государственных расходов в ВВП и темпах экономического роста.** - *Вопросы экономики*, № 3, 2003.
(*О программе А. Илларионова – советника Президента РФ*)

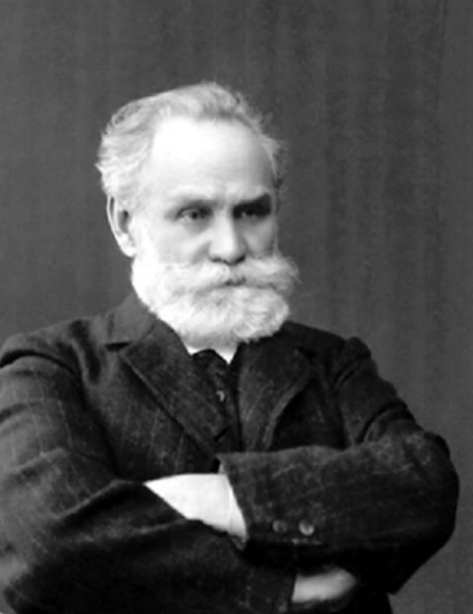
Нигматулин Р.И., Саяпова А.Р., Мазитова Л. **Межотраслевой баланс экономики Башкортостана**, ЭКО, №3, 2006, с. 90-105.

Нигматулин Р.И. **КАК ОБУСТРОИТЬ ЭКОНОМИКУ И ВЛАСТЬ РОССИИ. Анализ инженера и математика**, М.: Издательство «Экономика», 2007, 460 с.

Нигматулин Р.И., Нигматулин Б.И. **Кризис и модернизация России – 13 теорем.** М.: 2010, 50 с.

Нигматулин Р.И. **4 Э нашей жизни. Экология. Энергетика, Экономика. Этнос.** М.: Литтера, 2015, 112 с.

Нигматулин Р.И., Нигматулин Б.И. **Макроэкономические и демографические показатели России в период 1970-2020 гг. КАК МЫ ОТСТАЛИ.** М.: Литтера, 2022, 224 с.



Академик **Иван Павлов** (1849-1936),
май 1918 г., Санкт-Петербург,
Нобелевская лекция
«О русском научном уме»

Милостивые государи!
У нас должна быть
**одна потребность,
одна обязанность
одно достоинство:**

СМОТРЕТЬ на самих себя
и **окружающее** (в т.ч. и на Правительство (*добавление
РИН*))

**без самообмана
и понимать, что мы есть такое**

Академик И. Павлов —
Председателю Совета Народных Комиссаров СССР В. Молотову

Вы сеете по культурному миру не революцию, а с огромным успехом **фашизм**. До Вашей революции фашизма не было.

Мы жили и живем под неослабевающим режимом **террора** и **насилия**.

Я всего более вижу сходства нашей жизни с жизнью древних **азиатских деспотий**. А у нас это называется республиками.

Пощадите же Родину и нас.

Академик Иван ПАВЛОВ. Ленинград **21 декабря 1934 г.**

КНУТ и ПРЯНИК

И.П. Павлов в письмах В. Молотову в 1935 г.

ходатайствовал за: *Миклашевских, Лемницкой,*

Меньшикова, Елагина и др.

Все они были освобождены и их выселка была отменена

**Правительственный прием в Кремле в честь XV
Международного конгресса физиологов 17 августа 1935 г.**

Речь И.П. Павлова:

- **Благодарил Советское Правительство за заботу о науке,**
- **Отметил исключительно благоприятное положение науки в СССР,**
- **Отметил, что руководители научных институтов в тревоге по поводу того, сумеют ли они оправдать все те средства, которые Правительство предоставляет науке.**
- **Заявил: «Наше правительство дает чрезвычайно большие средства для научной работы и привлекает массу молодежи к науке»**

Нигматулин Р.И. **Об оптимальной доле государственных расходов в ВВП и темпах экономического роста,**

Вопросы экономики, № 3, 2003.

(О программе А. Илларионова – тогдашнего советника Президента РФ)

$$\overline{\Delta G} = f(\overline{\Delta ГБ}, \overline{\Delta ДМ}, \overline{\%ЦБ}, C_{\text{Нефть}}, C_{\text{Эл}}, \overline{\text{Инв}}, \overline{\text{ОпТр}}, \dots \dots)$$

$$\overline{\Delta G} = f(\overline{\Delta ГБ})$$

$$\overline{\Delta G} = f(\overline{\Delta ДМ})$$

$$\overline{\Delta G} = f(\overline{\%ЦБ})$$

$$\overline{\Delta G} = f(C_{\text{Нефть}})$$

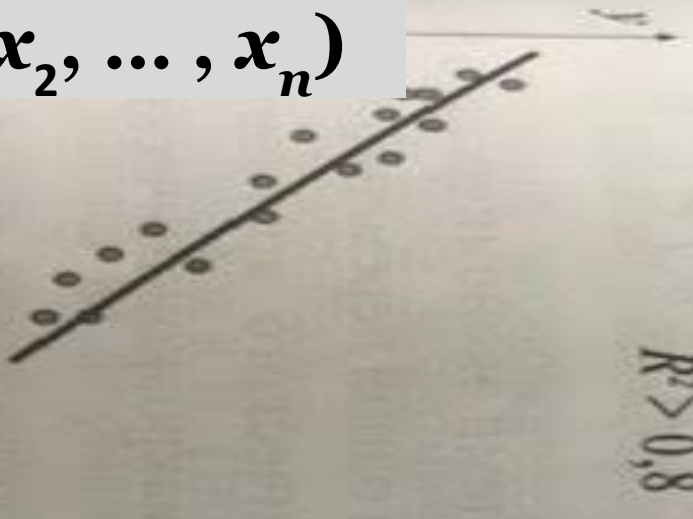
$$\overline{\Delta G} = f(C_{\text{Эл}})$$

$$\overline{\Delta G} = f(\overline{\text{Инв}})$$

$$\overline{\Delta G} = f(\overline{\text{ОпТр}})$$

$$\overline{\Delta G} = f(\dots \dots)$$

$R^2 > 0,8$



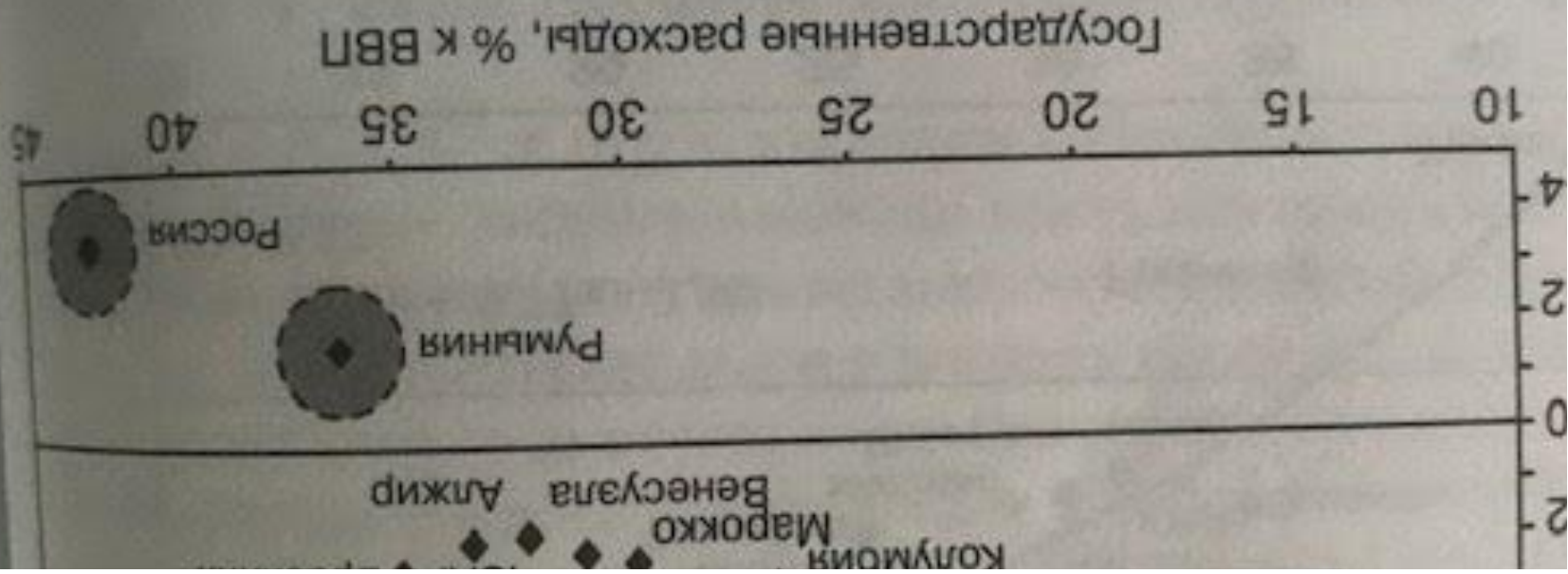
6

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

рис. 0.5.1. Два варианта одномерных статистик для параметра y может зависеть от многих аргументов x_j ; $j = 1, 2, \dots, i, \dots$

который вычисляется как елиница минус среднее

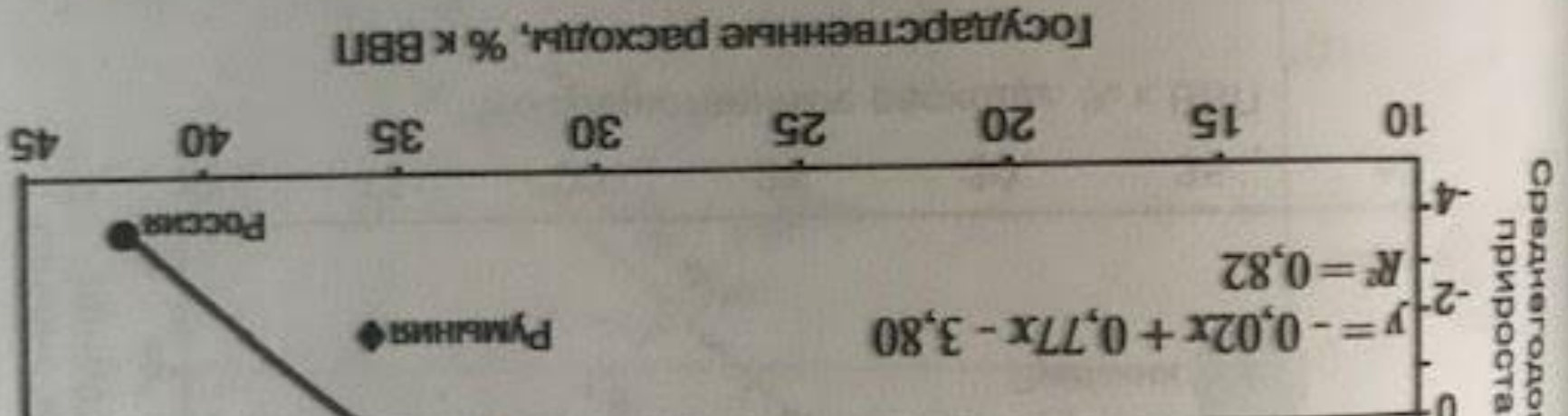
6.5.3. То же, что на рис. 6.5.2, но аппроксимация в виде прямой



Среднегодовые темпы экономического роста (1991 – 2000) и государственные расходы в 17 странах среднего развития с большим населением

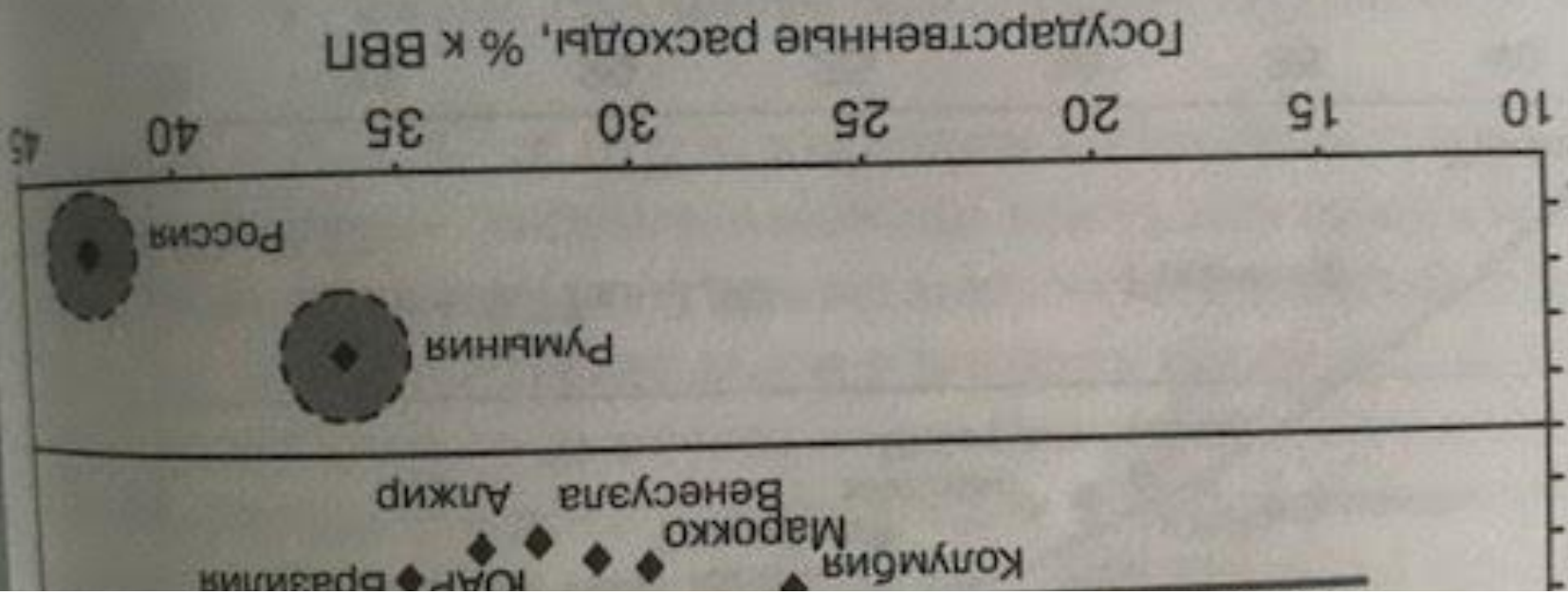
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ, НАУКА И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

Рис. 6.5.2. Среднегодовые (1991–2000 гг.) темпы экономического роста и государственные расходы в 17 странах среднего уровня развития с большим населением. Апроксимация в виде параболы –



Среднегодовые темпы экономического роста (1991 – 2000) и государственные расходы в 17 странах среднего развития с большим населением

6.5.3. То же, что на рис. 6.5.2, но аппроксимация в виде прямой



Среднегодовые темпы экономического роста (1991 – 2000) и государственные расходы в 17 странах среднего развития с большим населением



С. Форбс, Нездоровый пациент,
некомпетентный врач,
ФОРБС, 2015 г.

«Поразительная неспособность ЭКОНОМИСТОВ и ПОЛИТИЧЕСКИХ ЛИДЕРОВ оценить, чем сегодня болеет большинство экономик, и назначить правильное лечение, **УДРУЧАЕТ** и свидетельствует об их:

- **твердолюбом отказе изучить**
- **факты, отверженности фальшивым**
- **идеям, ответственности лени»**

В выступлениях ученых-экономистов преобладает «философия»

Доля ВВП на развитие человека, обеспечиваемая госбюджетом

- здравоохранение
- образование
- наука
- культура

	Западные социальные государства	РОССИЯ
Доля ВВП, %	20%	9%

- После 1990 г. число научных работников сократилось в **3** раза и продолжает сокращаться
- По их числу, приходящемуся на душу населения, мы на **29** месте,
- Только **10%** заканчивающих аспирантуру защищают диссертации,

У нас **самая высокая смертность**
в Европе (и относительно СССР в 1990 г.)

Самый большой ее прирост
за два «пандемийных» года

РОЖДАЕМОСТЬ, СМЕРТНОСТЬ И ЕСТЕСТВЕННАЯ УБЫЛЬ НАСЕЛЕНИЯ В РФ

■ ◆ □ ◇ Данные Росстата
⋯ Средний вариант прогноза Росстата в 2018 г.
⋯

За три года (2020-2022) естественная **убыль** населения достигнет **2,3**



$\Delta N = +1941 - 1908 = +33$ тыс. чел. (2015)
 $\Delta N = +1604 - 1830 = -226$ тыс. чел. (2016)
 $\Delta N = +1485 - 1800 = -315$ тыс. чел. (2017)
 $\Delta N = +1436 - 2138 = -702$ тыс. чел. (2018)
 $\Delta N \approx +1400 - 2440 \approx -1040$ тыс. чел. (2019)
 $\Delta N \approx +1284 - 1972 \approx -688$ тыс. чел. (2020)

У нас самая высокая **смертность** в Европе (и относительно СССР в 1990 г.)

В 2019 г (до пандемии) умерло 1,8 млн = 12,3 на 1000 человек

- На **200 тыс больше**, чем по норме Советской России и новых стран Европы
- на **400 тыс больше**, чем по норме Западной Европе

Самый большой ее прирост за два «пандемийных» года

Прирост за два года (2020 и 2021 гг) = 1 млн
= 7 на 1000 человек (в 2,5 – 3 раза больше, чем в ЕС и в США)

За два года естественная убыль населения (смертность минус рождаемость)

1,75 млн человек

Смертность в трудоспособном возрасте (16-64 лет) в РФ выше (относительно ЕС):

- у мужчин - **в 3 раза**, у женщин - **в 2 раза**.

В рейтинге авторитетного международного журнала “Ланцет”
по уровню здоровья населения, определяемого по 33 показателям,

Россия на **119-м** месте среди **187** стран.

НЕЭФФЕКТИВНОСТЬ

- социально-экономического блока Правительства,
- руководителей предприятий.

Нет специалистов, нет инженеров.

Специалистов надо собирать по крупицам,

Подготовка инженеров и квалифицированных рабочих.

Поднять зарплаты преподавателям университетов и училищ.

Минобрнаука абсолютно **не способна** реализовать программу восстановления и подъема высшего образования.

Минвуз, ВАК и Госкомнауку возглавляли
чл.-коры АН СССР В.П. Елютин, Г.А. Ягодин,
академики И.Ф. Образцов, Е.И. Шемякин, В.А. Кириллин, Г.И. Марчук, Н.П.
Лаверов

Объем ИНВЕСТИЦИЙ (в долях ВВП) в основной капитал

в России в **1,5 раз меньше**, чем в Европе и США

в 2 раза меньше, чем в Китае

$$E_f = \frac{\Delta G}{\Delta I}$$

ΔG – прирост ВВП

ΔI – прирост инвестиций в основной капитал

в России в **1,5 раз меньше**, чем в Европе, США и Китае и чем было в СССР

**НЕЭФФЕКТИВНО
СТЬ**

Против нас объявлена **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ** война со стороны Европы, Северной Америки, Японии

- 1 млрд человек
- Создатели новых технологий
- С ними связаны почти все наши

производства

2-я МИРОВАЯ ВОЙНА

- У СССР вместе с союзниками было 500 млн человек
- Против нас с Германией было 300 млн человек

**ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ
СТРАНЫ**

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ преодоления ЭКОНОМИЧЕСКОГО кризиса

I. ИНВЕСТИЦИИ (создавать новые производства)

$$I = k_{И} \times ВВП \quad (k_{И} = 0,17 \rightarrow 0,25)$$

II. СПРОС (платежеспособность) и БАЛАНСЫ

$$\times ВВП \quad C = (k_{\text{Насел-95\%}} + k_{\text{Государство}} + k_{\text{Экспорт}})$$

- распределения доходов
- издержек,
- цены, (в т.ч. на сырье и энергию) покрывают издержки
- оплата труда покрывает цены

III. НАЛОГИ (перенос на большие доходы и богатую собственность)

IV. ЭФФЕКТИВНОСТЬ

- народа (образование, наука)
- руководителей (кадровая политика)

$$K_{\text{эф}} = 2,5 \rightarrow 4$$

Главная проблема - не купишь необходимые импортные **комплектующие**.

На их сборке работают **большая часть производств**
Без них **невозможно** изготовить **потребительский товар**

Угроза безработицы.

Болты импортируем. Станков нет и давно их не производим.

БАЛАНС издержек и цен

Снизить цены на бензин, мазут, газ, электроэнергию, удобрения на **внутреннем** рынке (25% добываемой нефти)

за счет вывода из цен

- паразитических издержек,
- потерь от неэффективного менеджмента и
- **ИЗБЫТОЧНЫХ НАЛОГОВ.**

В цене бензина налоги и акцизы в России > 60%,

в США = 15%.

Бензин и электроэнергия в РФ в 2,3 раза дороже, чем в США по ППС

Потерю налогов на **внутреннем** потреблении (25% добываемой нефти)

компенсировать из доходов от **экспорта** (75% добываемой нефти)

Уменьшение цены бензина на **10** ₹/л = 1500 ₹/баррель

можно компенсировать

увеличением сбора с экспорта нефти и нефтепродуктов на **7** \$/баррель = 500 ₹/баррель ≈ 3,2 ₹/л

МИР: Мин. Мес. ЗАРПЛАТА \approx 1000 л
бензина \approx

\approx 6000 кВт×час э/энергии

1 кг хлеба \approx 3 л бензина

РФ: Мин. Мес. ЗАРПЛАТА \approx 250 л
бензина \approx

\approx 1800 кВт× час э/энергии

1 кг хлеба \approx 1 л бензина

Нужны КАРДИНАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕНЫ !

**ОСОБЕННО
В ЭКОНОМИЧЕСКОМ ПОРЯДКЕ
РОССИИ!**

Иначе «напрасны» наши «совершенства»

Александр Пушкин

Иначе нас просто исключат из истории.

Александр Зиновьев

СПАСИБ

О!

$p = 1 \text{ bar}$



Water

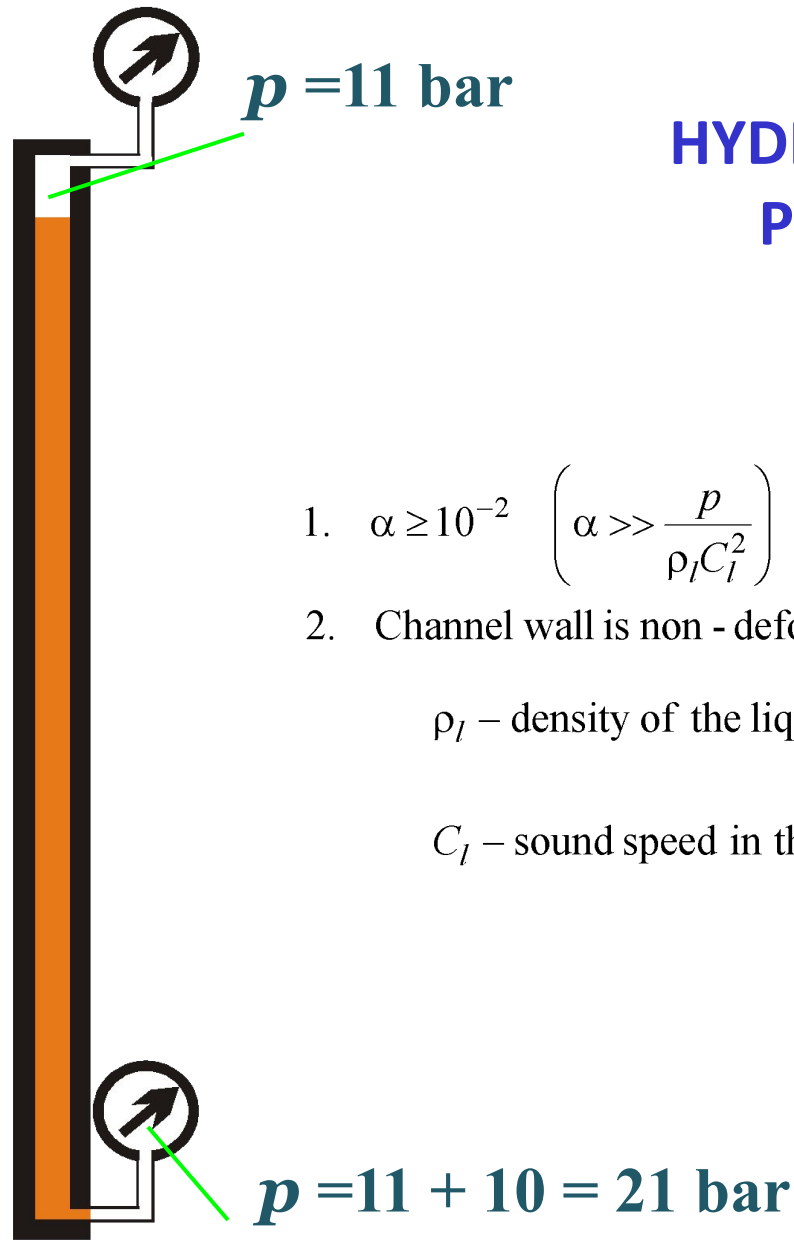
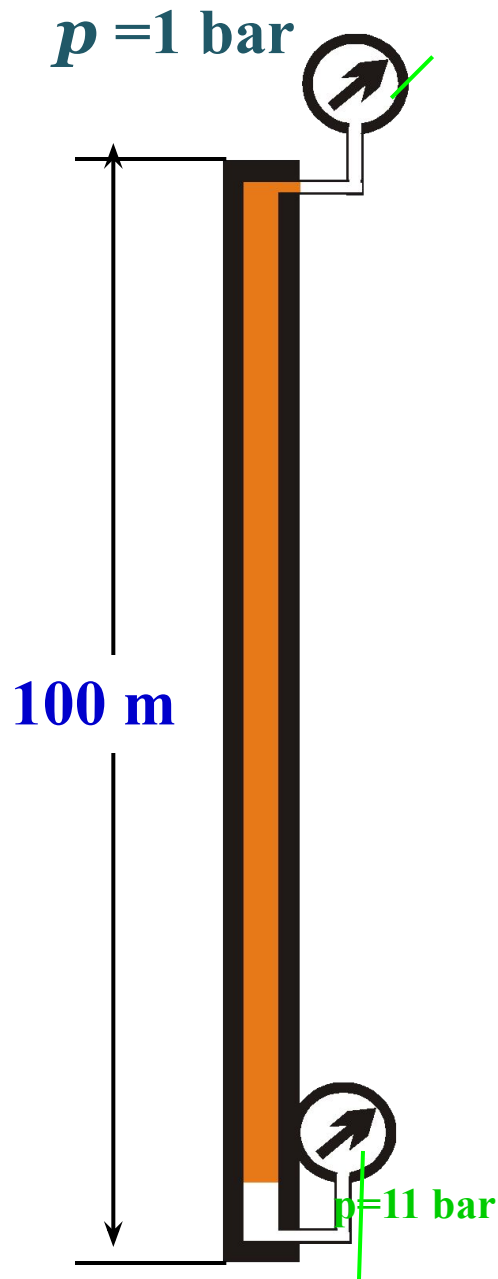
Bubble

100 m

$p = 11 \text{ bar}$

$p = ?$

Труба – замкнутая и недеформируемая



HYDROSTATIC PUZZLE

1. $\alpha \geq 10^{-2} \left(\alpha \gg \frac{p}{\rho_l C_l^2} \right)$

2. Channel wall is non - deformable

ρ_l - density of the liquid $\left(10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$

C_l - sound speed in the liquid $\left(1500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$