

Институт Теоретической и Математической Физики

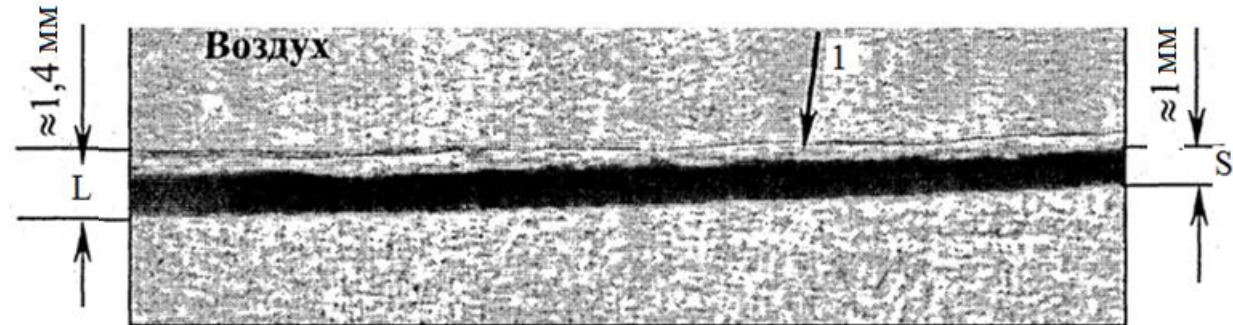
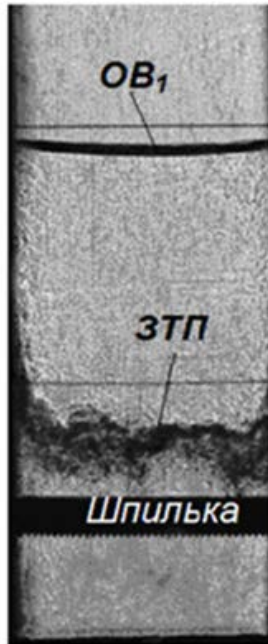


Russian Federal Nuclear Center -

**Расчётно-теоретическое исследование
взаимодействия ударной волны с зоной
турбулентного перемешивания на плоской
границе воздух-аргон в опыте на ударной трубе**

О.Г.Синькова, В.П.Стаценко, Ю.В. Янилкин

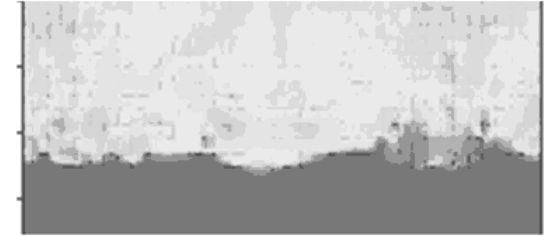
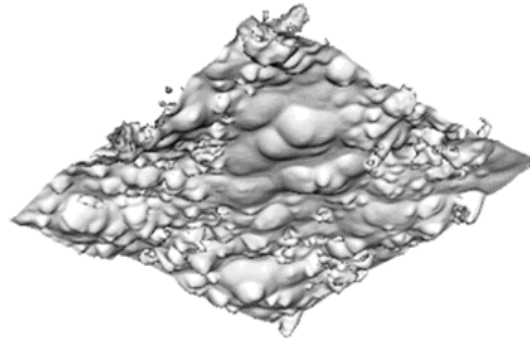
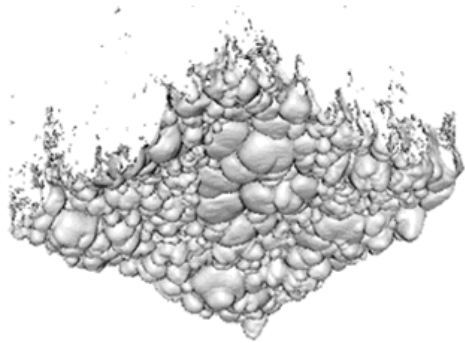
Фрагмент экспериментального видеокadra* после прохождения УВ через ЗТП (снизу вверх) в опыте с КГ воздух-Ар



L – полная ширина УВ, S – ширина однородной части УВ,
 1 – расслоившаяся часть УВ

*Н. В. Невмержицкий, А. Н. Разин, Е. А. Сотсков и др.
Экспериментальное исследование взаимодействия ударных волн с контактной границей и зоной турбулентного перемешивания различных газов // ПМТФ, 2017, т.58, N2, стр.16-25.

Изоповерхности в опыте с КГ воздух - SF6 с числом $Ma = 7,8$

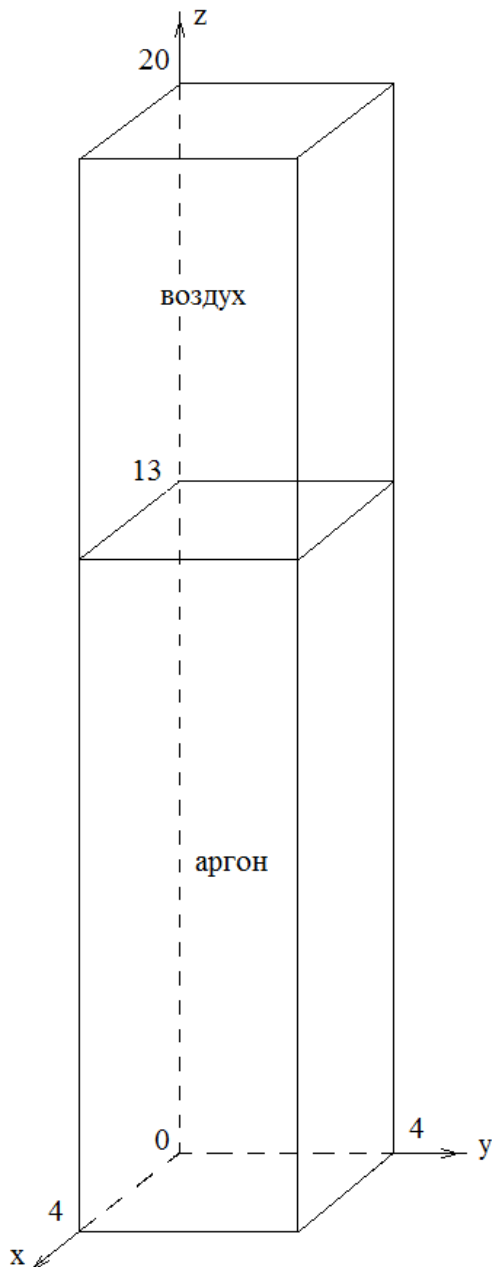


Слева - картина объемной доли SF6 по уровню 0,99, справа - давления по уровню 20 ГПа

Картина давления в двумерном сечении в середине области *

*О. Г. Синькова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин. Численное исследование развития турбулентного перемешивания на контактной границе воздух-SF6 при распространении ударной волны с большими числами Маха //ВАНТ, сер. ТПФ, вып. 2-3, стр. 3-17, 2007. 3

Постановка задачи и 3D расчётов



Оба газа находятся при нормальных условиях:

$$P_0 = 1.013 \cdot 10^{-4} \text{ ГПа} \cdot T_0 = 288^\circ \text{ К}$$

Боковые грани и нижняя грань параллелепипеда – жёсткие стенки. На верхней грани задан втекающий поток с параметрами за фронтом УВ с числом Маха $M \approx 2,37-2,57$

$$(P = P_2, \rho = \rho_2, u_x = u_{x2}):$$

$$P_2 = \frac{2 \cdot \rho_0 \cdot D_2^2 - (\gamma - 1) \cdot P_0}{\gamma + 1}, \quad \rho_2 = \rho_0 \cdot \frac{(\gamma + 1) \cdot P_2 + (\gamma - 1) \cdot P_0}{(\gamma - 1) \cdot P_2 + (\gamma + 1) \cdot P_0}$$

$$u_{x2} = -\sqrt{(P_2 - P_0) \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_2} \right)}$$

где D_2 - скорость фронта УВ в воздухе

Постановка 3D расчётов

Основные параметры течения, где индекс 2 означает параметры УВ в воздухе, а индекс 3 – параметры УВ в Ar.

D_2 , км/с	D_3 , км/с	P_2 , ГПа	P_3 , ГПа	ρ_2 , г/см ³	ρ_3 , г/см ³	u_2 , км/с	u_3 , км/с
0.85	0.816	$7.2 \cdot 10^{-4}$	$8.21 \cdot 10^{-4}$	$4.08 \cdot 10^{-3}$	$4.67 \cdot 10^{-3}$	-0.5945	-0.519

С обеих сторон от КГ в слое толщиной 1 ячейку с помощью генератора случайных чисел задаются случайные возмущения плотности: $\delta\rho = \zeta \cdot \rho$

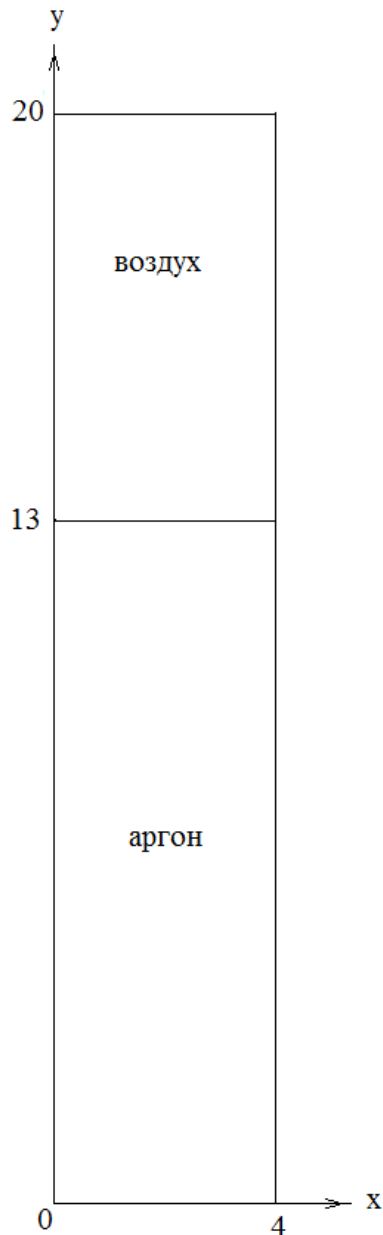
Счетная сетка $h=0.02$ и $h=0.01$ см

Параметры 3D ПЧМ расчётов

№ варианта	$N_x \times N_y \times N_z$	ζ
1	200x200x1350	0.1
2	400x400x2700	0.1
3	400x400x2700	0.5
4	200x200x1350	0.5

Постановка 2D расчётов с k-ε моделью

Эмпирические коэффициенты, входящие в k-ε модель:
 $c_k=4/3$; $c_\alpha=1.7$; $c_D=0.12$; $c_\epsilon=4/3$; $c_{\epsilon_1}=1.15$; $c_{\epsilon_2}=1$; $c_{\epsilon_3}=1.7$.



Счетная сетка $h=0,02$ см и $h=0,004$ см

Параметры 2D расчётов

N_0	$k_0, \text{км}^2 / \text{с}^2$	$\epsilon_0, \text{км}^2 / \text{с}^3$	N_z	N
1	$2.77 \cdot 10^{-3}$	0.244	1350	1
2	$2.77 \cdot 10^{-3}$	0.244	6750	5
3	$2 \cdot 10^{-3}$	0.244	1350	1

Постановка 2D расчётов с k-е моделью

Характерный горизонтальный размер кругового возмущения с радиусом λ при разрыве УВ с перепадом давления ΔP можно оценить из соотношения

$$2\pi\lambda \cdot \sigma \cdot s \sim \Delta P \cdot \pi \cdot \lambda^2 \quad \text{откуда} \quad \lambda \sim 2\sigma \cdot \frac{s}{\Delta P}$$

$$\sigma \approx 1 \div 3 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2 \quad s \approx 1 \text{ мкм} \quad \Delta P \approx 7 \cdot 10^5 \text{ Па} \quad \lambda \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Далее предположим, что скорость возмущений $\delta v_1 \approx \alpha \cdot D_2$

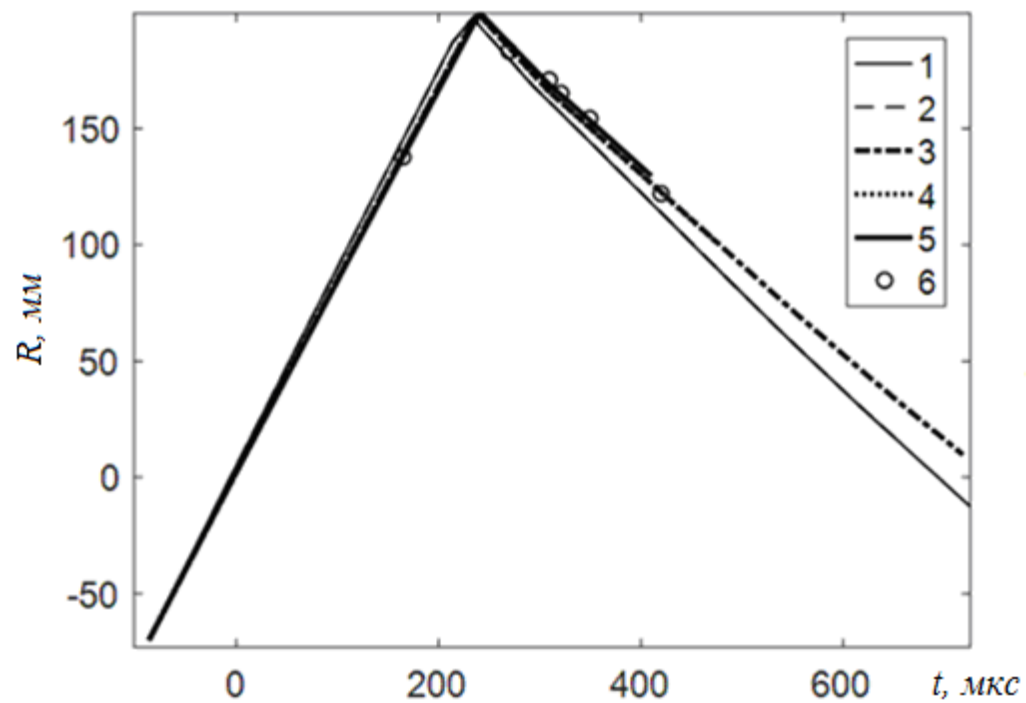
$$\text{Тогда} \quad k \approx \frac{\delta v_1^2}{2} = \alpha^2 \cdot \frac{D_2^2}{2} \quad \text{где} \quad \alpha \sim 0.05 \div 0.1 \quad k = 2.77 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Из соображений размерности} \quad D \sim \lambda \sqrt{k}$$

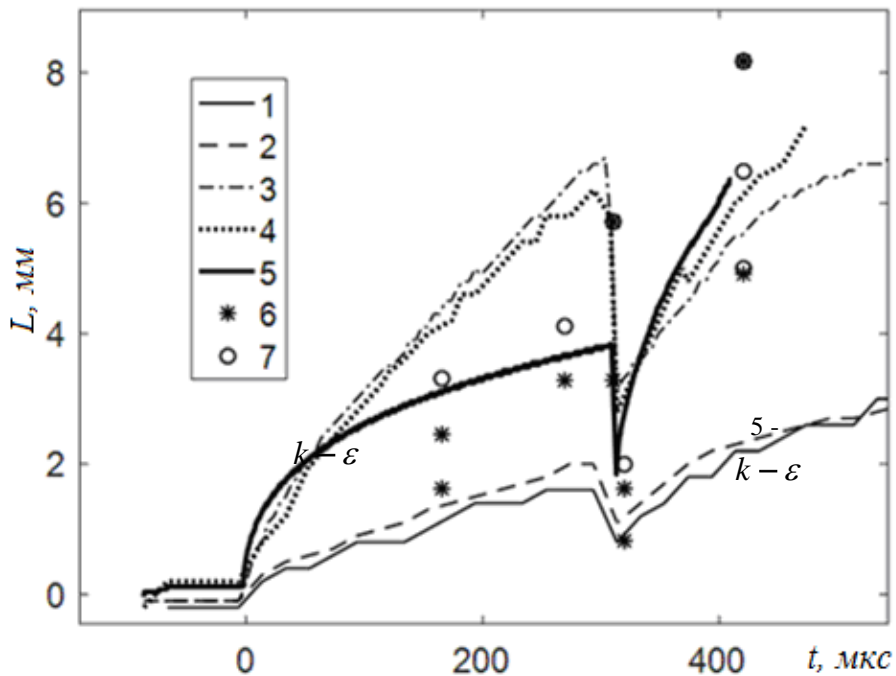
$$\text{С другой стороны} \quad D \approx c_D \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\text{Отсюда имеем} \quad \varepsilon \approx \frac{k^{3/2}}{c_D \lambda} = 0.244$$

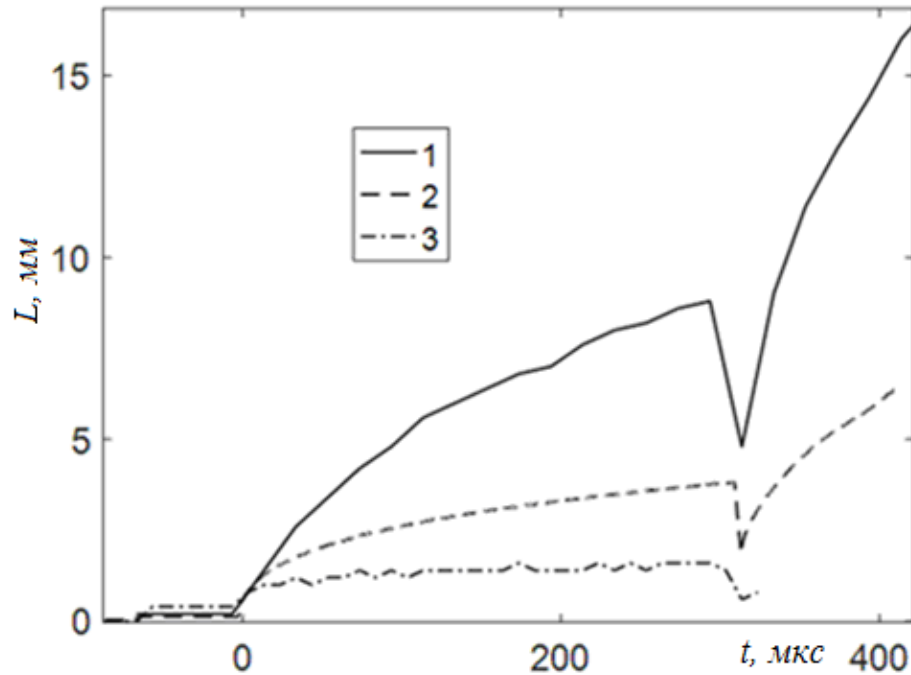
R-t диаграммы ударной волны



Зависимости от времени ширины ЗТП

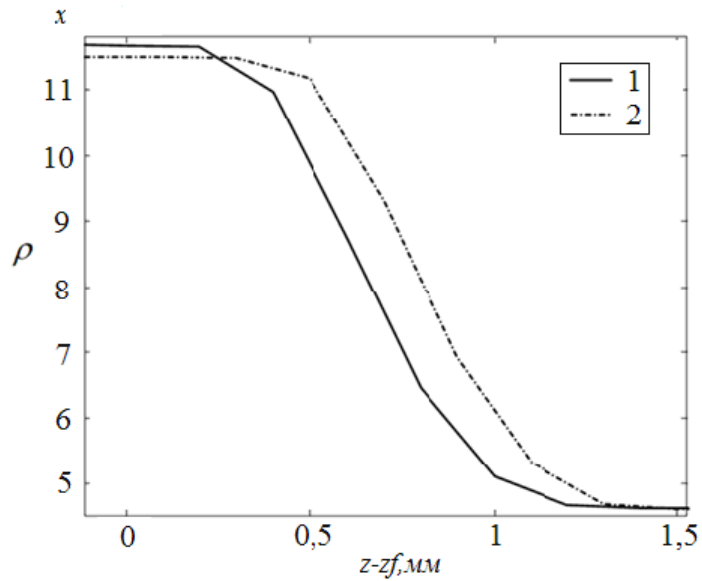


1–4 – 3D расчёты, соответственно;
5 – $k-\varepsilon$ расчёт на подробной сетке;
6, 7 – эксперименты

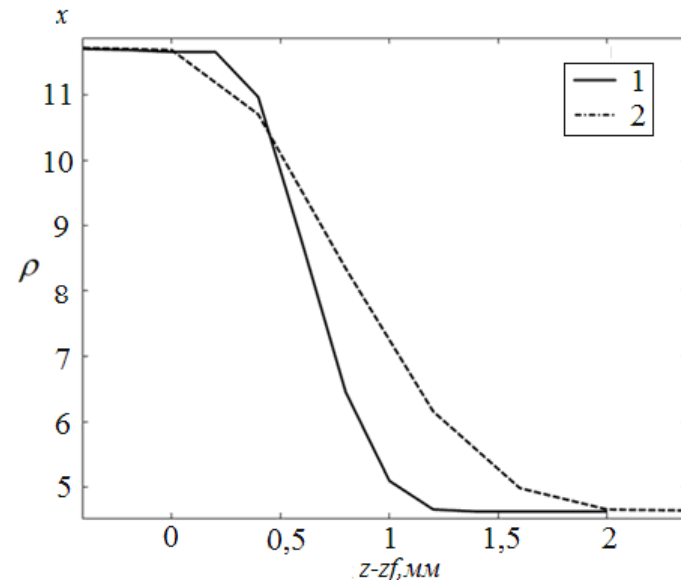


1–3 – $k-\varepsilon$ расчёты
(варианты 1-3, соответственно);

Профили осредненной плотности в 3D расчётах



a



б

a - на подробной сетке на $t = 320 \mu\text{s}$ (1) и $t = 350 \mu\text{s}$ (2);
б - на $t = 320 \mu\text{s}$ на подробной (1) и грубой (2) сетках.

По оси x отложена координата относительно фронта УВ

Учет пограничного слоя

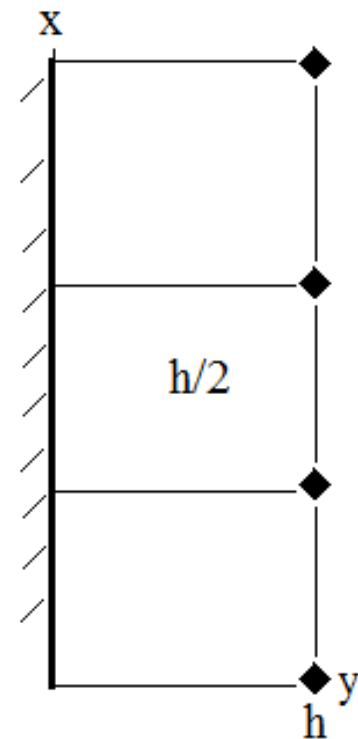
$$|u_\tau| = \frac{u_*}{\kappa_K} \cdot \ln\left(\frac{y+r_0}{r_0}\right) \quad \kappa_K = c_D^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{c_{\varepsilon 3} - c_{\varepsilon 1}}{c_\varepsilon}} \quad u_* = \sqrt{\left|D_t \cdot \frac{\partial u_\tau}{\partial y}\right|}$$

$$D_t = c_D \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \varepsilon = k \cdot \sqrt{c_D} \cdot \left|\frac{\partial u_\tau}{\partial y}\right|$$

$$\left|\frac{\partial u_\tau}{\partial y}\right| = \frac{u_*}{\kappa_K \cdot (y+r_0)} \quad \left|\frac{\partial u_\tau}{\partial y}\right| = \frac{1}{(y+r_0)} \cdot \sqrt{\frac{c_\varepsilon \cdot k}{c_{\varepsilon 3} - c_{\varepsilon 1}}}$$

$$\left.\frac{\partial u_x}{\partial y}\right|_{y_0+h/2} = \frac{1}{(y_0 + h/2 + r_0)} \cdot \sqrt{\frac{c_\varepsilon \cdot k}{c_{\varepsilon 3} - c_{\varepsilon 1}}}$$

$$u_x(y_0) = u_x(y_0 + h) - h \cdot d_u$$

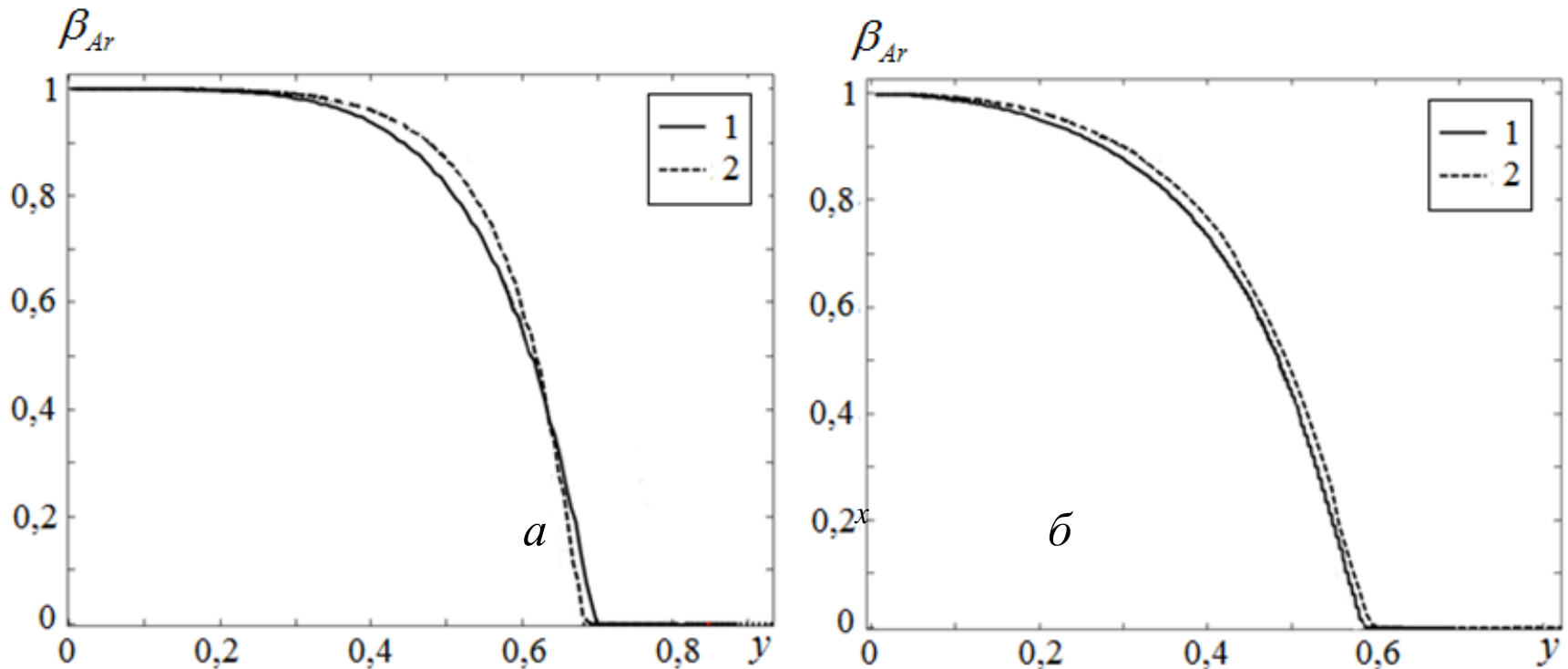


Моделирование с учетом пограничного слоя

Постановка расчётов

№варианта	h	r_0
1	0.004	$4 \cdot 10^{-5}$
2	0.004	10^{-5}

Профили концентрации аргона на $t = 40.75$ мкс

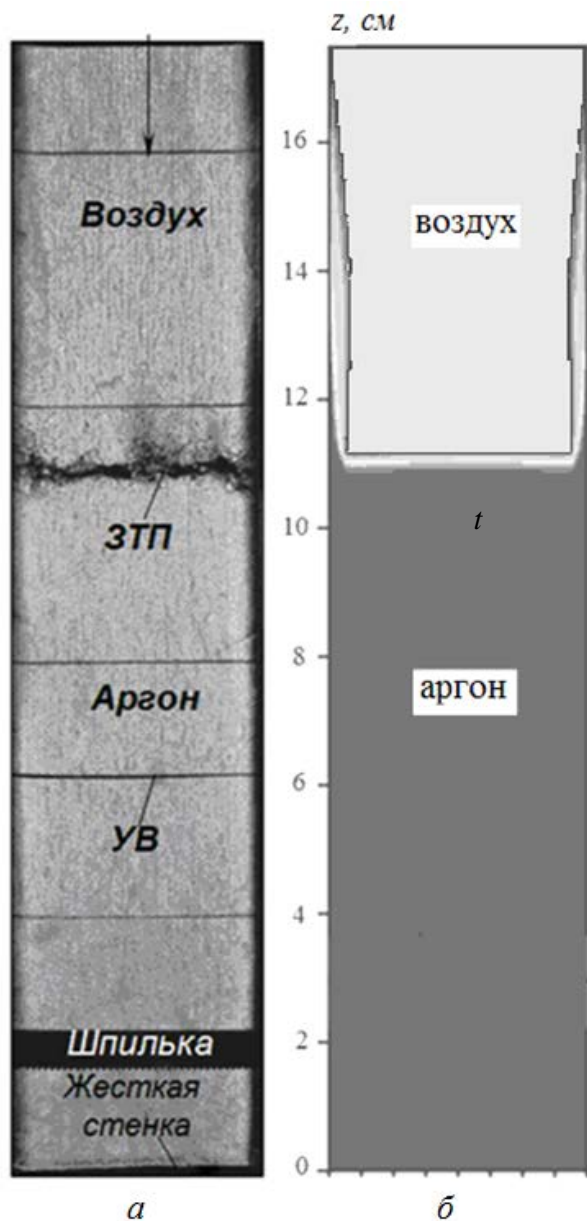


a - расстояние от жёсткой стенки $x = 3.5$;

$б$ - расстояние от жёсткой стенки $x=4$;

Время t отсчитывается от момента прихода УВ на КГ, номера кривых соответствуют вариантам расчетов

Распределение концентрации веществ на $t=165$ мкс

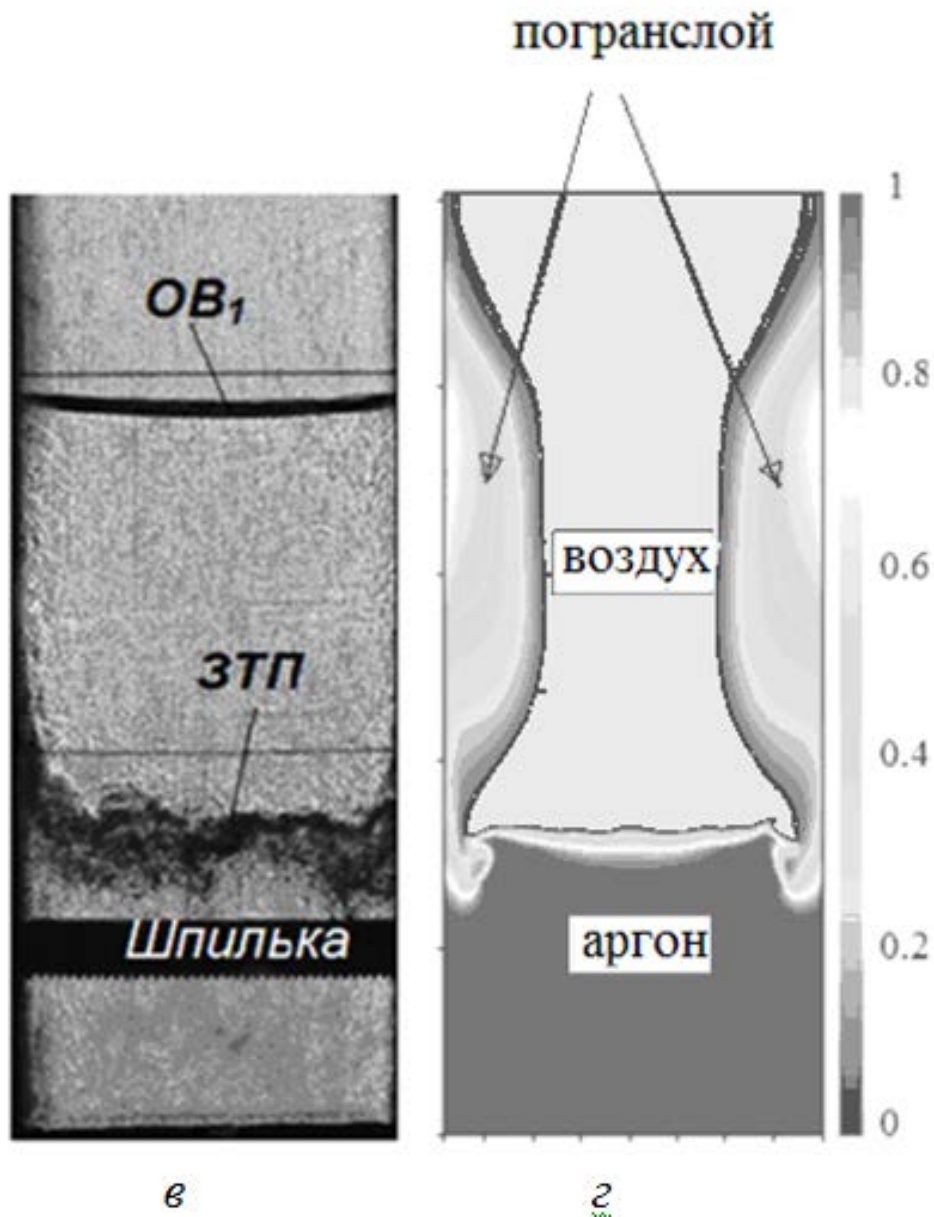


а - видеокادر течения в опыте N1314 на $t = 165$ мкс

б - распределение концентрации аргона в расчете 2;

УВ – падающая ударная волна;

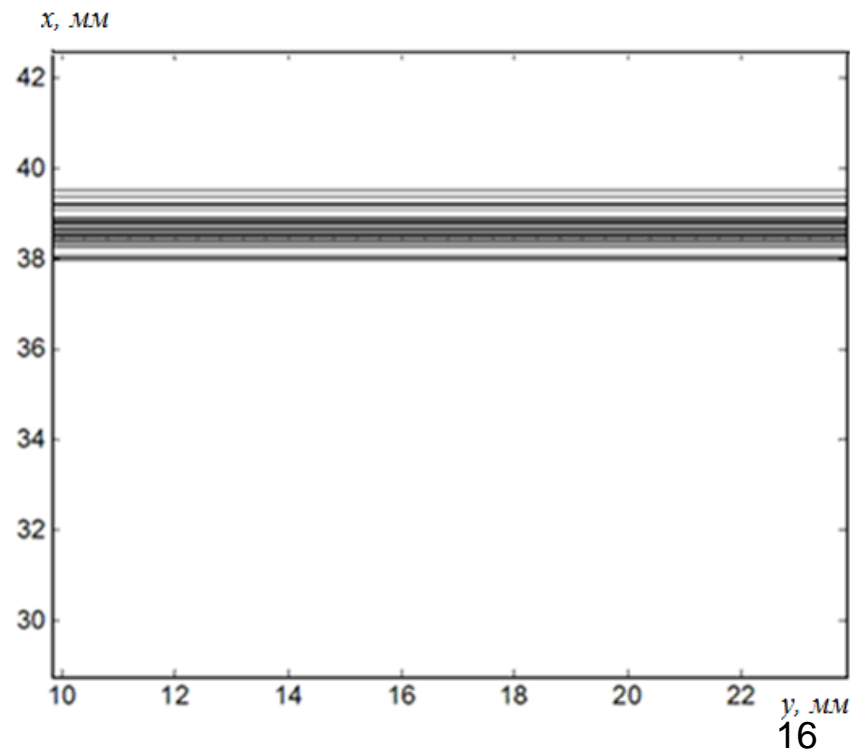
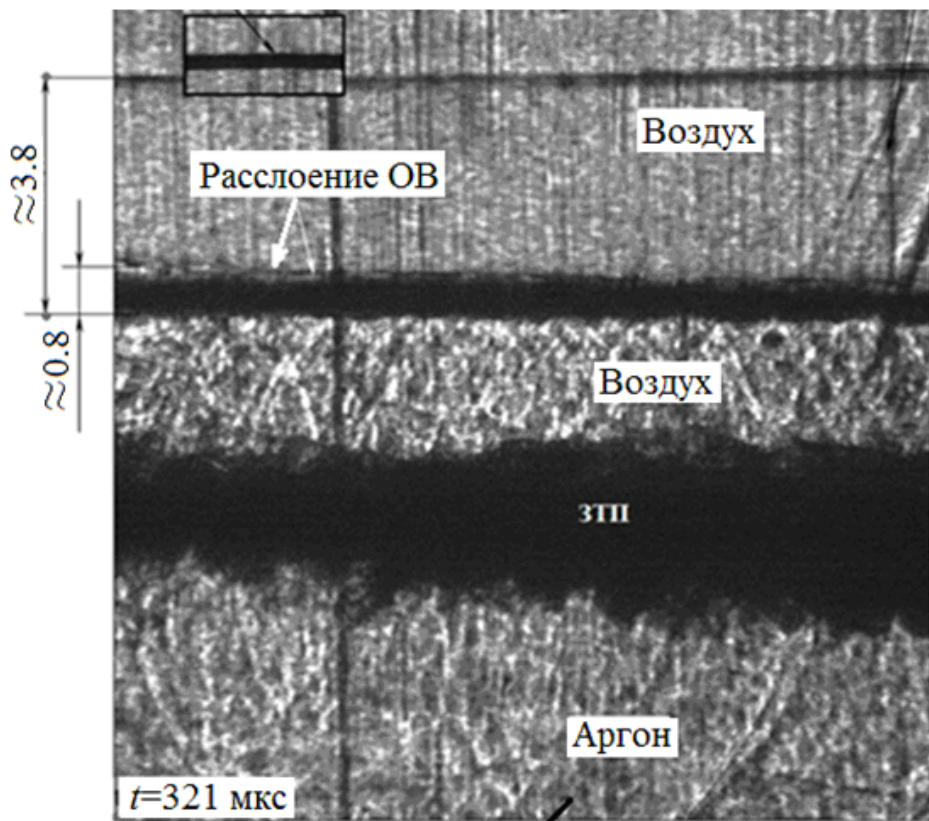
Распределение концентрации веществ на $t=419$ мкс



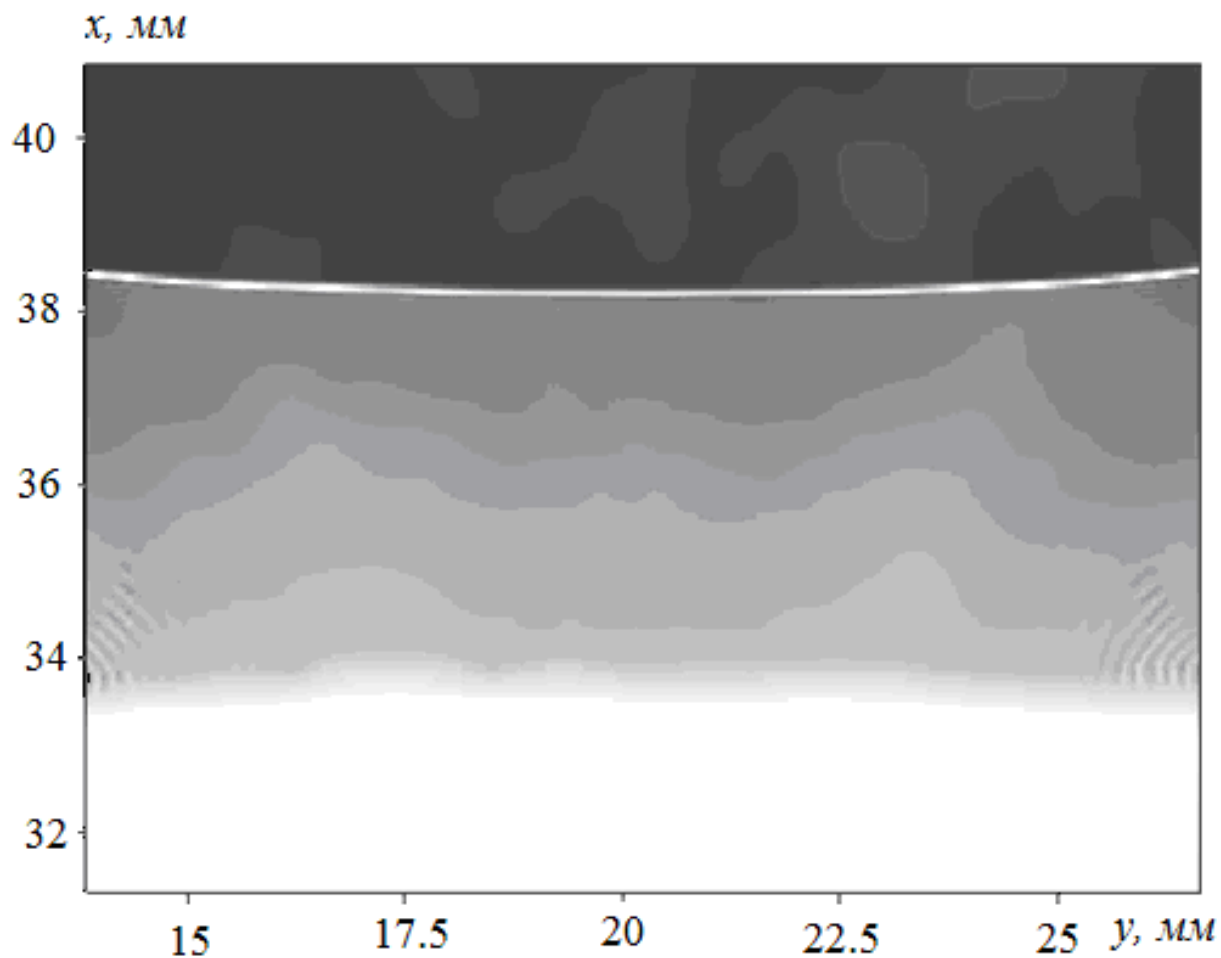
ОВ₁ – отраженная УВ, прошедшая через ЗТП

Видеокадр течения в опыте (слева) и в расчетная картина (справа) на $t=321$ мкс

Расчетная картина получена вычислением градиента от интеграла показателя преломления по ширине канала



Распределение плотности вблизи фронта УВ в расчете на время $t=321$ мкс



Заключение

Таким образом, в работе на основе численных расчётов представлена интерпретация экспериментально наблюдаемого эффекта уширения и «расслоения» УВ после прохождения ЗТП. Указанные эффекты, отмечаемые в опыте, представляются оптическим эффектом, связанным с искривлением плоскости УВ вследствие взаимодействия с пограничным слоем. При этом авторы ограничились качественным объяснением эффекта, не претендуя на количественно корректное описание всех опытных результатов.

Спасибо за внимание!