

Численное моделирование прохождения ударной волны через турбулизированную среду

Янилкин Ю.В., Стаценко В.П., Чередниченко И.Е.,
Третьяченко Ю.В., Синькова О.Г.

Введение

L. Hesselink and B. Sturtevant. Propagation of weak shocks through a random medium // J. Fluid Mech. 196, 513 (1988).

Авторы обнаружили названные ими профили “с пиками” и “закругленные” и объяснили эти характерные черты двух типов взаимодействия УВ с турбулизированной средой случайной структурой перемешанных газов. Отметим, что такая же картина проявилась в расчетах в работе:

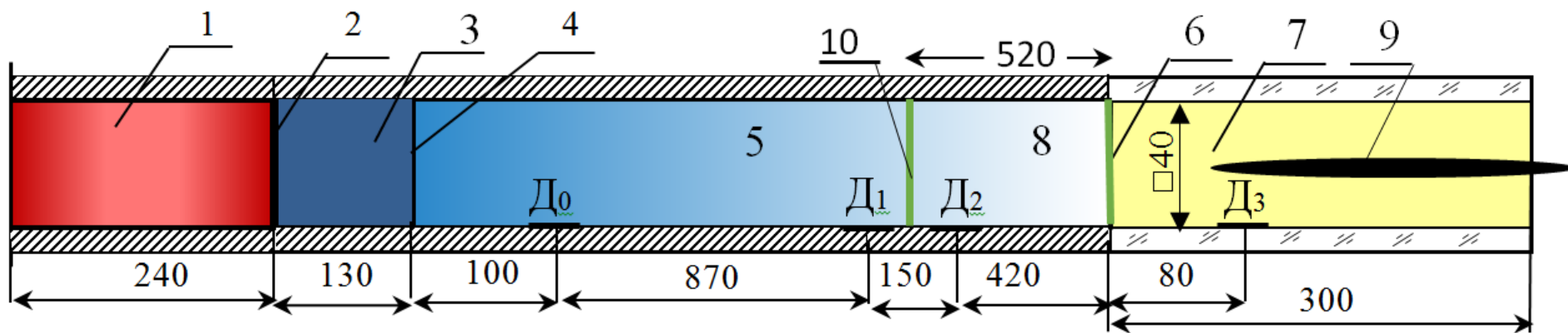
Larsson J., Lele S. K. Direct numerical simulation of canonical shock/turbulence interaction // Phys. Fluids. 2009. Vol. 21.

Получено, что достаточно сильная турбулентность может значительно менять структуру УВ и характер взаимодействия УВ и ЗТП.

Указанные выше два режима взаимодействия в работе названы как «wrinkled shock regime» (режим «расслоенной» УВ) и «broken shock regime» («размытой» УВ).

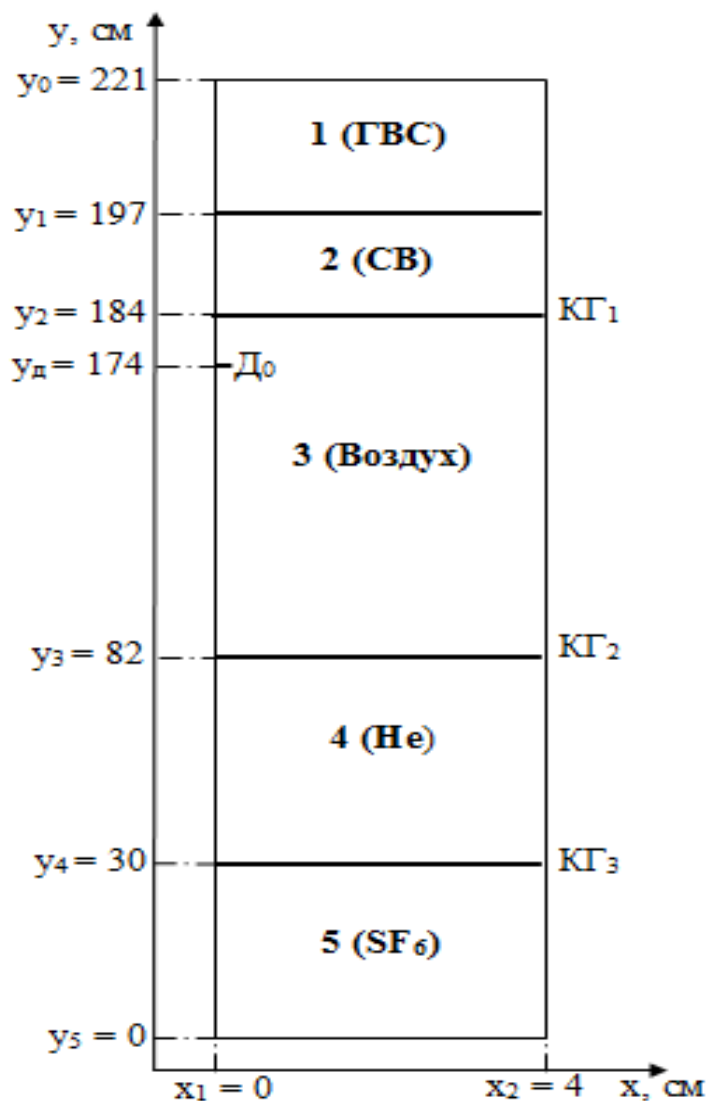
Вопрос – так ли случайны эти два режима взаимодействия?

Задача 1. Эксперимент Невмержицкого и др.

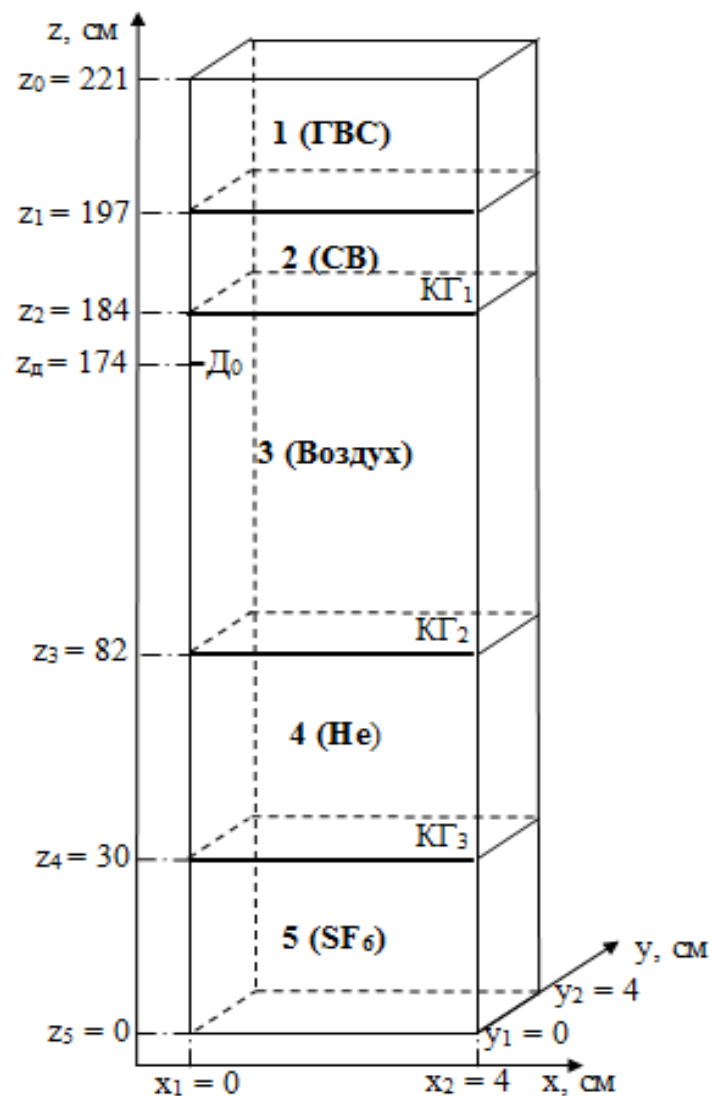


1 – камера с ГВС; 2 – мембрана; 3 – камера со сжатым воздухом; 4 – мембрана; 5 – камера с воздухом; 6, 10 – тонкие пленки, разделяющие газы; 7 – измерительная секция с SF_6 ; 8 – камера с гелием; 9 – датчик; D_0 – датчик пусковой; D_1 , D_2 , D_3 – датчики для фиксации времени

Постановка расчетов

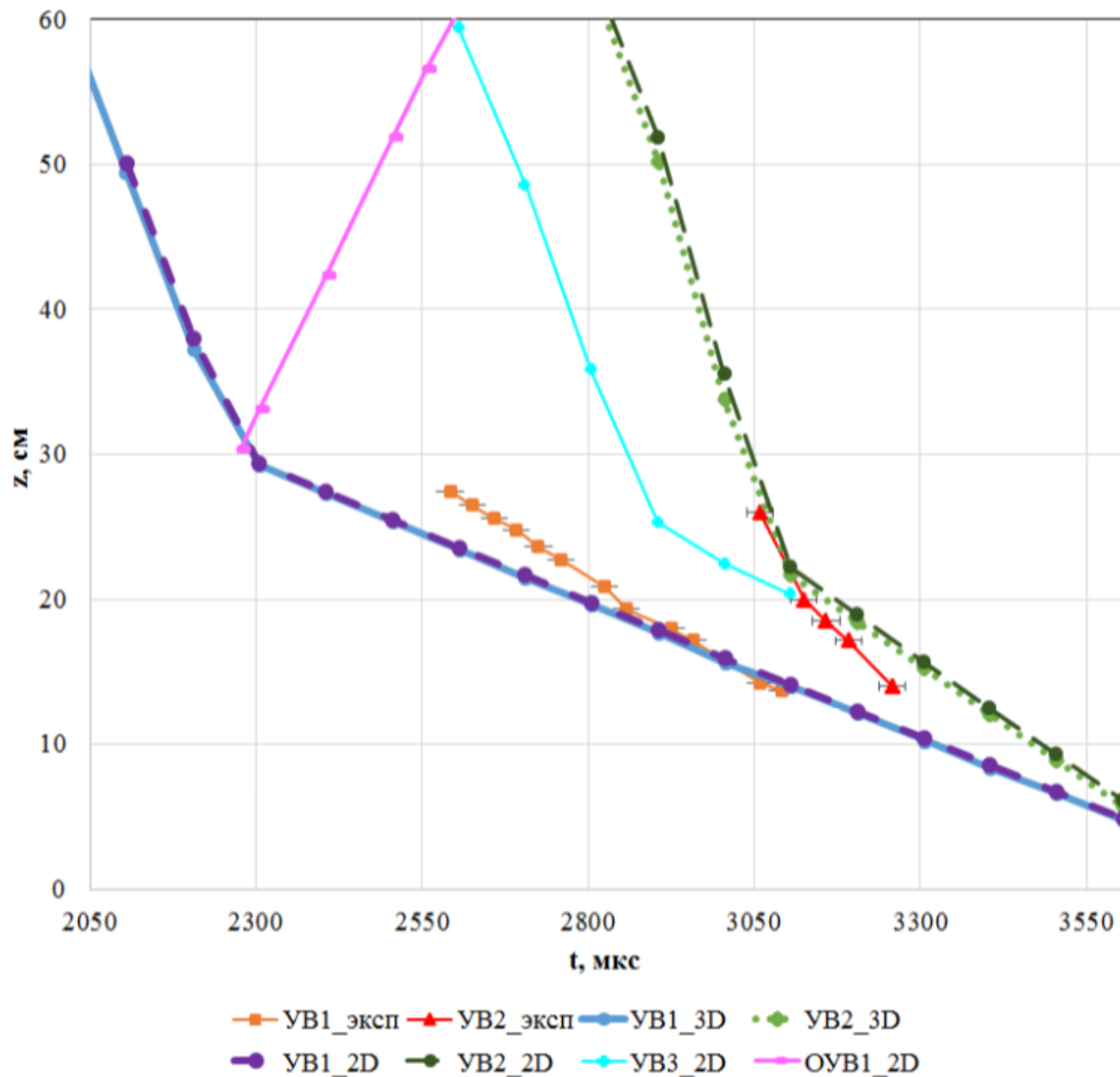


2D

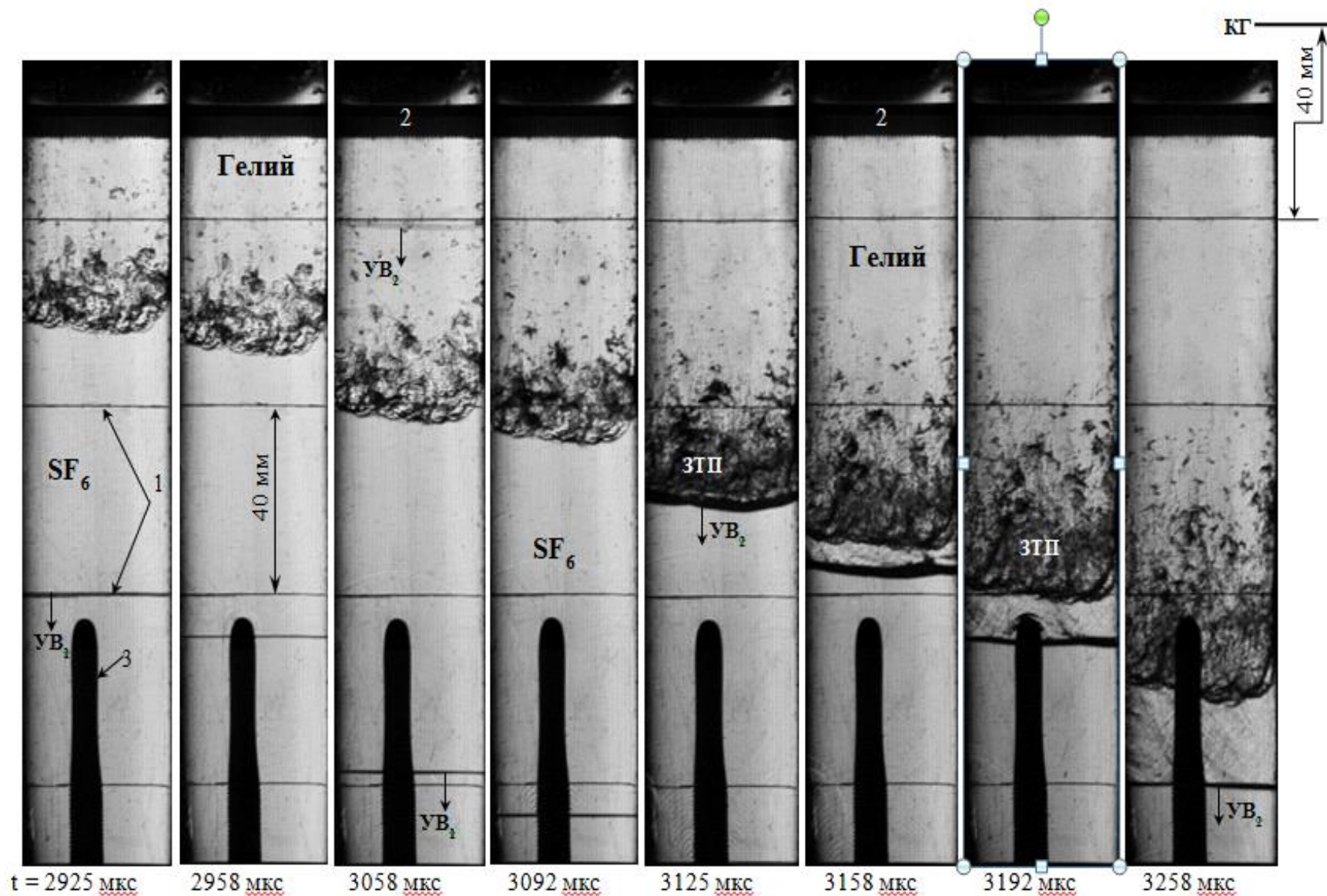


3D

Движение ударных волн



Картина течения в эксперименте на границе He – SF₆ (легкое – тяжелое)



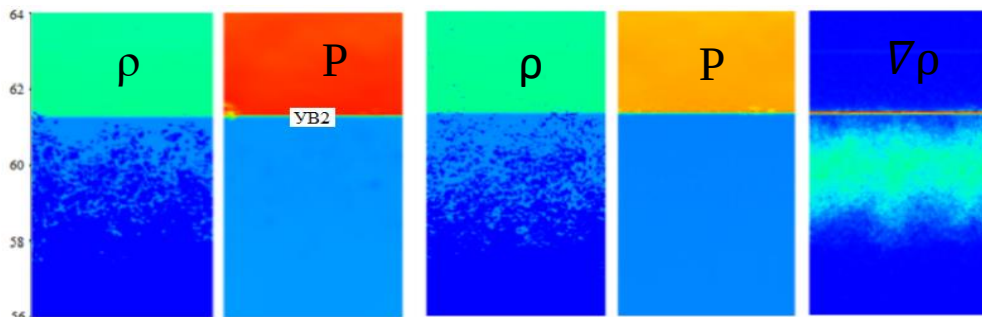
Картины течения на границе воздух-Не (тяжелое–легкое)

2D

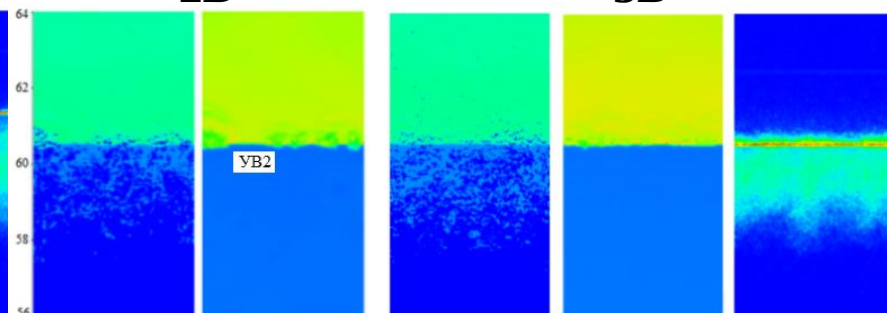
3D

2D

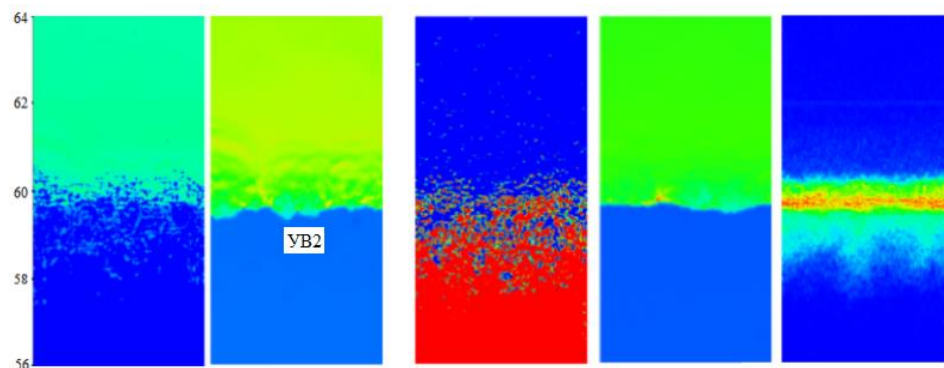
3D



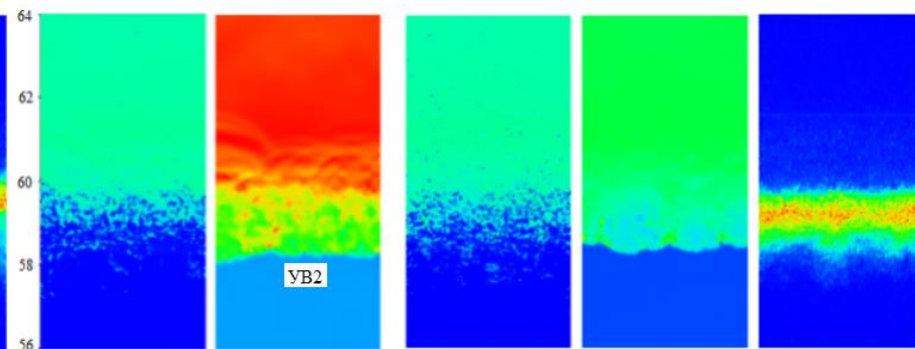
$t=3020 \text{ мкс}$



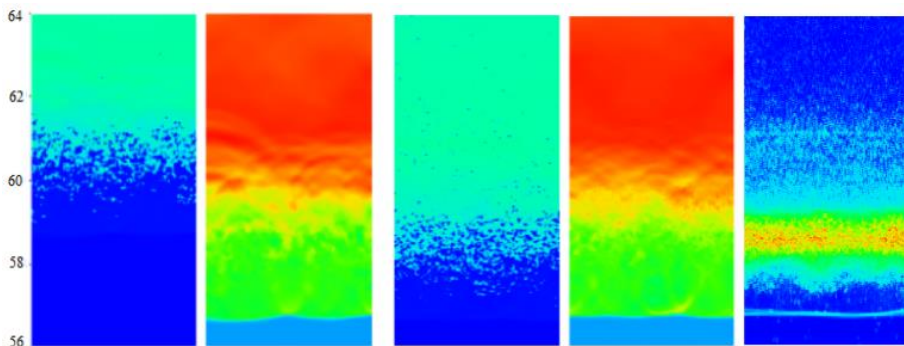
$t=3030 \text{ мкс}$



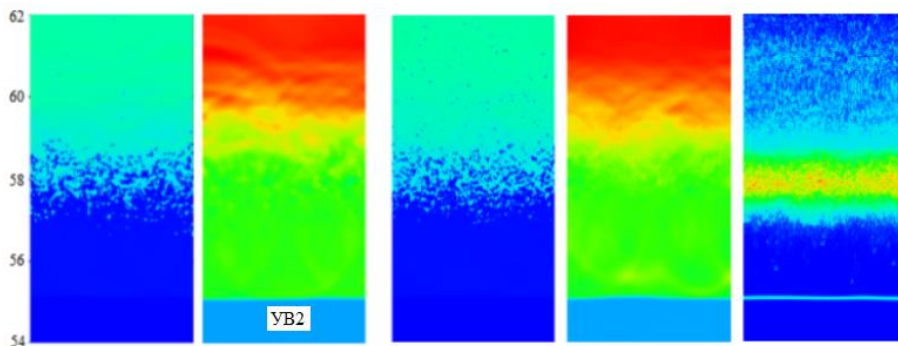
$t=3040 \text{ мкс}$



$t=3050 \text{ мкс}$



$t=3060 \text{ мкс}$



$t=3070 \text{ мкс}$

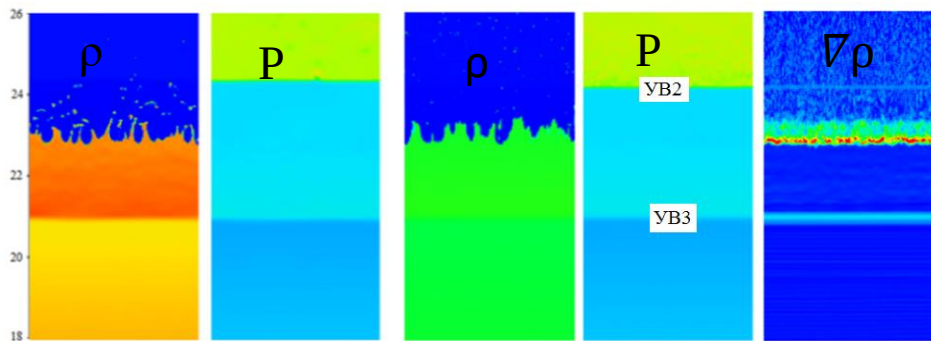
Картини течения на границе He-SF6 (легкое-тяжелое)

2D

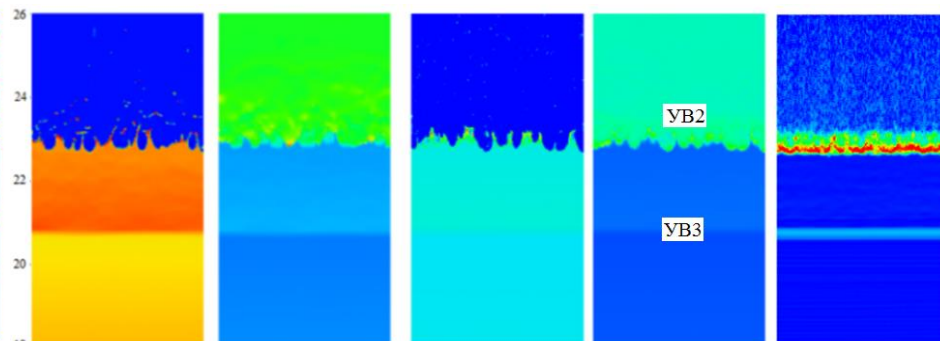
3D

2D

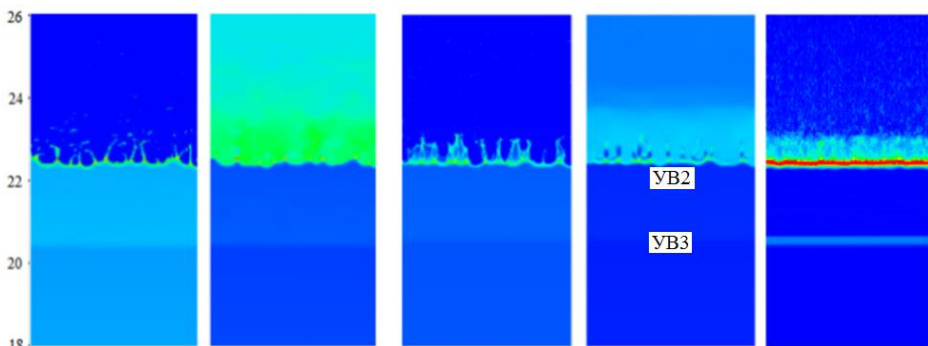
3D



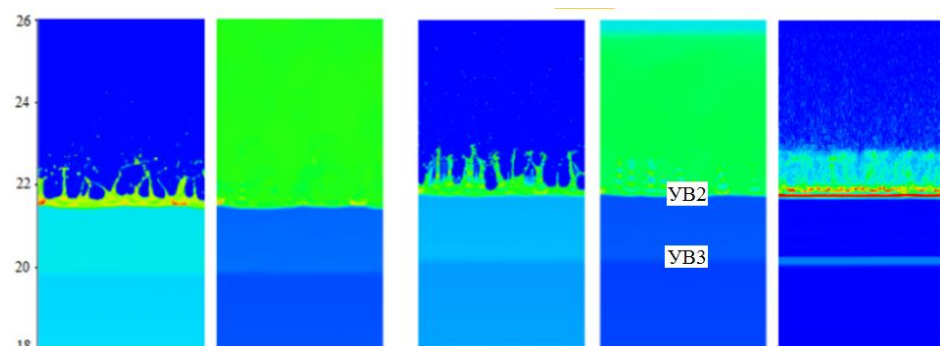
$t=3260 \mu\text{s}$



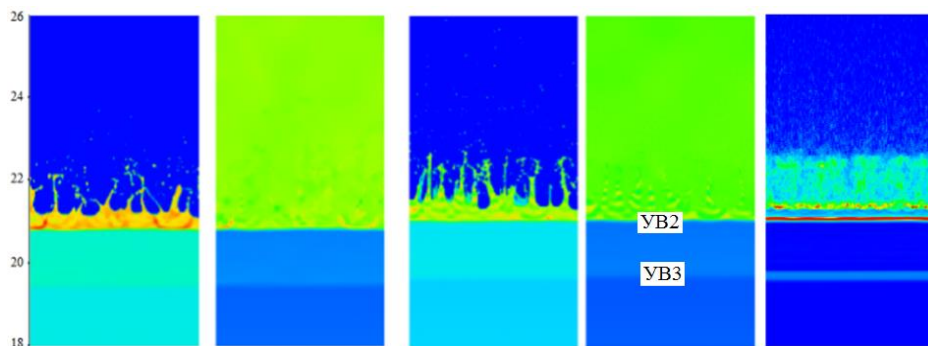
$t=3270 \mu\text{s}$



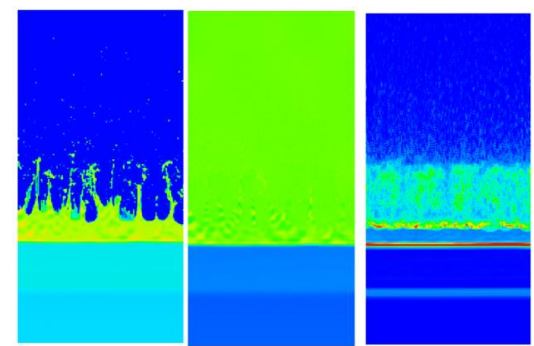
$t=3280 \mu\text{s}$



$t=3300 \mu\text{s}$



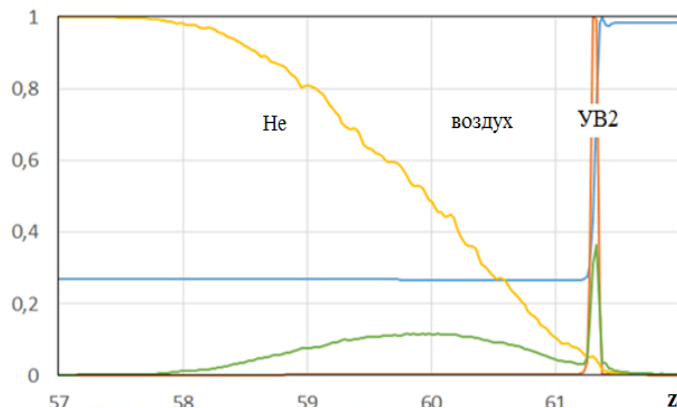
$t=3320 \mu\text{s}$



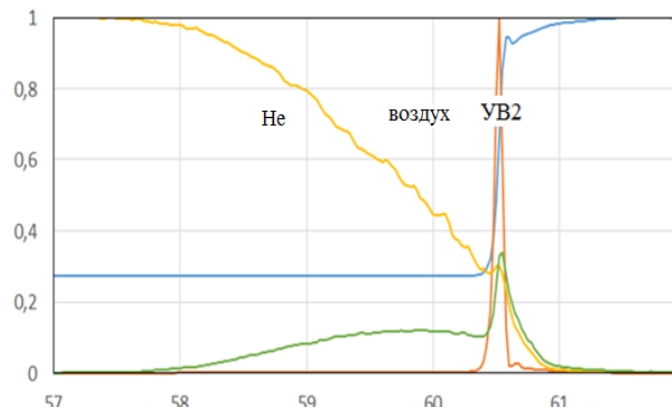
$t=3340 \mu\text{s}$

Масштабированные по максимальному значению профили осредненных величин в окрестности ЗТП (воздух-He)

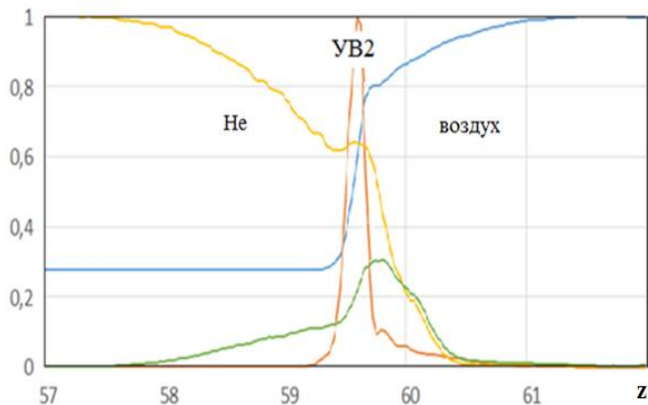
t=3020 мкс



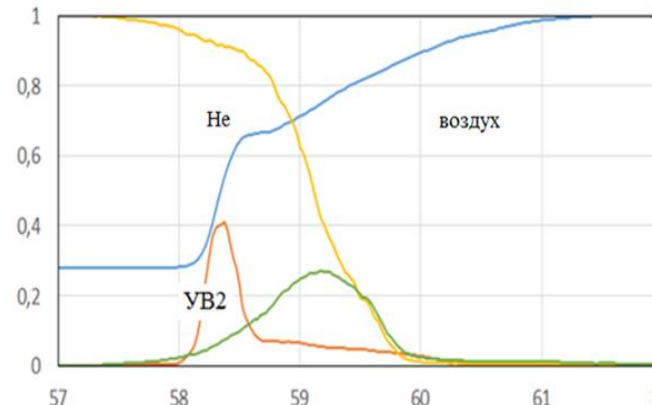
t=3030 мкс



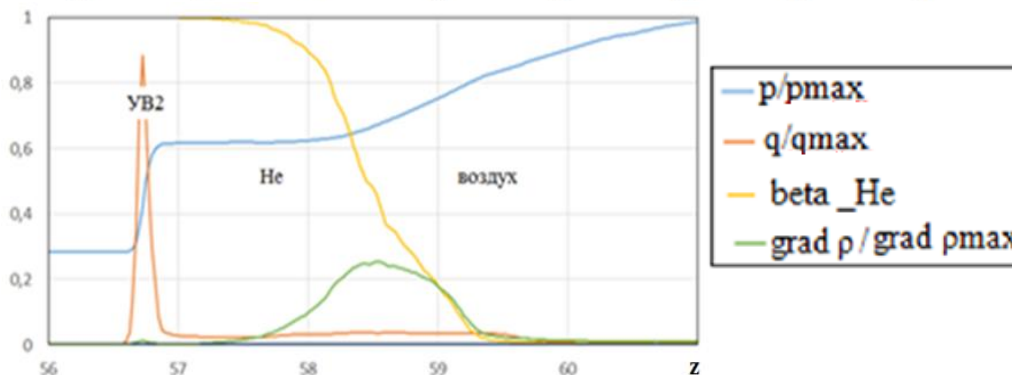
t=3040 мкс



t=3050 мкс

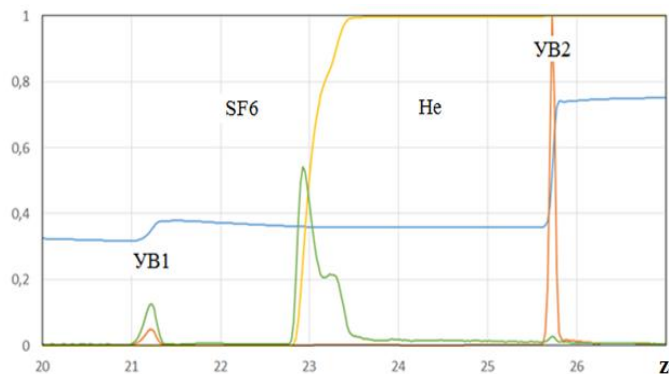


t=3060 мкс

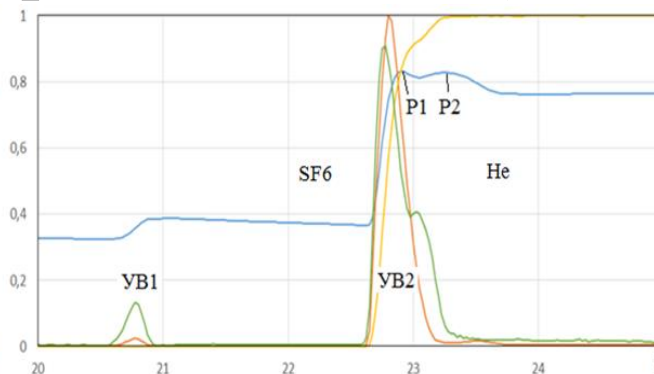


Масштабированные по максимальному значению профили осредненных величин в окрестности ЗТП (He-SF6)

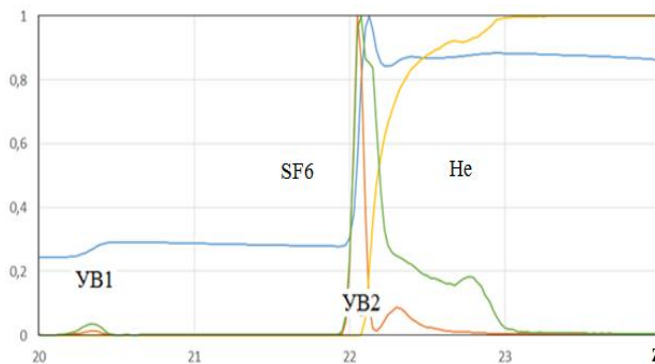
t=3260 мкс



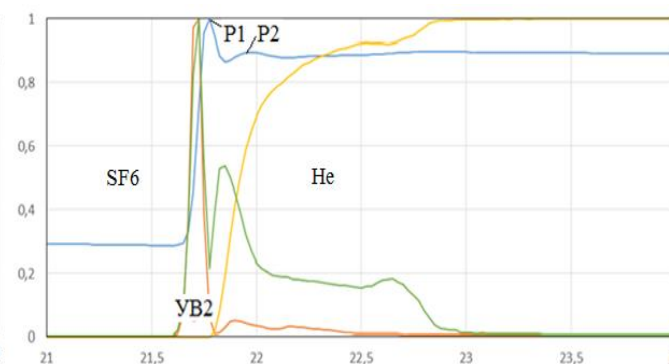
t=3270 мкс



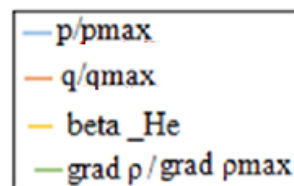
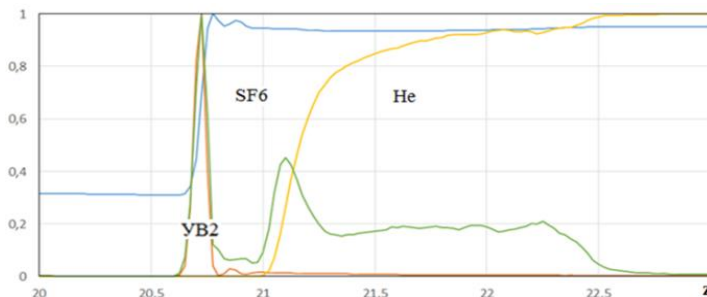
t=3280 мкс



t=3290 мкс



t=3330 мкс



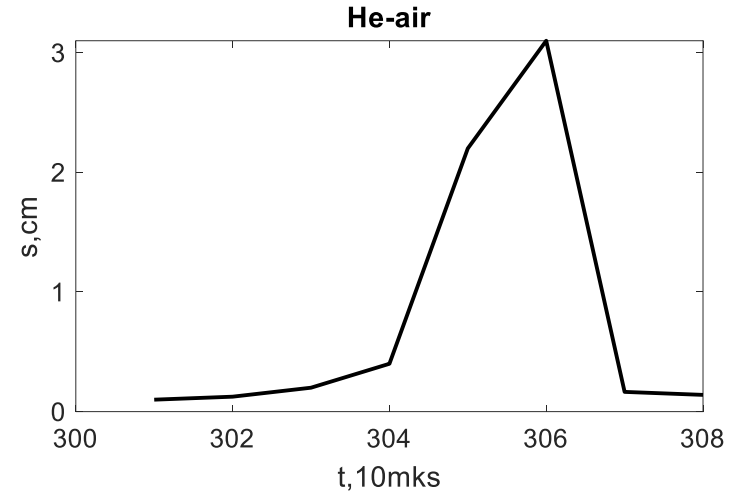
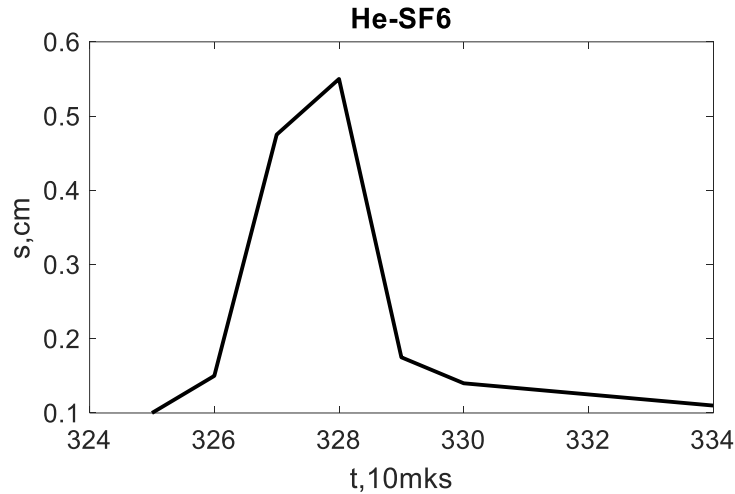
p – давление

q – искусственная вязкость

β – объемная концентрация

$\text{grad } \rho$ – градиент плотности

Ширина $УВ_2$ в ЗТП



На рисунке приводятся зависимости ширины $УВ_2$ от времени, определенные по профилям искусственной вязкости. Графики построены по значениям искусственной вязкости, составляющим ~ 0.1 от максимального значения на данный момент времени. Ширина $УВ_2$ He-SF6 в эксперименте достигает 1,8 см, что составляет около $1/3$ ширины ЗТП. Отметим, что если в расчетах ширину $УВ$ строить по ненулевым значениям искусственной вязкости, то ее ширина составит также величину $\sim 1,8$ см, что объясняется остаточными пульсациями давления на пульсациях плотности в ЗТП. Ширина ЗТП границы (воздух-He) при прохождении $УВ_2$ уменьшается в ~ 2 раза, а ЗТП (He-SF₆), наоборот, увеличивается в ~ 3 раза.

He – SF₆ (легкое – тяжелое)

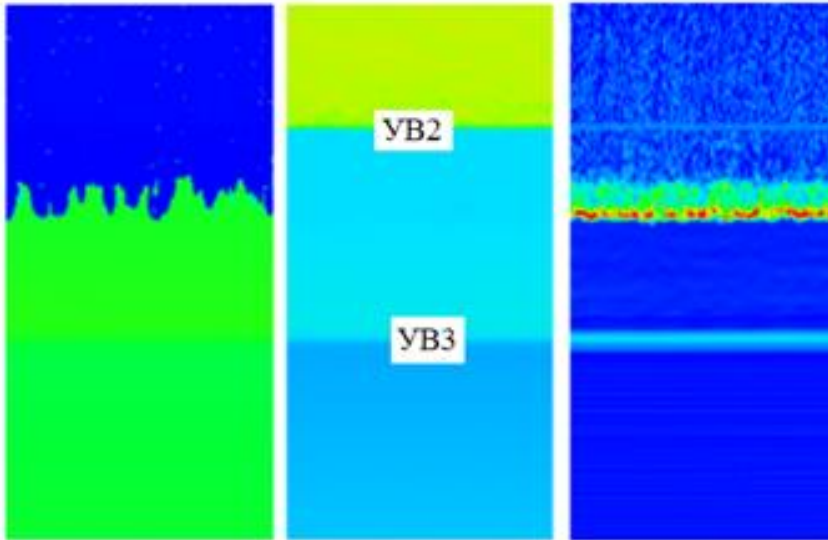
ρ (3D)

P (3D)

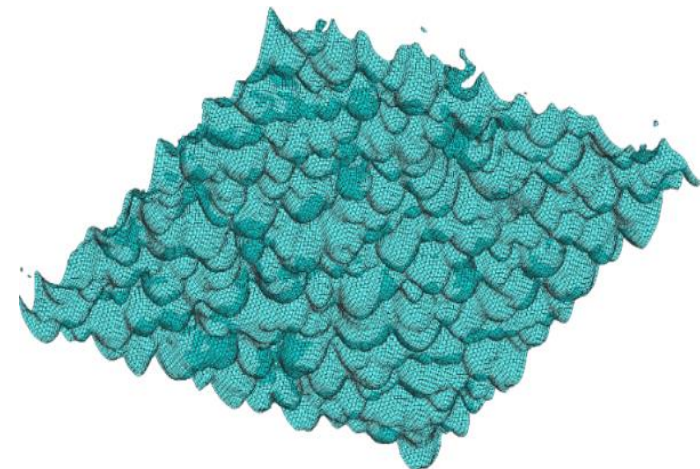
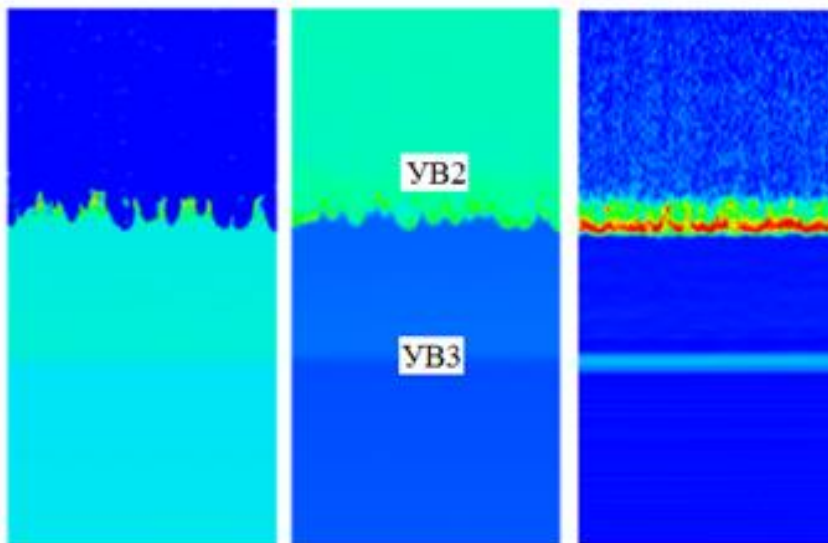
grad ρ (3D)

изоповерхность давления
(вид снизу)

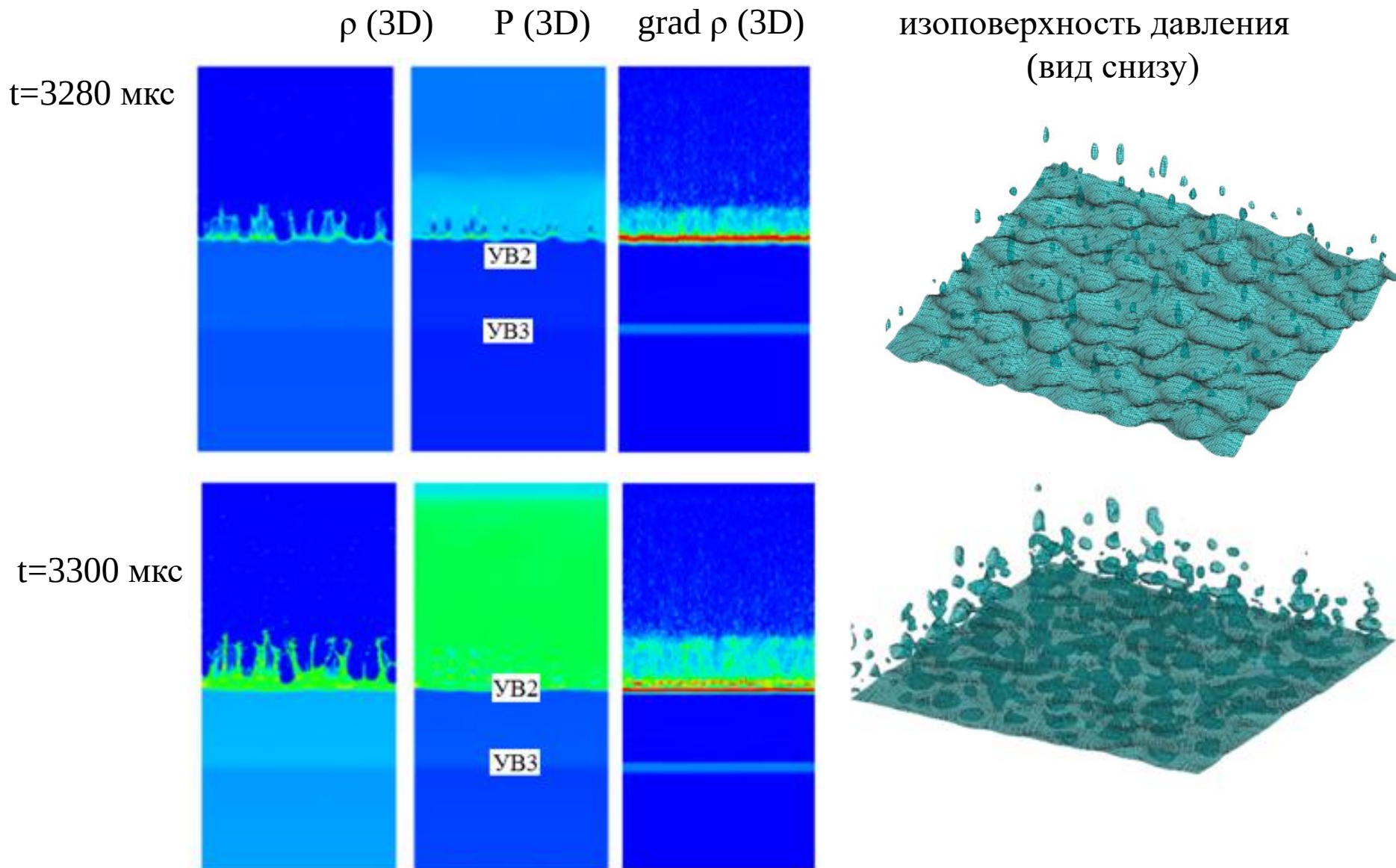
t=3260 мкс



t=3270 мкс



He – SF₆ (легкое – тяжелое)



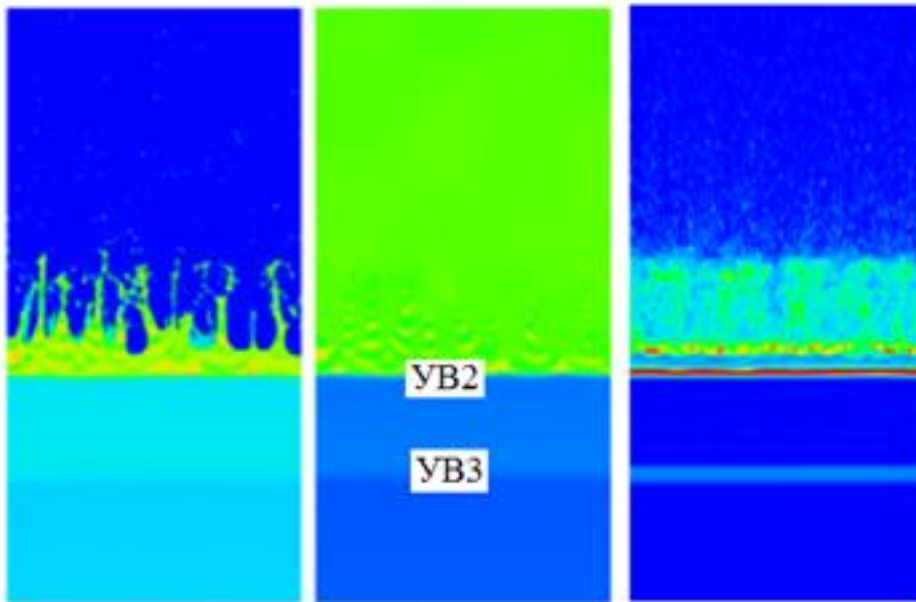
He – SF6 (легкое – тяжелое)

ρ (3D)

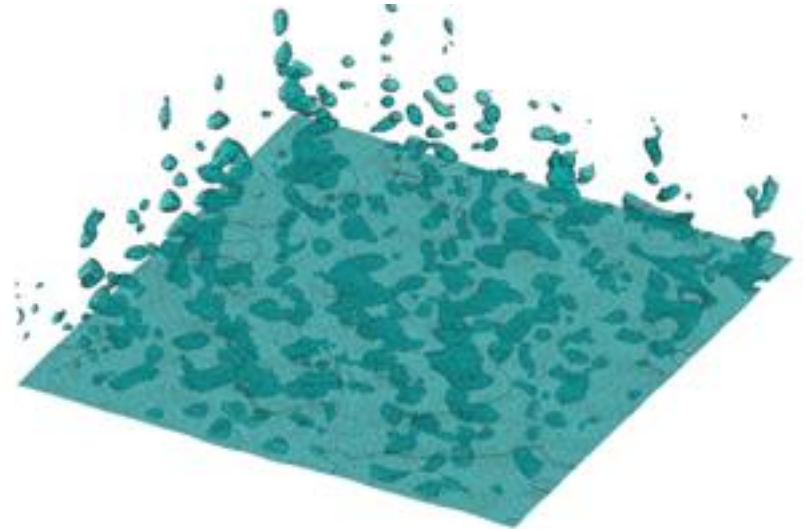
P (3D)

grad ρ (3D)

изоповерхность давления
(вид снизу)



$t=3320$ μs



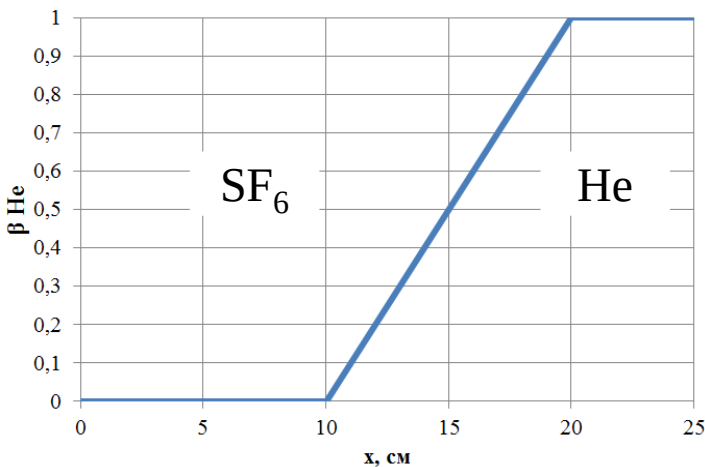
Основные результаты задачи 1

1. Расчетная ширина ЗТП He-SF_6 после прохождения УВ_1 соответствует экспериментально наблюдаемой.
2. Ширина ЗТП границы воздух-He при прохождении УВ_2 уменьшается в ~ 2 раза, а ЗТП He-SF_6 , наоборот, увеличивается в ~ 3 раза.
3. Вторичная ударная волна УВ_2 при прохождении ЗТП взаимодействует с пульсациями плотности и за счет этого рассеивается и уширяется. Качественно картина течения в окрестности границы He-SF_6 близка к наблюдаемой в опыте.
4. Отметим особенности прохождения УВ_2 двух ЗТП (из тяжелого в легкий газ и из легкого в тяжелый газ). В процессе прохождения ЗТП He-SF_6 происходит «расслоение» УВ_2 : на фронте волны появляются два пика давления, при этом пики давления сохраняются довольно длительное время после прохождения УВ через ЗТП. На границе воздух-He явление «расслоения» отсутствует.

Задача 2: Прохождение УВ через зону со смесью газов, концентрация которых распределена по линейному закону

Задача 2.1: УВ из He в SF_6

Распределение средней концентрации He



Постановка

Длинная зона смеси (10 см)



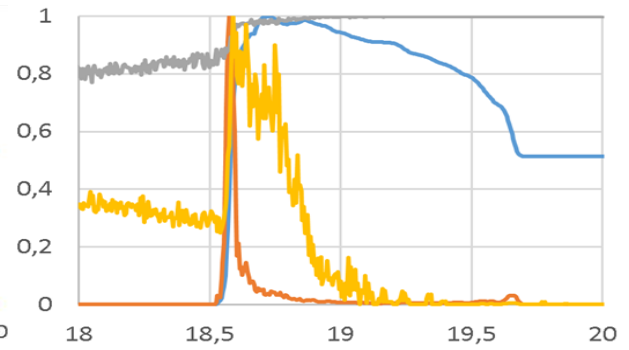
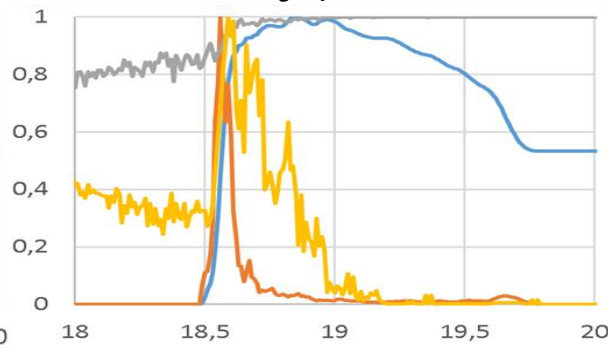
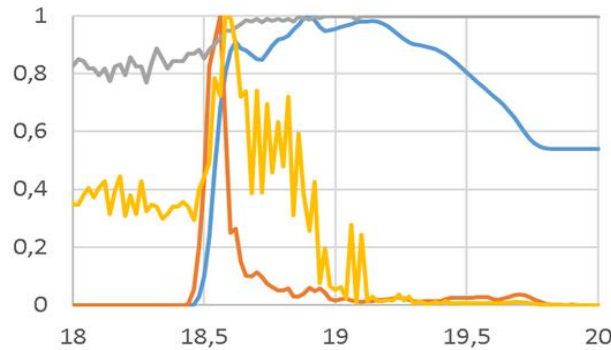
Двумерные расчеты на сходимость

N ($h = 0.02$ см)

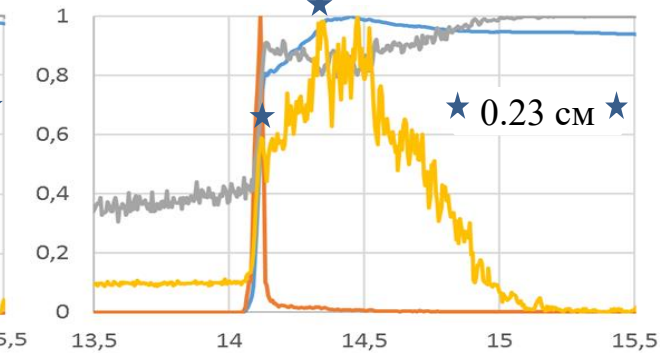
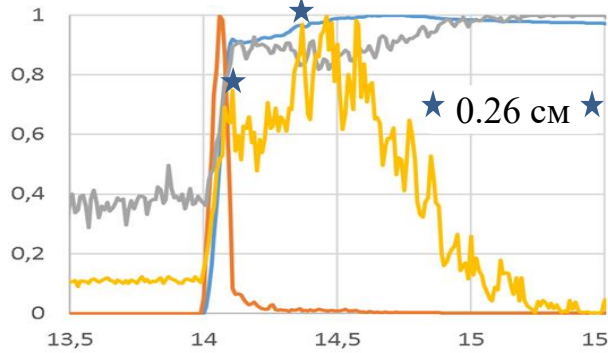
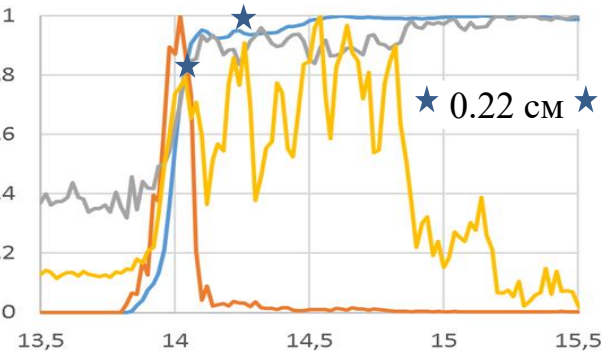
2N ($h = 0.01$ см)

4N ($h = 0.005$ см)

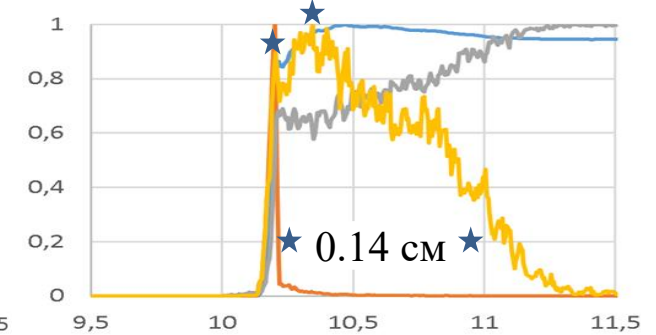
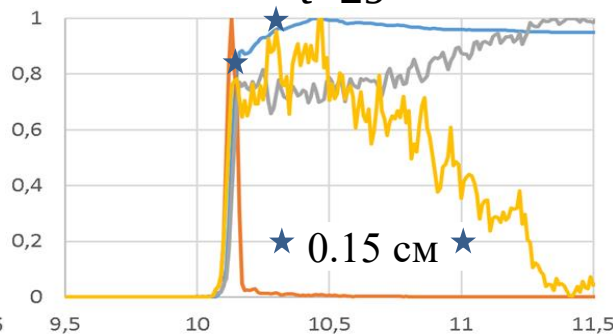
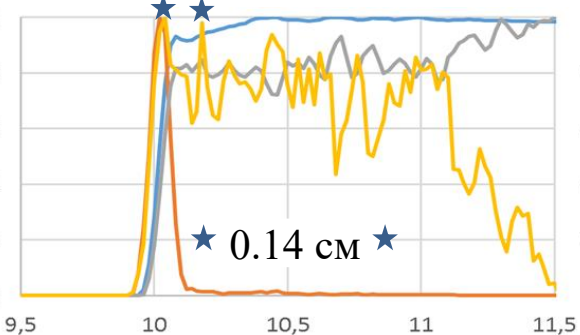
t=7



t=17



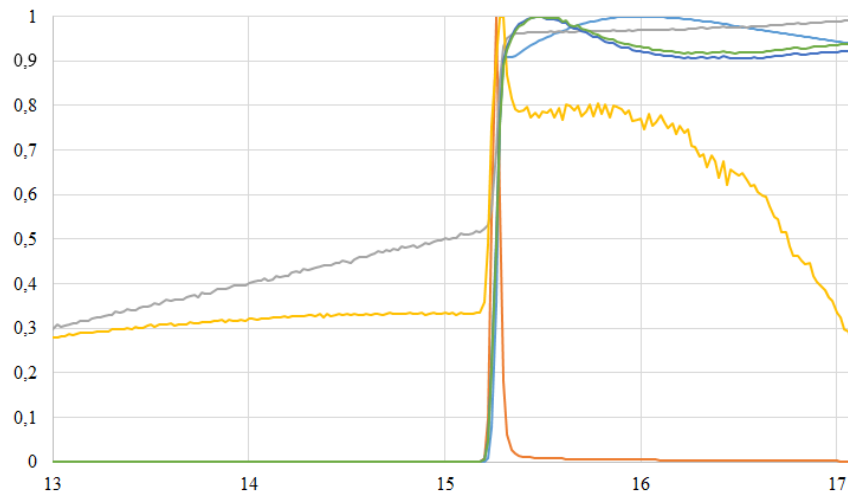
t=29



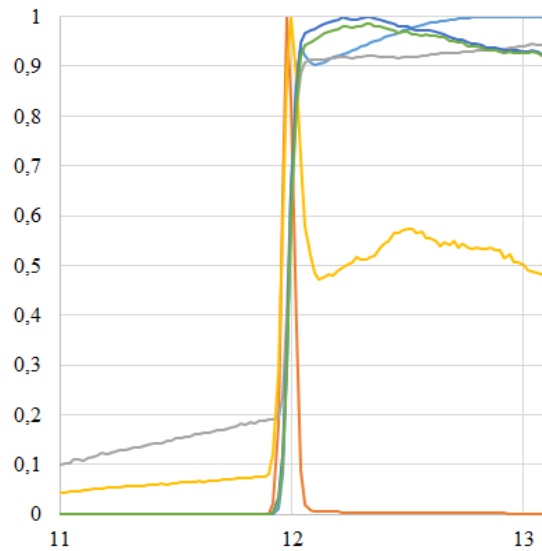
— $p/p_{\max}$ — $q/q_{\max}$ — β_{He} — $\text{gradRo}/\text{gradRo}_{\max}$

УВ из He в SF₆ (3D расчет)

режим «расслоенной» УВ



$t=19$

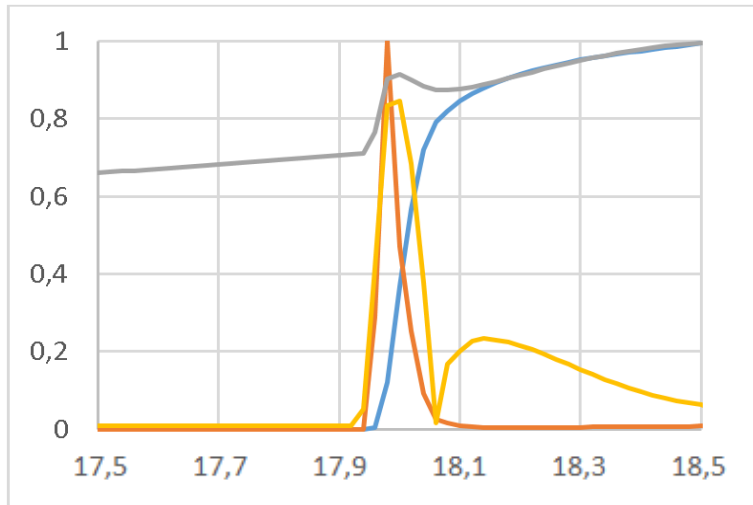


$t=28$

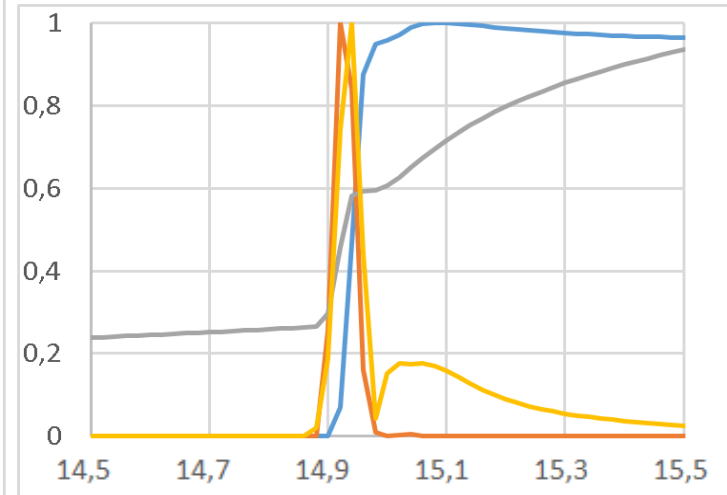
— $p/p_{\max}$ — $q/q_{\max}$ — β_{He} — $\text{gradRo}/\text{gradRo}_{\max}$

УВ из He в SF₆ (*k*- ϵ модель)

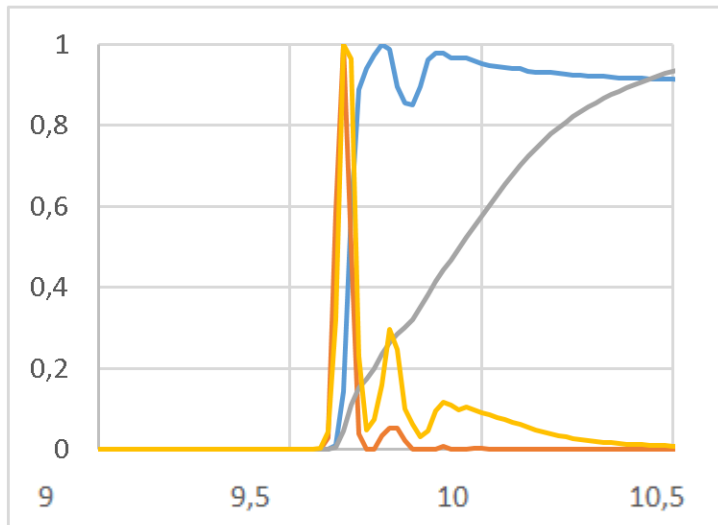
t=13



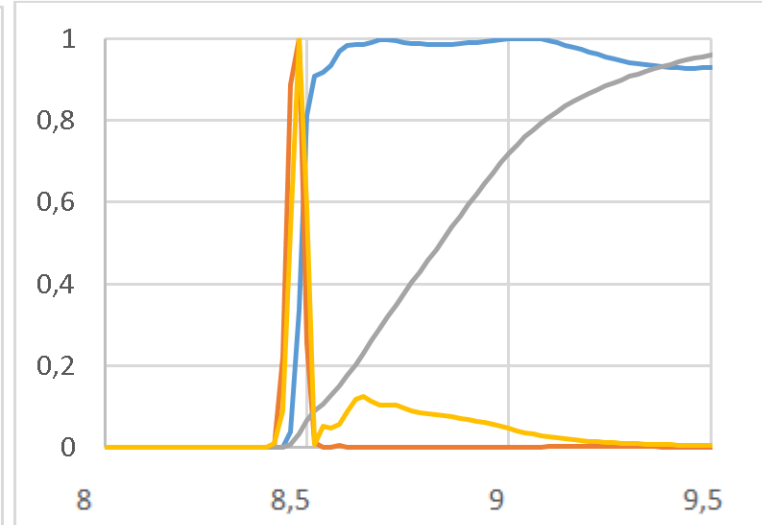
t=20



t=36



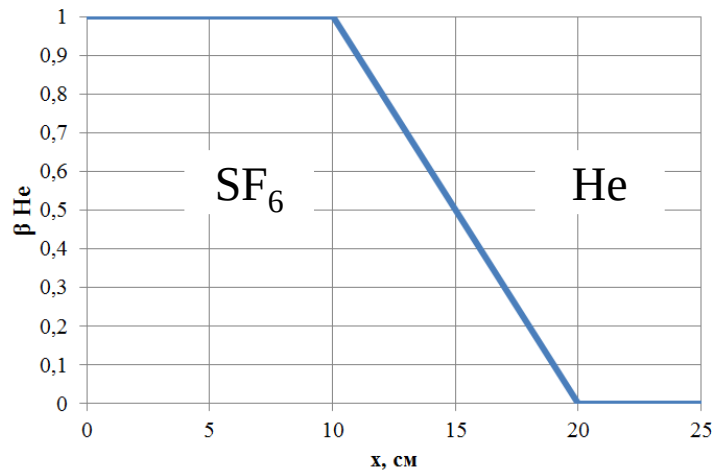
t=40



— p/p_max — q/q_max — betaHe — gradRo/gradRo_max

Задача 2.2: УВ из SF_6 в He

Распределение концентрации He



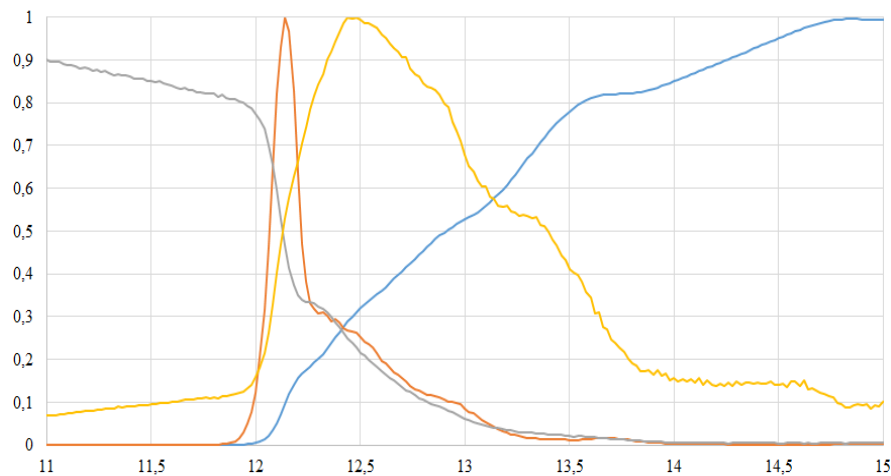
Постановка

Длинная геометрия (зона смеси 10 см)

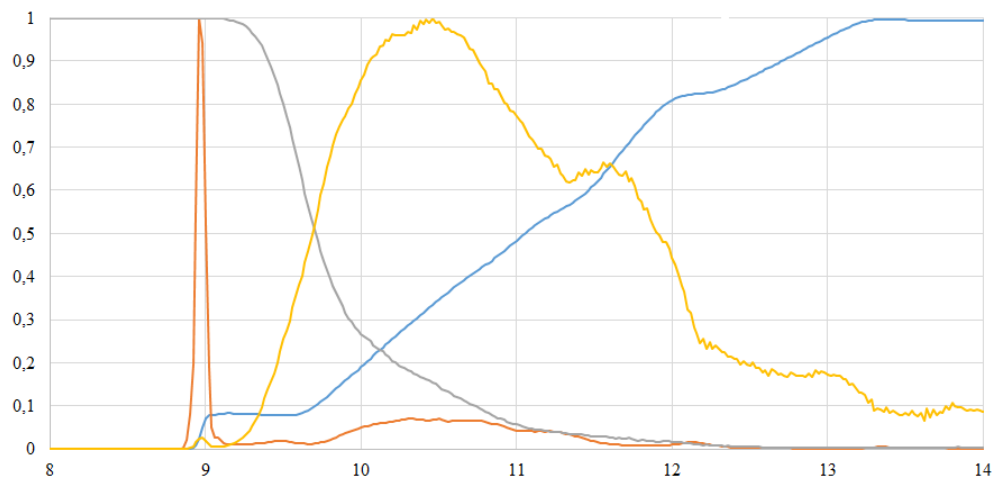


УВ из SF_6 в He (3D расчет)

режим «размытой» УВ



$t=17$

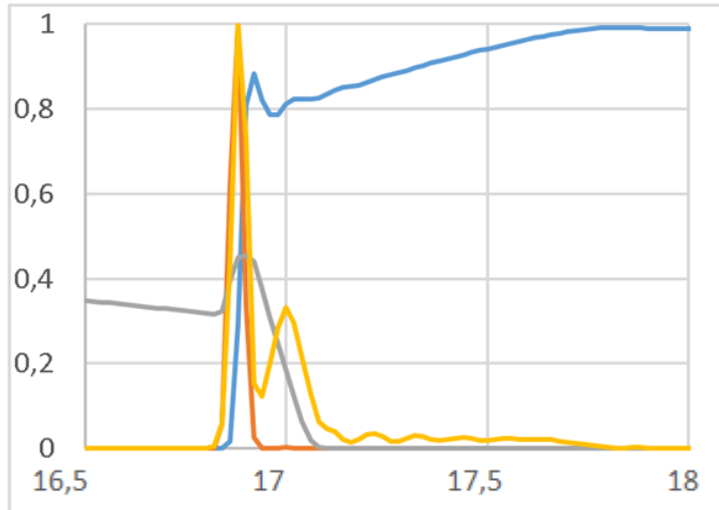


$t=19$

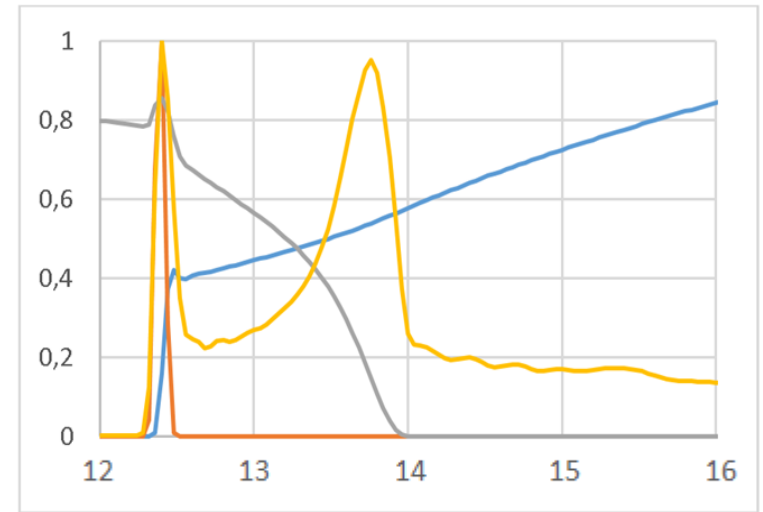
— p/p_{max} — q/q_{max} — β_{He} — $\text{gradRo}/\text{gradRo}_{\text{max}}$

УВ из SF_6 в He (k - ε модель)

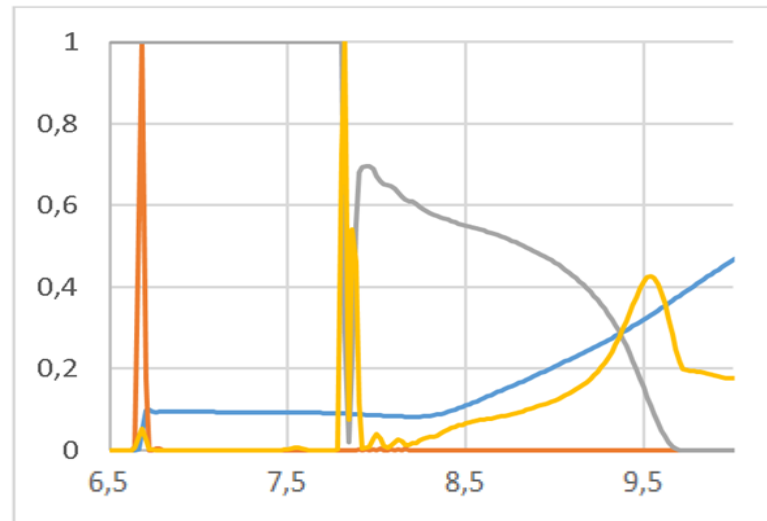
t=13



t=17



t=20



— p/p_max — q/q_max — betaHe — gradRo/gradRo_max

Заключение

Из расчетов по методике ЭГАК (2D и 3D ПЧМ, k - ε модель) вытекают следующие выводы:

- режим «**wrinkled shock regime**» (**режим «расслоенной» УВ**) реализуется при прохождении УВ через зону смешения в направлении «из легкого вещества в тяжелое»;
- режим «**broken shock regime**» (**режим «размытой» УВ**) реализуется при прохождении УВ через зону смешения в направлении «из тяжелого вещества в легкое».

Спасибо за внимание