



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

# **Моделирование развития неустойчивостей Рихтмайера-Мешкова, Рэля-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца на мощных лазерных установках**

И.В. Глазырин, К.Ф. Гребёнкин, О.Г. Котова, Н.А. Михайлов, К.С. Назаров,  
А.В. Павленко, А.В. Потапов, М.Н. Чижков

Российский Федеральный Ядерный Центр - ВНИИ Технической Физики  
им. акад. Е.И. Забабахина, Россия, Снежинск

# Мотивация



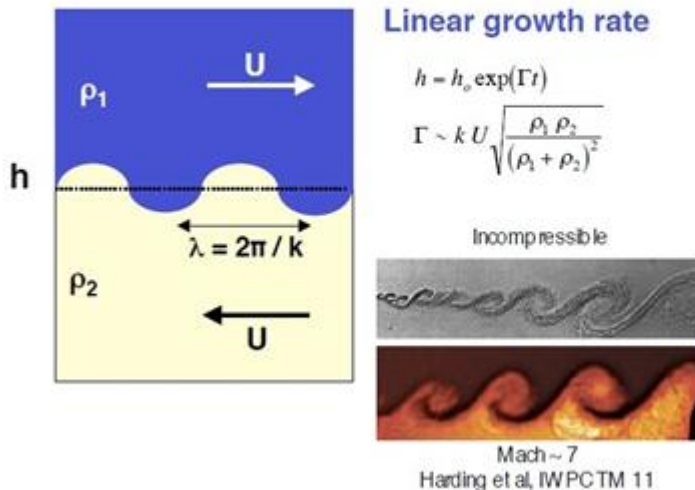
- Что плохого в гидродинамических неустойчивостях?
- В результате их развития возникают потери в энергии и в достигаемой плотности кумулируемой в мишени УТС энергии, необходимой для зажигания.
- Газовые пушки и ударные трубы полезны, если течение в эксперименте сжимаемое или слабосжимаемое, но для HEDP-экспериментов характерна сильная сжимаемость и высокая плотность энергии с развитием неустойчивостей и перемешиванием.
- Достичь высокоскоростных сжимаемых течений можно на сильноточных электрофизических и мощных лазерных установках.
- Также хотелось бы получить как интегральные (ширина зоны, теневые изображения), так и структурные (коэффициенты гетерогенности и асимметрии, отношения продольной и поперечной скоростей, спектр, размер вихрей и т.д.) характеристики течения.

# Существующие экспериментальные и расчётные данные

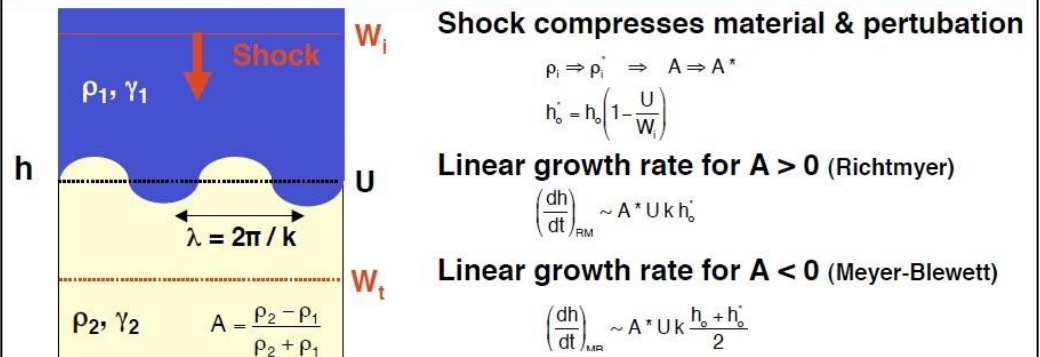
На мощных лазерных установках возможно достижение термодинамических состояний веществ, характерных для сильно сжимаемых течений с высокими плотностями энергии

- ✓ Экспериментальные данные получены на установке OMEGA (Рочестер)
- ✓ Сравнивались с кодам CALE и ARES
- ✓ Основной целью была верификация расчётных программ на экспериментальных данных

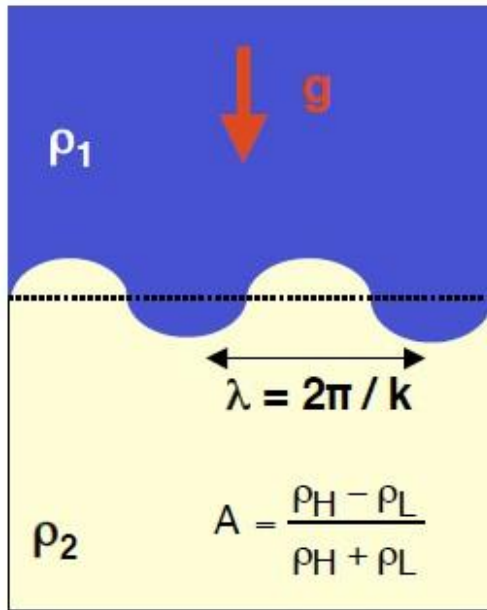
Kelvin-Helmholtz instability is driven by velocity shear & quickly becomes self-similar



Richtmyer-Meshkov instability is driven by shock impulse on perturbed interface – theory, experiments & simulations in reasonable agreement in fluid regime



# Rayleigh-Taylor instability occurs when a high density fluid is accelerated or supported against gravity by a low density fluid



Linear ( $kh_k < 1$ )

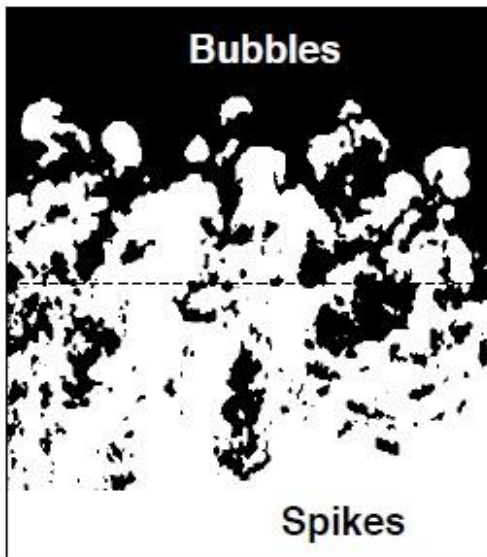
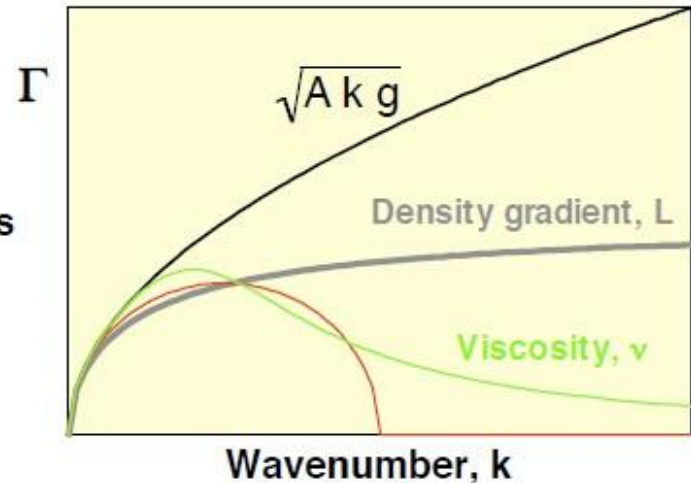
$$h_k \sim h_{ok} \exp(\Gamma t)$$

Short wavelength modes stabilized partially by

Density gradient, L  
Viscosity,  $\nu$

& completely by

ablation flow,  $v_a$   
surface tension,  $\sigma$   
elasticity, G



Non-linear ( $kh_k > 1$ )

$$\frac{dh_k}{dt} \propto \sqrt{A g \lambda}$$

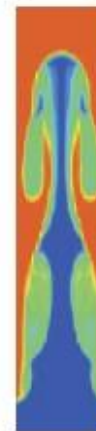
depends on  $\nu$ ,  $\sigma$ , G

Turbulent mixing

= broadband & nonlinear  
Self-similar bubbles/spikes

$$\lambda_b \propto h_b \sim \alpha_b A g t^2$$

$\nu = 0$



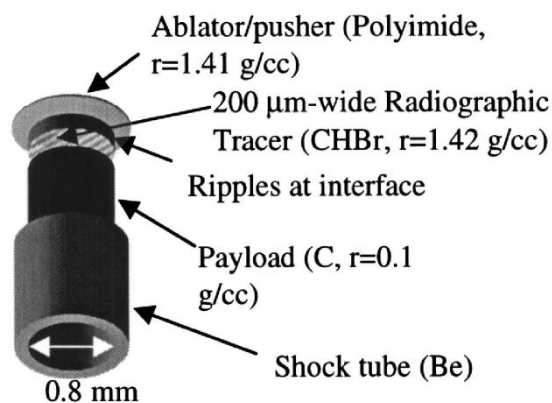
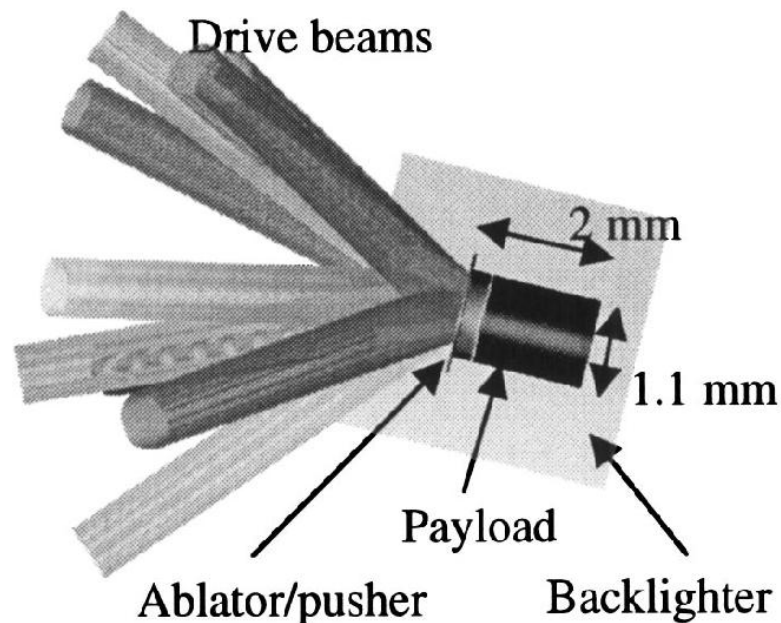
$\nu \neq 0$



Exp



# Эксперимент на OMEGA: неустойчивости РТ-РМ



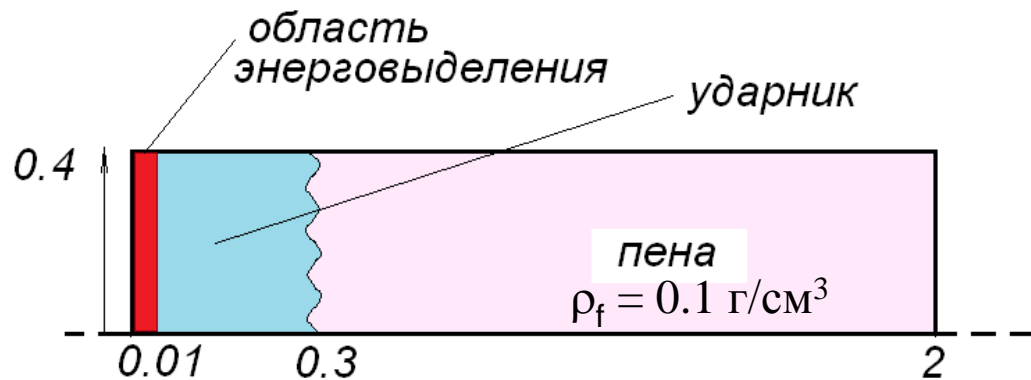
## OMEGA:

$E = 5 \text{ кДж},$

$\tau = 1 \text{ нс}, r_f = 515 \text{ мкм}$

10 импульсов  $I = 6 \cdot 10^{14} \text{ Вт/см}^2$

Мишень в разрезе



Пластик  $\rho_p = 1.41 \text{ г.см}^3$

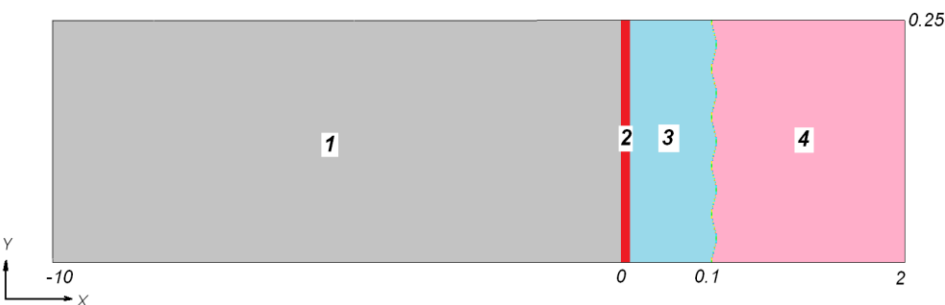
Возмущение на контактной границе - синусоида с  $\lambda = 50 \text{ мкм}$   $a_0 = 2.5 \text{ мкм}$



# Постановка для расчета неустойчивостей РТ-РМ

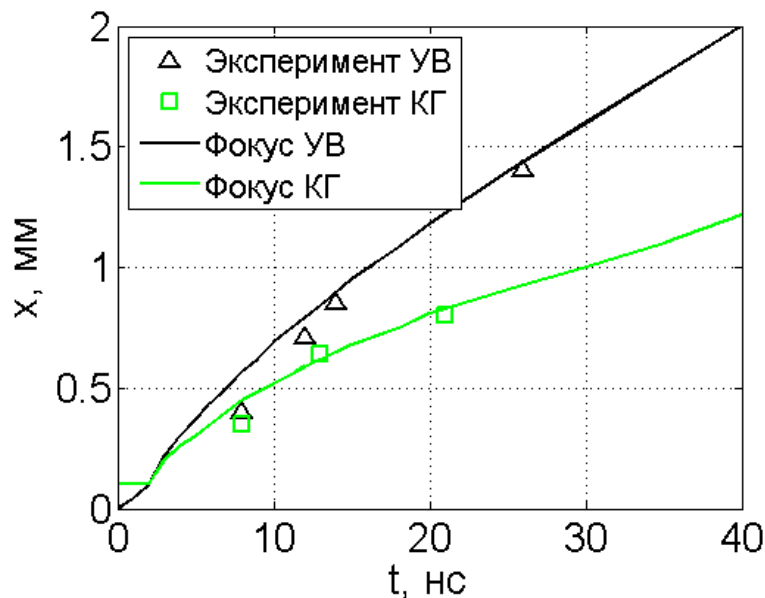


№	Название	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma$	$C_v$ , лом/(г·кэВ)	T, кэВ	Ширина, мм
1	гелий	0.01	5/3	3.6	$1.0 \cdot 10^{-3}$	10
2	пластик	1.41	5/3	10	$2.5 \cdot 10^{-5}$	0.01
3	пластик	1.41	5/3	10	$2.5 \cdot 10^{-5}$	0.1
4	пена	0.1	7/5	10	$4.5 \cdot 10^{-5}$	1.9

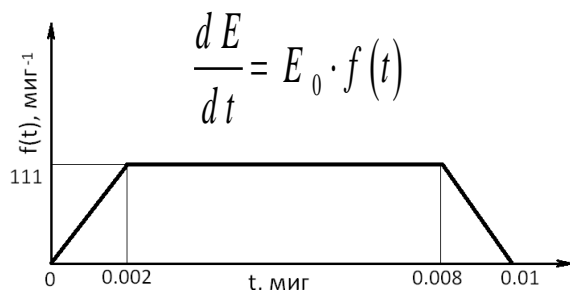


- УРС идеального газа
- давление в областях 3 и 4 одинаково
- на границе 3-4 синусоида  $\lambda = 50$  мкм,  $A = 2.5$  мкм.
- области 2-4 сетка квадратная  $\Delta = 0.5$  мкм.; на  $\lambda$  100 ячеек, на  $A$  – 5.
- область 1 сетка с укрупнением;
- ГУ: правое-левое – свободный выход;
- ГУ: верх-низ – жесткая стенка.

# Вычисление коэффициента поглощения ЛИ и величины навязанного энерговыделения



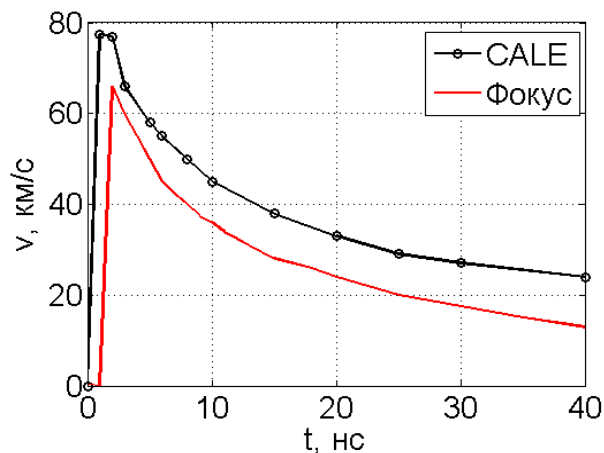
Положение ударной волны(УВ)  
и контактной границы (КГ)



- $E_0 = 15.7$  лом/г·микг;
- коэффициент поглощения энергии ЛИ **35%**.
- Энергия выделяется **равномерно** по площади фокального пятна за 1 нс на глубину скин-слоя  $h = 10$  мкм.

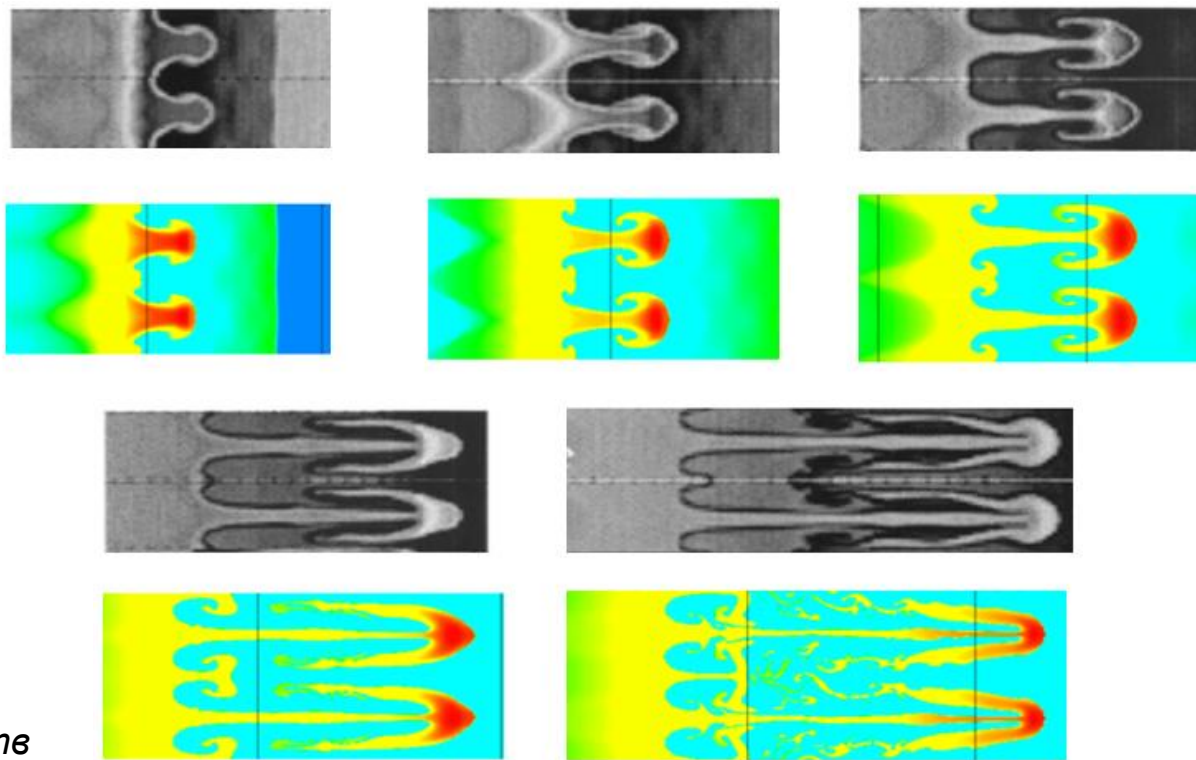
# Сравнение с расчетом CALE

Скорость в расчёте Фокус меньше, но ускорение близкое



Скорость границы раздела веществ

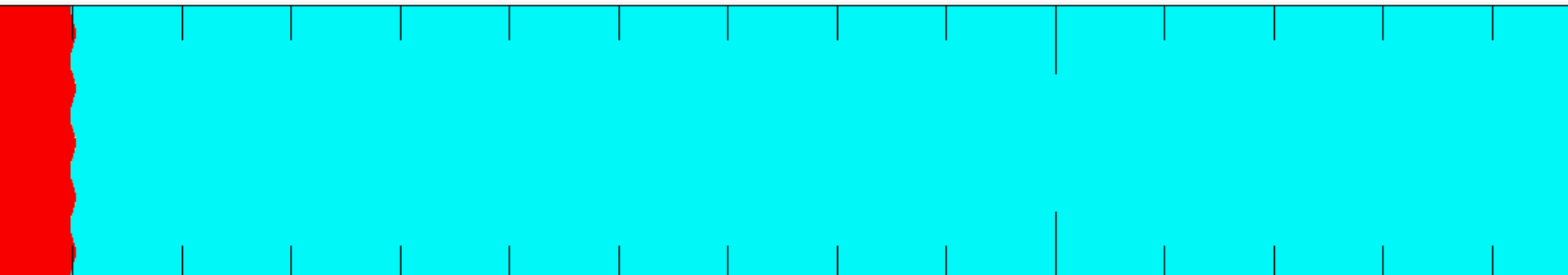
CALE – лагранжев код,  
Фокус – эйлеров код.



Распределение плотности в моменты времени слева направо 4, 6, 8, 12 и 16 нс. Сверху – расчет по программе CALE, снизу – по Фокус. В расчете программы Фокус 1 деление соответствует 100 мкм

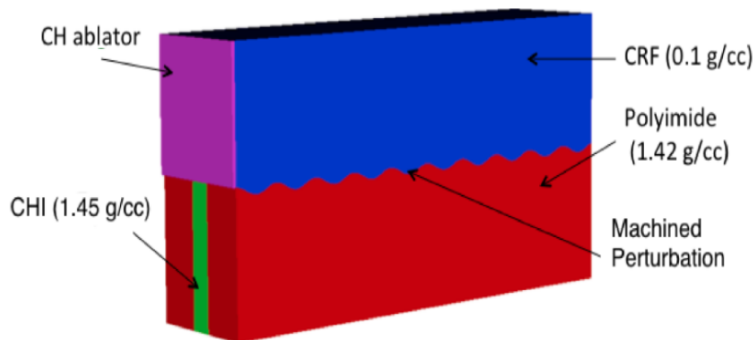


# Динамика струй и пузырей



Распределение плотности в постоянном диапазоне 0.004-0.4 г/см<sup>3</sup>

# Эксперимент на OMEGA: неустойчивость КГ



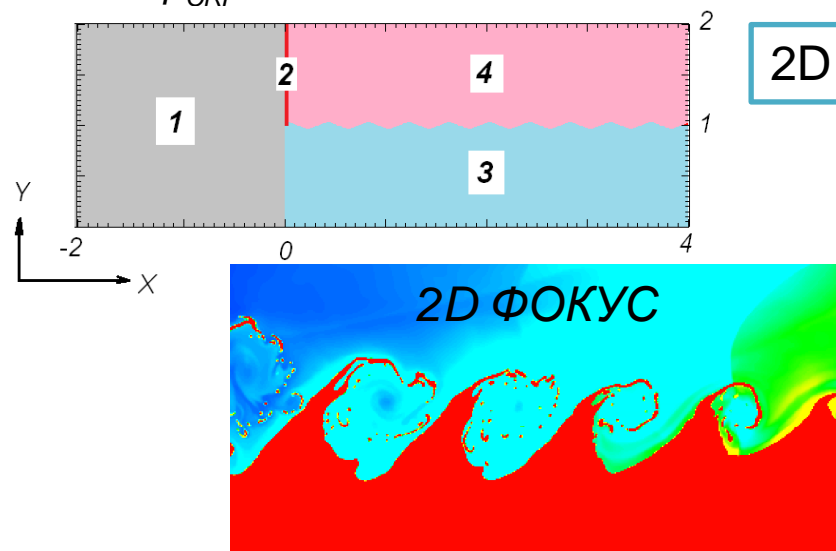
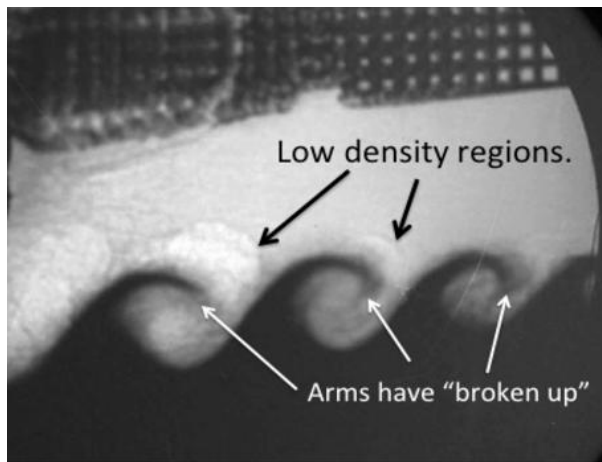
Конфигурация мишени в эксперименте\*.

## OMEGA:

- $E = 4$  кДж,  $\lambda = 0.351$  мкм
- $r_f = 430$  мкм
- 10 импульсов  $I = 8 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>
- длительности  $\tau = 100$  пс

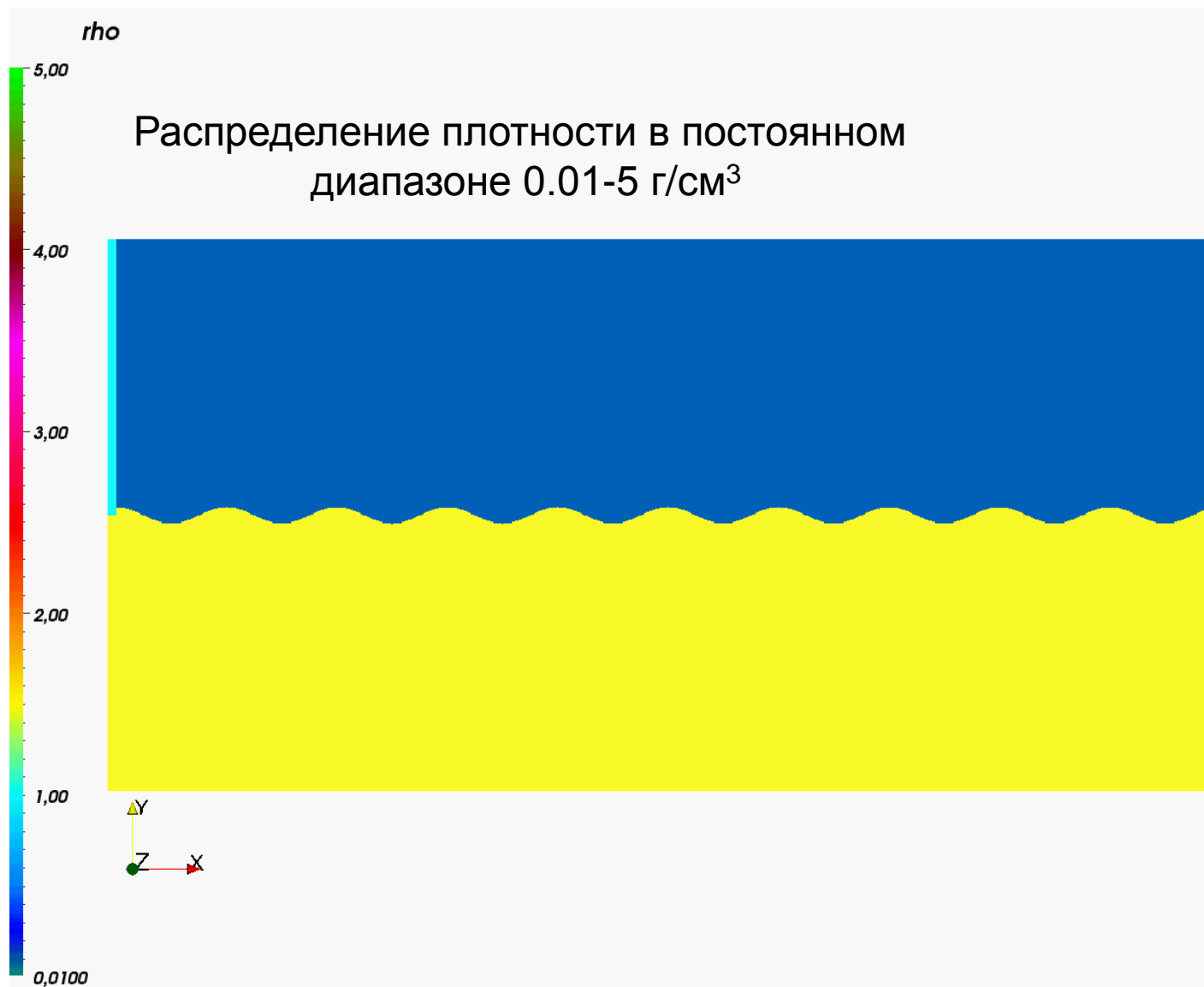
## Состав мишени

- Аблятор: полистирол,  $\rho_{C8H8} = 1.05$  г/см<sup>3</sup>
- Пластик CHI,  $\rho_{CHI} = 1.45$  г/см<sup>3</sup>
- Полиимид,  $\rho_{PI} = 1.41$  г/см<sup>3</sup>
- Пена:  $\rho_{CRF} = 0.1$  г/см<sup>3</sup>



(\*) K.S. Raman, O.A. Hurricane, H.S. Park, B.A. Remington, H. Robey, V.A. Smalyuk. Three-dimensional modeling and analysis of a high energy density Kelvin-Helmholtz Experiment Physics of Plasmas, 22 2012. LLNL-JRNL-531731.  
 J. M. Soares, R. L. McCrory, C. P. Verdon *et al.*, Phys. Plasmas **5**, 2108(1996). R.M.10 Darlington, T. L.McAbee, and G. Rodrigue, Comp. Phys.Comm. **135**, 58 (2001).

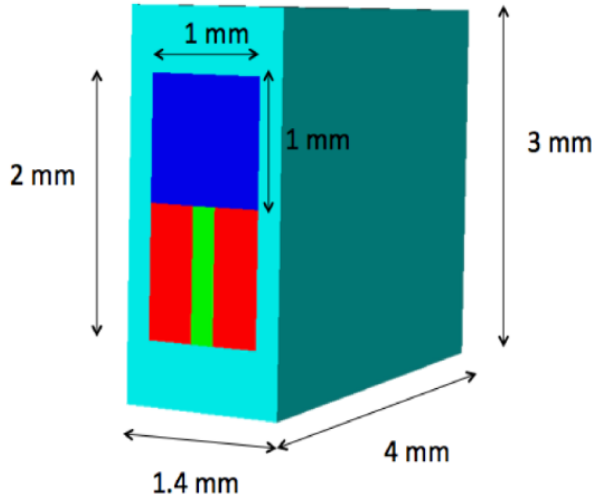
# Динамика струй и пузырей



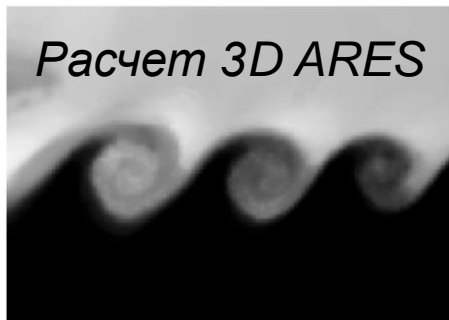
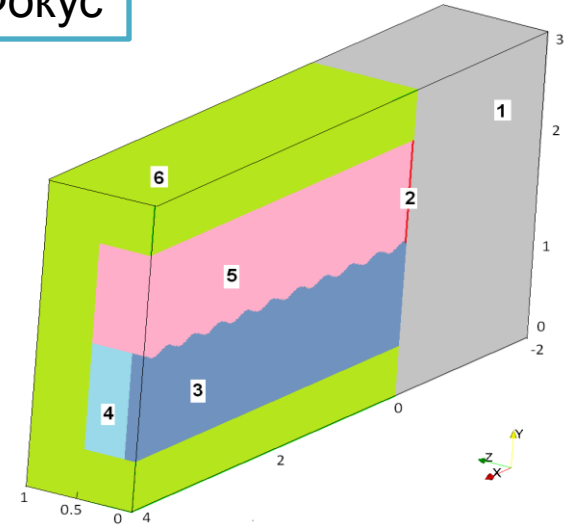
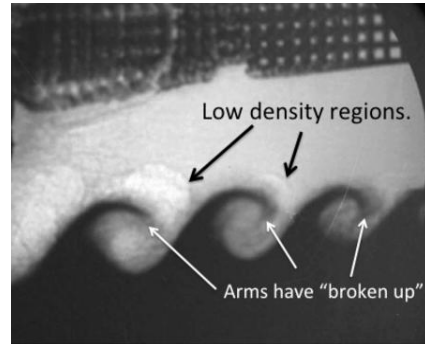
# Постановка расчетов для неустойчивости КГ



3D ARES



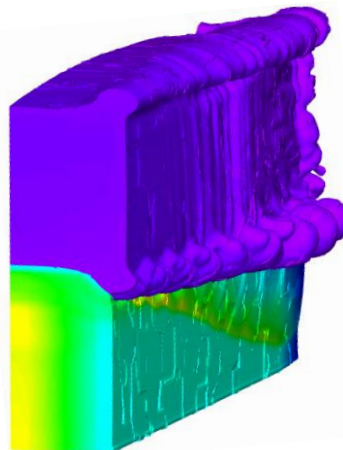
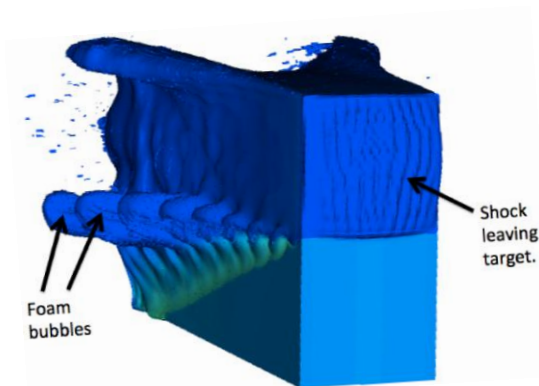
3D Фокус



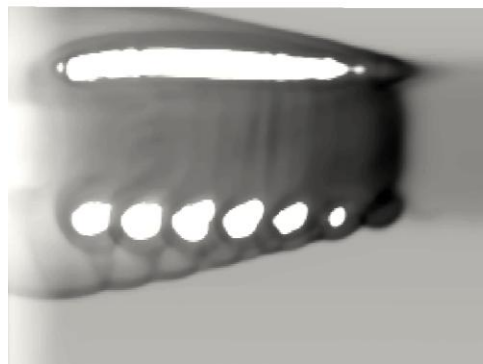
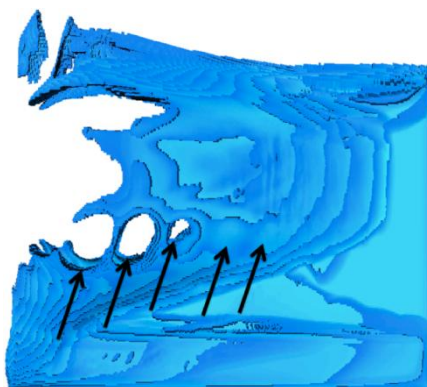
- области 2-4 сетка квадратная  $\Delta = 4$  (15)  $\mu\text{m}$ ., на  $\lambda$  100 (26) ячеек, на  $A - 7.5$ . (2)
- ГУ 2D: правое-левое – свободный выход.; верх-низ – стенка без прилипания
- ГУ 3D:  $z = 0$  – плоскость симметрии, остальные границы свободные.
- УРС идеального газа
- давление выровнено
- на границе 3-5 синусоида  $\lambda = 400$   $\mu\text{m}$ ,  $A = 30$   $\mu\text{m}$ .

№ области	1	2	3	4	5	6
вещество	гелий	пластик	пластик	пластик	пена	бериллий
$\rho, \text{г/см}^3$	0.01	1.05	1.45	1.41	0.1	1.84

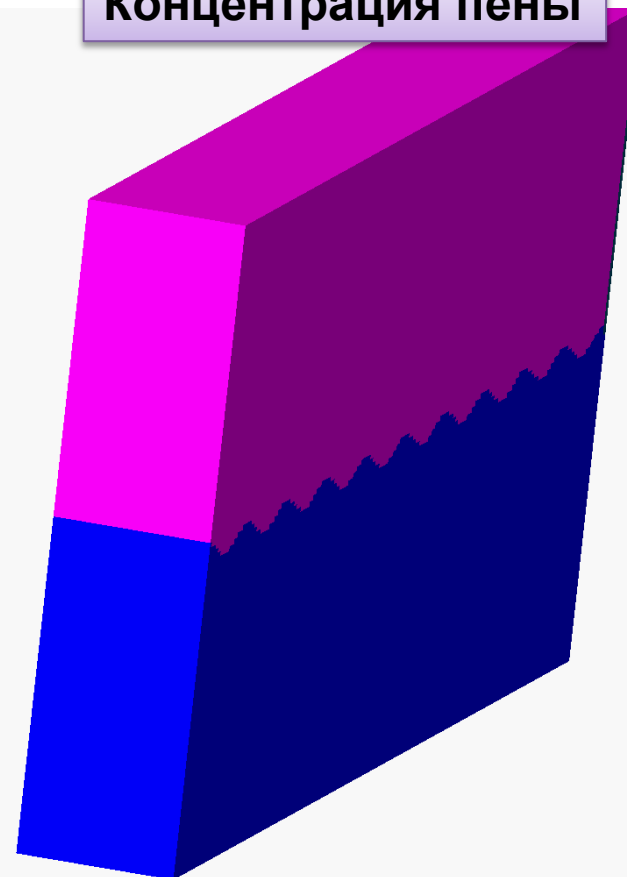
# Сравнение с расчетом ARES



Распределение пены и пластика в момент выхода УВ из расчетной области. Слева расчет ARES, справа – Фокус.



Концентрация пены



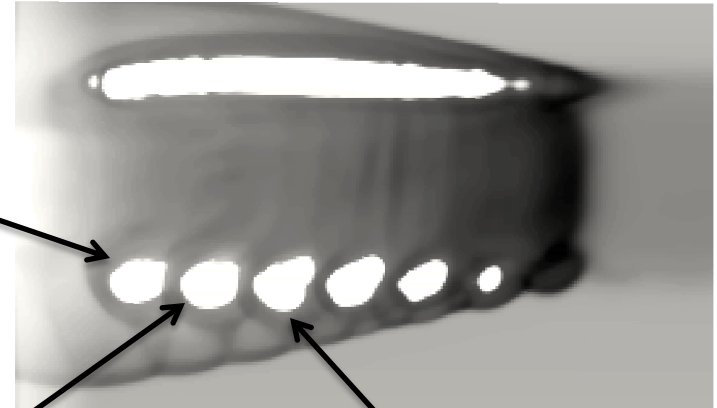
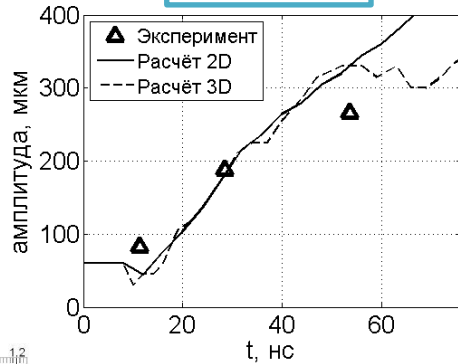
Концентрация пластика

Распределение плотности на плоскости XOY внутри оболочки, соответствующей  $z = 0.55$  мм. Поперечный размер пузырей в плоскости XOY близок с расчетом по программе ARES и соответствует длине волны возмущения  $\lambda_{\text{КГ}}$

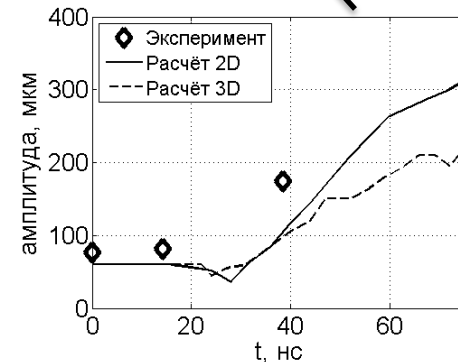
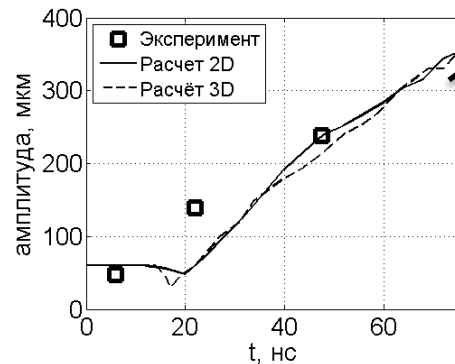
# Сравнение с экспериментом

2-я волна

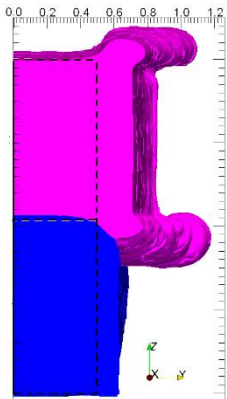
Рост амплитуды



3-я волна



4-я волна



## Амплитуды пузырей

$$h_b = \max(r_{1\%}), \quad h_s = \max(r_{99\%}),$$

где  $r_{p\%}$  - радиус слоя, в котором средняя по данному слою концентрация вещества достигает  $p\%$ .

$$\langle Y(r) \rangle = 1/L^2 \iint Y(r, \theta, \varphi) d\theta d\varphi$$

Оба интеграла берутся по дуге вдоль углов  $\theta$  и  $\varphi$  от 0 до максимального поперечного размера расчётной области  $L$ .



# Заключение



Результаты моделирования зависят от

- временной и пространственной форм энерговыведения;
  - используемых уравнений состояния;
  - отношения плотностей на контактной границе;
  - скорости нагружения.
- 
- Программа Фокус корректно описывает развитие гидродинамических неустойчивостей.

Продолжение работ

1. Согласование с результатами эксперимента УРС, модели поглощения, параметров ЛИ - сейчас параксиальное нагружение, необходим учет самофокусировки, распределение энергии в пятне ЛИ
2. Учёт быстрых электронов в предпрогреве мишени, влияние их на развитие неустойчивостей

# Перспективы исследований развития неустойчивостей на лазерных установках



- Актуальные проблемы для неустойчивостей РМ, РТ и КГ – взаимодействие мод от шероховатостей изготовления оболочек (600 гармоника – мелкомасштабное возмущение) с неоднородностью облучения (40-60 гармоника – крупномасштабное)
- Влияние нелокальных эффектов –лазер-плазменного взаимодействия, генерация надтепловых электронов, спонтанных магнитных полей,...
- Исследуется влияние сжимаемости по сравнению с газовыми пушками, эффект сходящейся геометрии (Белла-Плесета),
- Существенная зависимость от УРС вещества, пробегов излучения – необходима тесная связь расчётов с экспериментальными данными
- Отличие 2D от 3D описания РМ, РТ и КГ инициированной турбулентностью
- Что такое развитая турбулентность?
- Спектры ТКЭ от РТ турбулентности, от РМ турбулентности и от КГ турбулентности
- Что можно описать прямым моделированием турбулентности, а что полуэмпирическими моделями? Получение констант для полуэмпирических моделей.