

Численное моделирование температурных эффектов при воздействии фокусированного ультразвука на мягкие ткани человеческого организма

Беклемышева К.А.,

Васюков А.В.,

Петров И.Б.

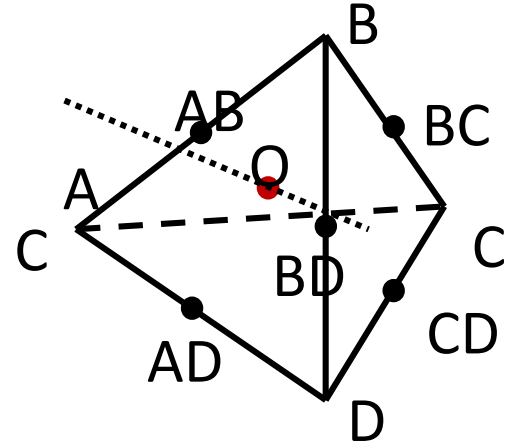
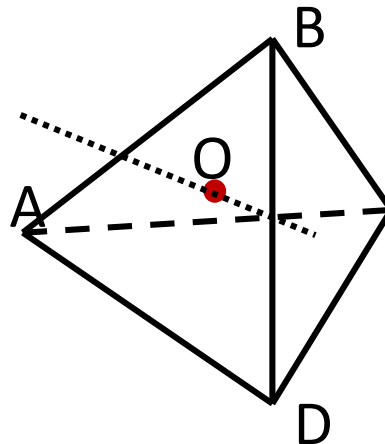
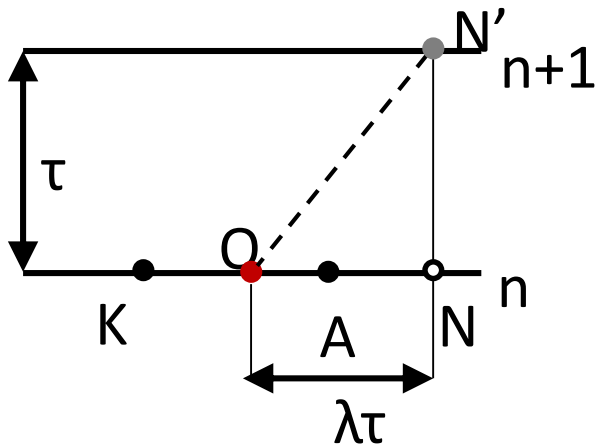
Московский физико-технический институт

High Intensity Focused Ultrasound, HIFU Фокусированный Ультразвук, ФУЗ

- нагрев и кавитация мягких тканей;
 - физиотерапия и неинвазивная хирургия;
 - онкология, артериальная фибрилляция, глаукома, литотрипсия и т.д.;
 - Wood RW, Loomis AL. The physical and biological effects of high frequency sound waves of great intensity. Philos Mag Ser 7 1927;4(22):417–436.
-

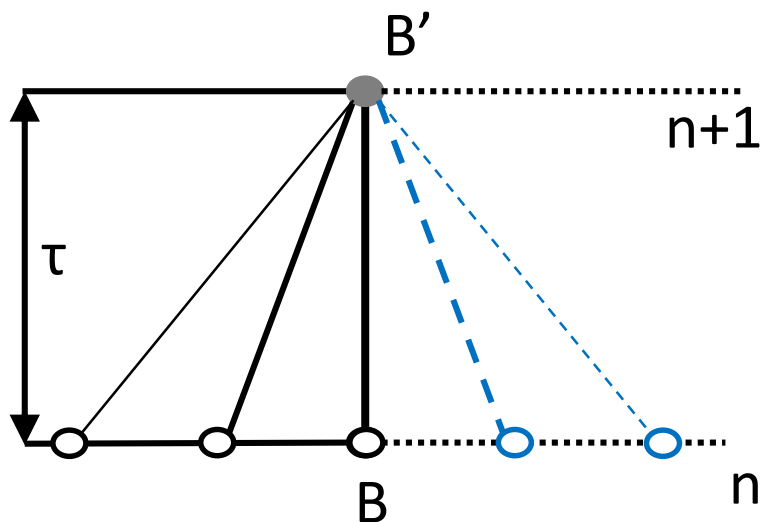
Сеточно-характеристический метод на нерегулярных сетках

- полная система уравнений для вязкоупругого тела решается на каждом шаге по времени в каждом узле сетки;
- не МКЭ;
- расщепление по направлениям и физическим процессам;
- переход к инвариантам Римана и характеристикам;
- интерполяция в тетраэдре на предыдущем временном слое;
- восстановление вектора неизвестных (компонент вектора скорости и тензора напряжений) из набора инвариантов Римана.



Границы и контакты

Граничные условия



- поглощающая граница

- внешняя сила

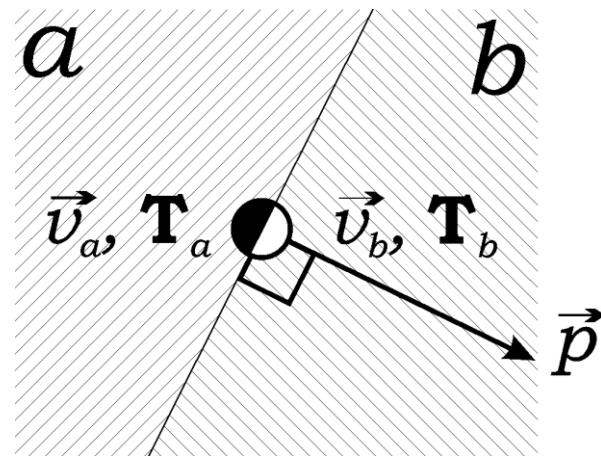
$$\mathbf{T}\vec{p} = \vec{f}$$

- внешняя скорость

$$\vec{v} = \vec{V}$$

- смешанные условия

Условия на контакте



A – настоящий узел

B – виртуальный узел

- полное сцепление

$$\vec{v}_a = \vec{v}_b = \vec{V}, \quad \vec{f}_a = -\vec{f}_b$$

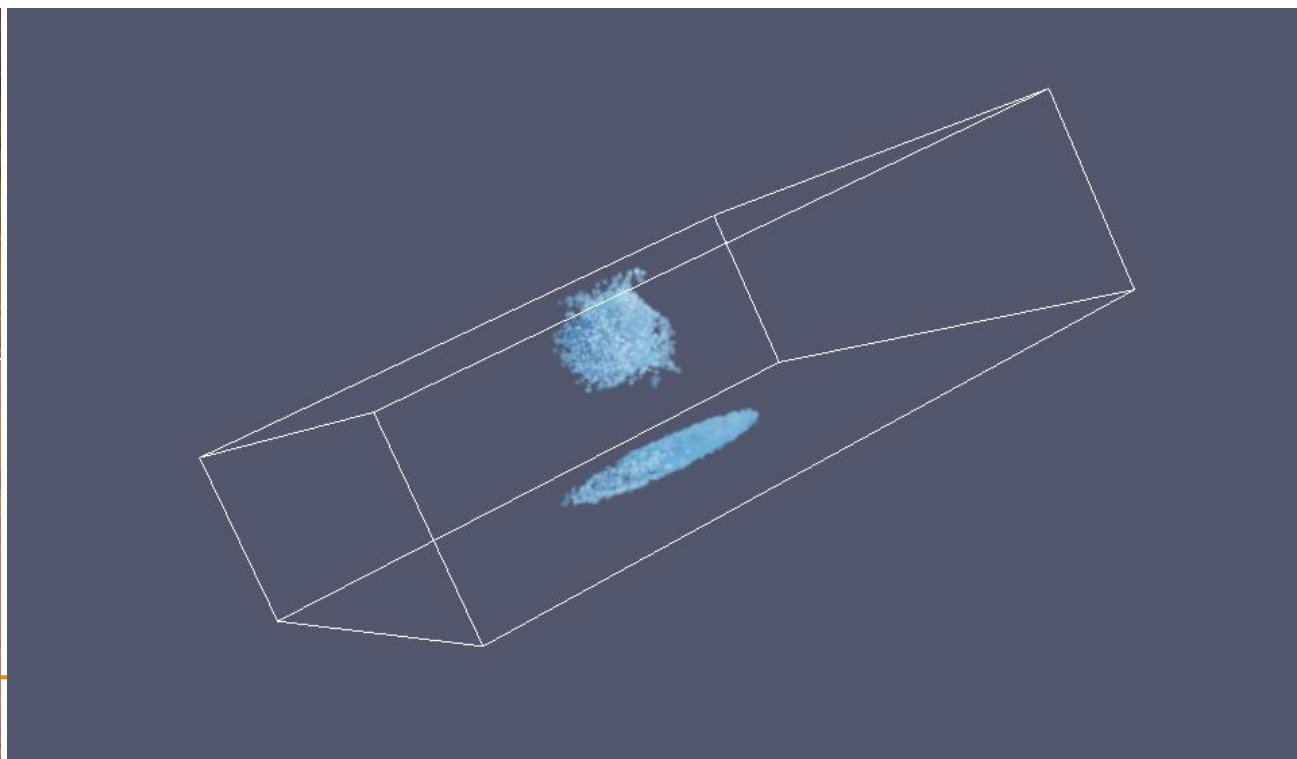
- скольжение

- трение

- разрушимый контакт

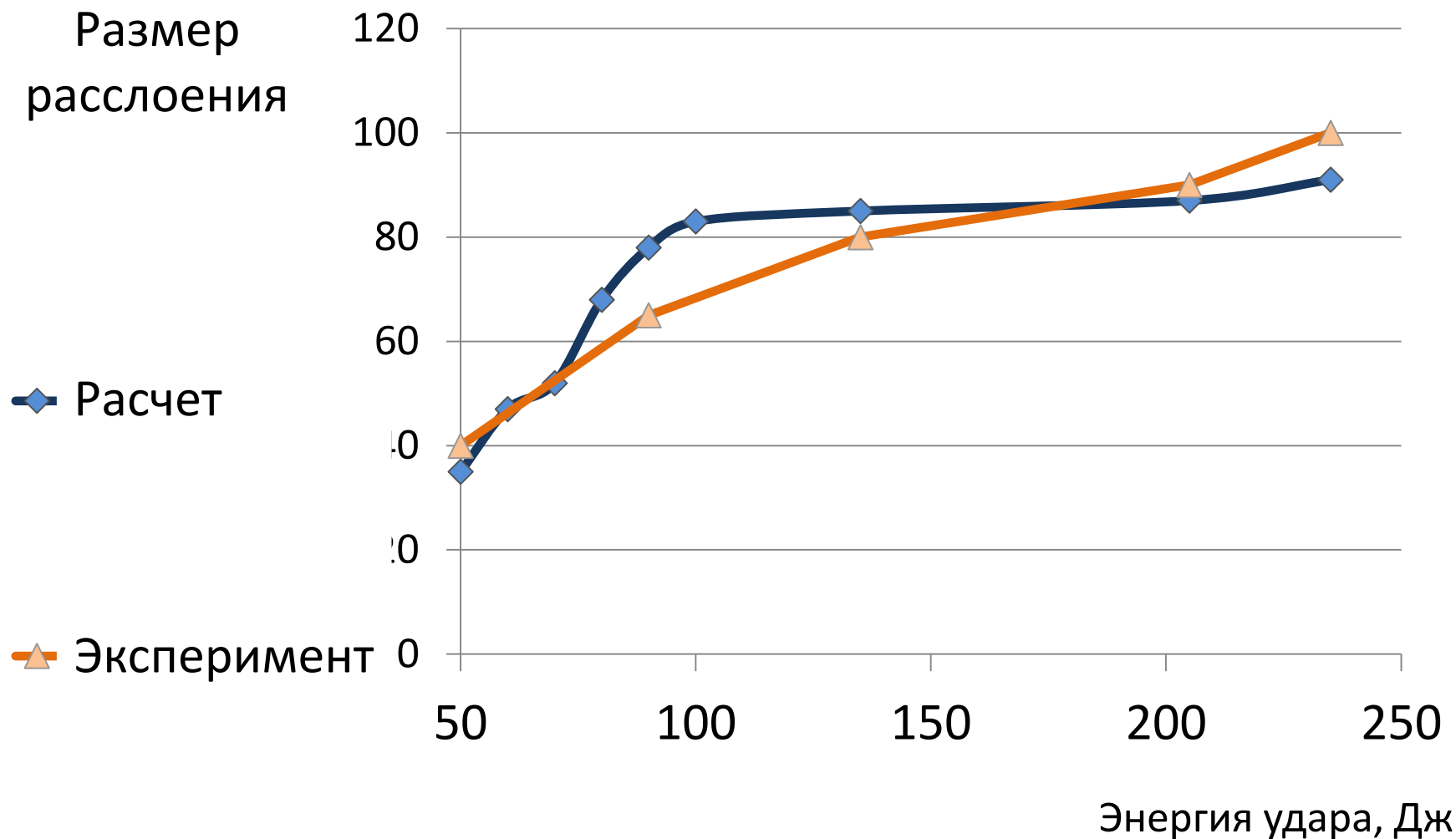
Верификация: короткий лазерный импульс

New method of the polymeric material properties experimental investigation under powerful energy flux impact / B.A. Demidov, V.P. Efremov, Yu.G. Kalinin et al. // Proceedings of XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. – Journal of Physics: Conference Series (JPCS), 2015.



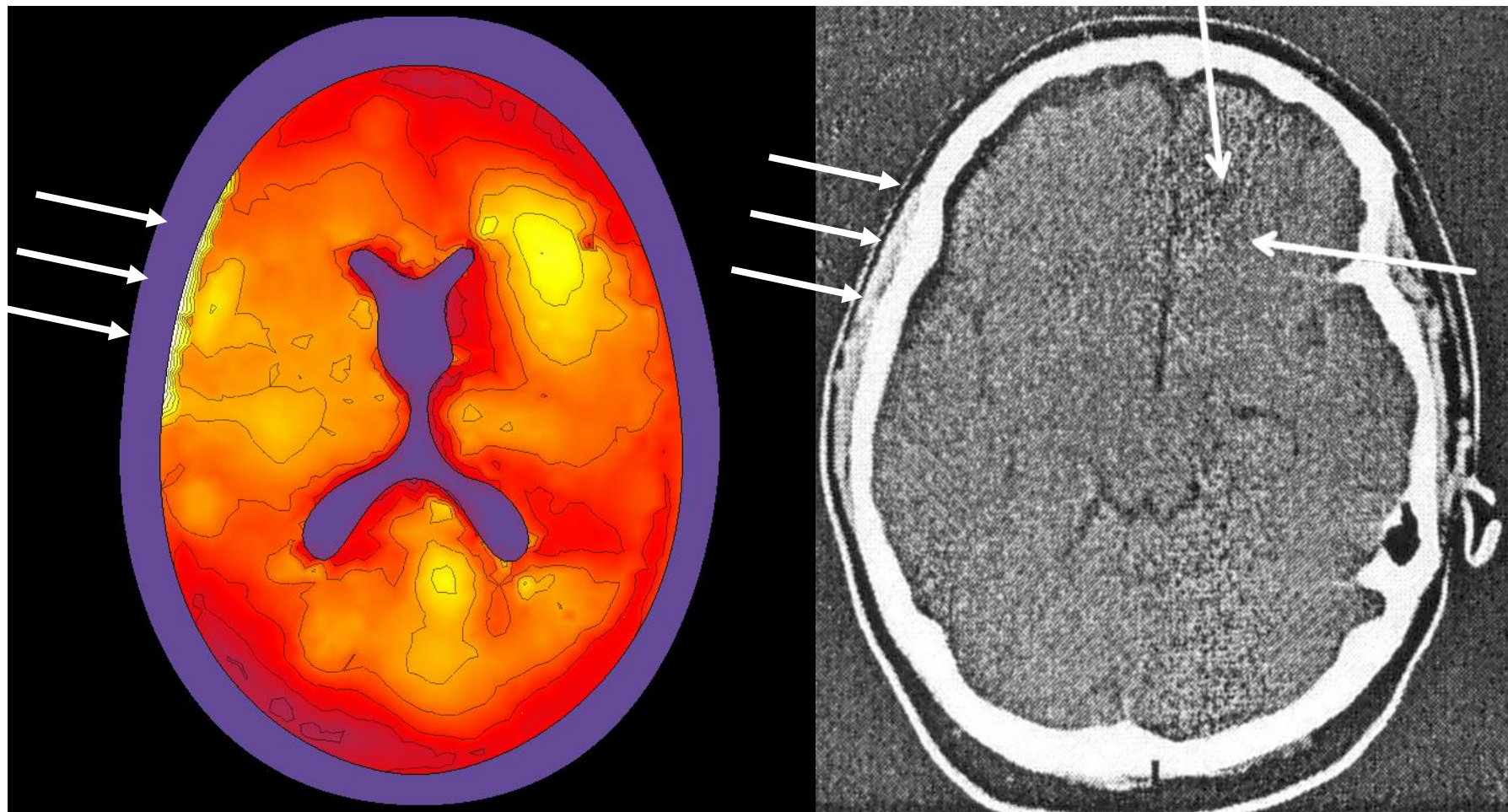
Верификация: авиационный композит

сравнение с экспериментом ЦАГИ



Верификация: черепно-мозговая травма

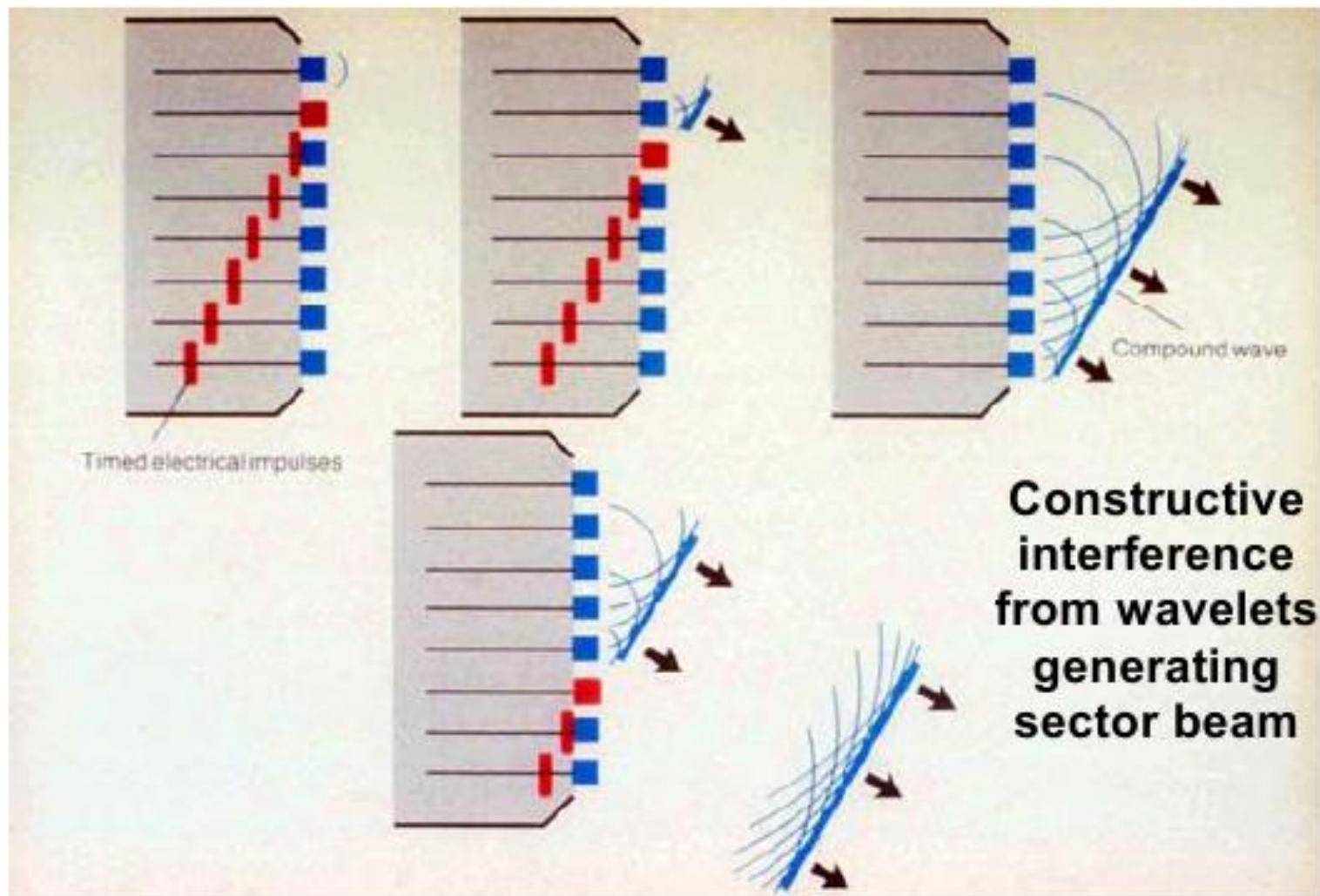
сравнение с клиническими данными



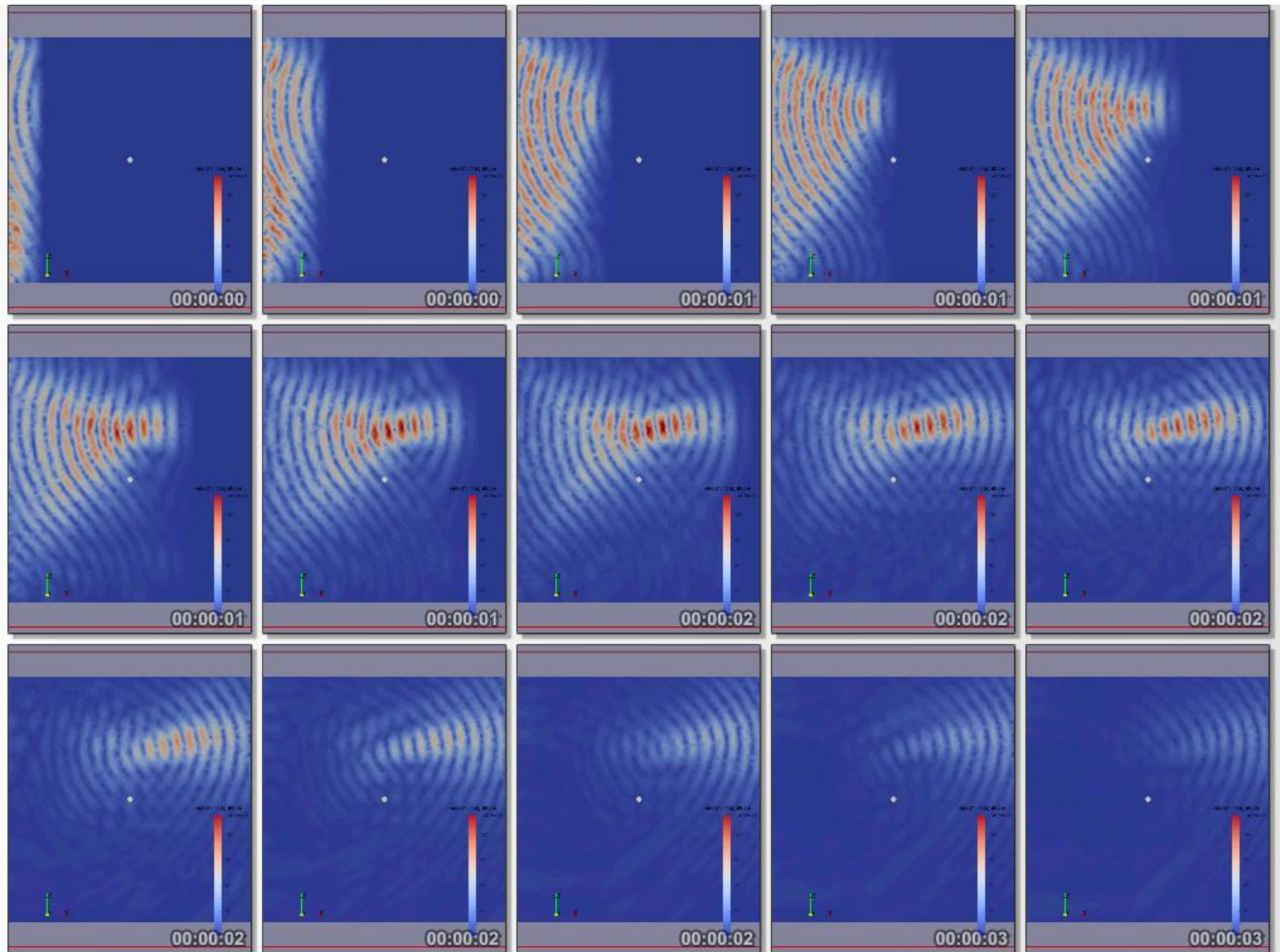
Главный военный клинический госпиталь им.
академика Н.Н. Бурденко.

Фазированная решетка: общий принцип

Each waveform merges to form a compound wave, generating a sector beam.



Фазированная решетка: расчет



Кавитационный ФУЗ

Механическое воздействие на ткани.

+ Быстрое воздействие:

- отсутствие заметного нагрева в точке фокуса и окружающих тканях;
- не требует дорогих и сложных методов неинвазивного контроля температуры;
- отсутствие побочных эффектов, вызванных нагревом;
- сравнительно быстрый период восстановления;
- различное терапевтическое воздействие.

— Сложный процесс, зависящий от многих параметров:

- непредсказуемые побочные эффекты.

Тепловой ФУЗ

Термическое воздействие на ткани.

+ Длительный контролируемый процесс:

- терапевтический эффект за счет нагрева в точке фокуса;
- физиотерапевтическое воздействие при низкой интенсивности.

— Побочные эффекты от нагрева:

- нагрев тканей вокруг точки фокуса;
- сравнительно долгий период восстановления;
- требует неинвазивного контроля температуры.

Система уравнений для вязкоупругой среды

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= c_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{14} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{15} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{16} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{xx}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} &= c_{12} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{23} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{24} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{25} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{26} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{yy}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= c_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{23} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{34} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{35} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{36} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{zz}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} &= c_{14} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{24} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{34} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{44} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{45} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{46} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{yz}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= c_{15} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{25} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{35} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{45} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{55} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{56} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{xz}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} &= c_{16} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{26} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{36} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{46} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{56} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{66} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{xy}}{\tau_0}\end{aligned}$$

Оценка поглощенной энергии

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_x \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + \mathbf{A}_y \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} + \mathbf{A}_z \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} + \vec{f} = 0$$

$$\vec{f} = \{0, 0, 0, -\frac{\sigma_{xx}}{\tau_0}, -\frac{\sigma_{yy}}{\tau_0}, -\frac{\sigma_{zz}}{\tau_0}, -\frac{\sigma_{yz}}{\tau_0}, -\frac{\sigma_{xz}}{\tau_0}, -\frac{\sigma_{xy}}{\tau_0}\}^T$$

$$\vec{u}^{n+1} = F(\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z, \vec{f})\vec{u}^n \longrightarrow \vec{u}^{n+1} = F_r(\vec{f})F_a(\mathbf{A}_a)F_b(\mathbf{A}_b)F_c(\mathbf{A}_c)\vec{u}^n$$

$$\vec{u}^c = F_c(\mathbf{A}_c)\vec{u}^n,$$

$$\vec{u}^{bc} = F_b(\mathbf{A}_b)\vec{u}^c,$$

$$\vec{u}^{abc} = F_a(\mathbf{A}_a)\vec{u}^{bc}.$$

$$\vec{u}^{n+1} = F_r(\vec{f})\vec{u}^{abc}$$

$$\begin{aligned} \delta E = & \frac{(\sigma_{xx}^{abc})^2 - (\sigma_{xx}^{n+1})^2}{2Y} + \frac{(\sigma_{yy}^{abc})^2 - (\sigma_{yy}^{n+1})^2}{2Y} + \frac{(\sigma_{zz}^{abc})^2 - (\sigma_{zz}^{n+1})^2}{2Y} \\ & + \frac{(\sigma_{xy}^{abc})^2 - (\sigma_{xy}^{n+1})^2}{2\mu} + \frac{(\sigma_{xz}^{abc})^2 - (\sigma_{xz}^{n+1})^2}{2\mu} + \frac{(\sigma_{yz}^{abc})^2 - (\sigma_{yz}^{n+1})^2}{2\mu} \end{aligned}$$

Постановка задачи

10x10x15 мм

Линейная фазовая решетка из 24 элементов.

Ось Z – вдоль наибольшего измерения расчетной области,
элементы фазовой решетки параллельны оси X

Фокусное расстояние 10 мм.

Максимальная амплитуда сигнала 800 Па.

$$\lambda = 12.0 MPa$$

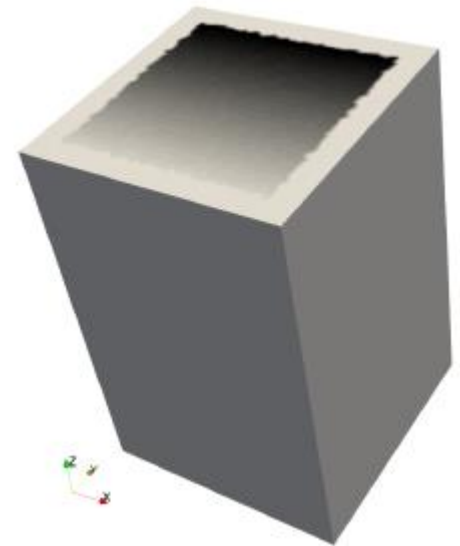
$$\mu = 5.0 MPa$$

$$\rho = 0.45 g/mm^3$$

$$\tau_0 = 1.0 s$$

$$\sigma_{zz}^{border} = P \cdot e^{-(t-t_0)^2/2t_{pulse}^2} \cdot \cos(\omega(t-t_0)), t > t_0$$

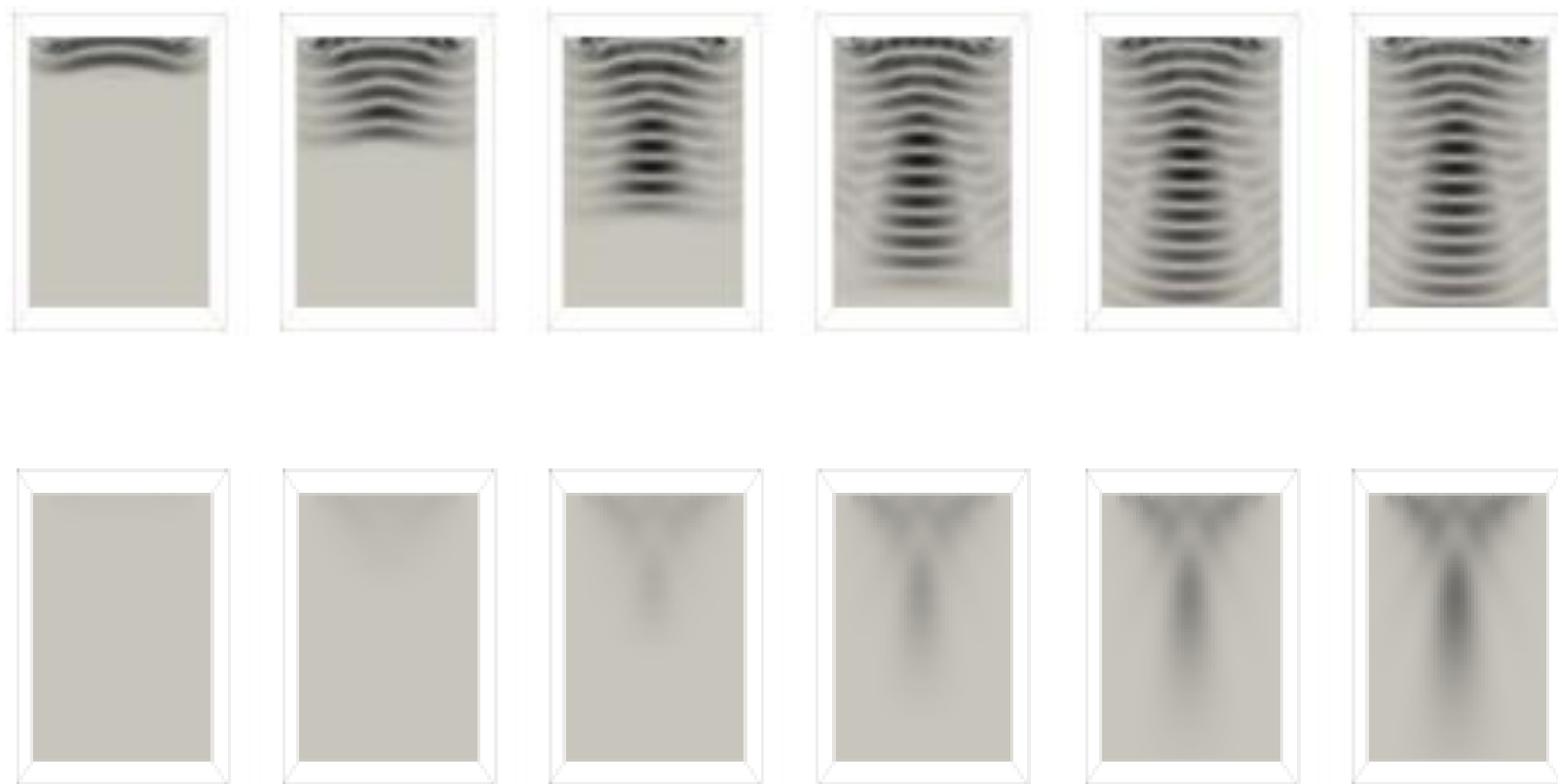
$$\sigma_{zz}^{border} = 0, t < t_0,$$



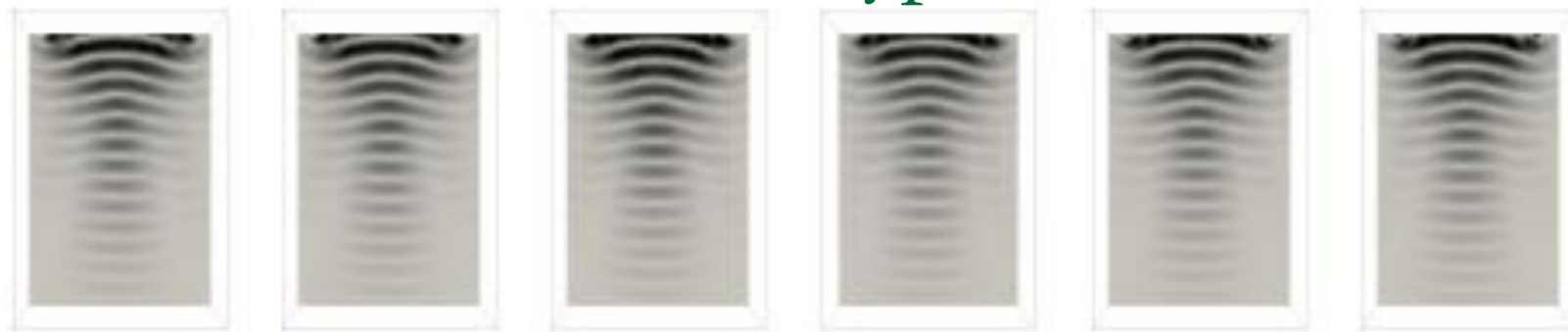
Результаты расчетов: $\tau = 1.0$ с, YZ, 0.65-3.65 с



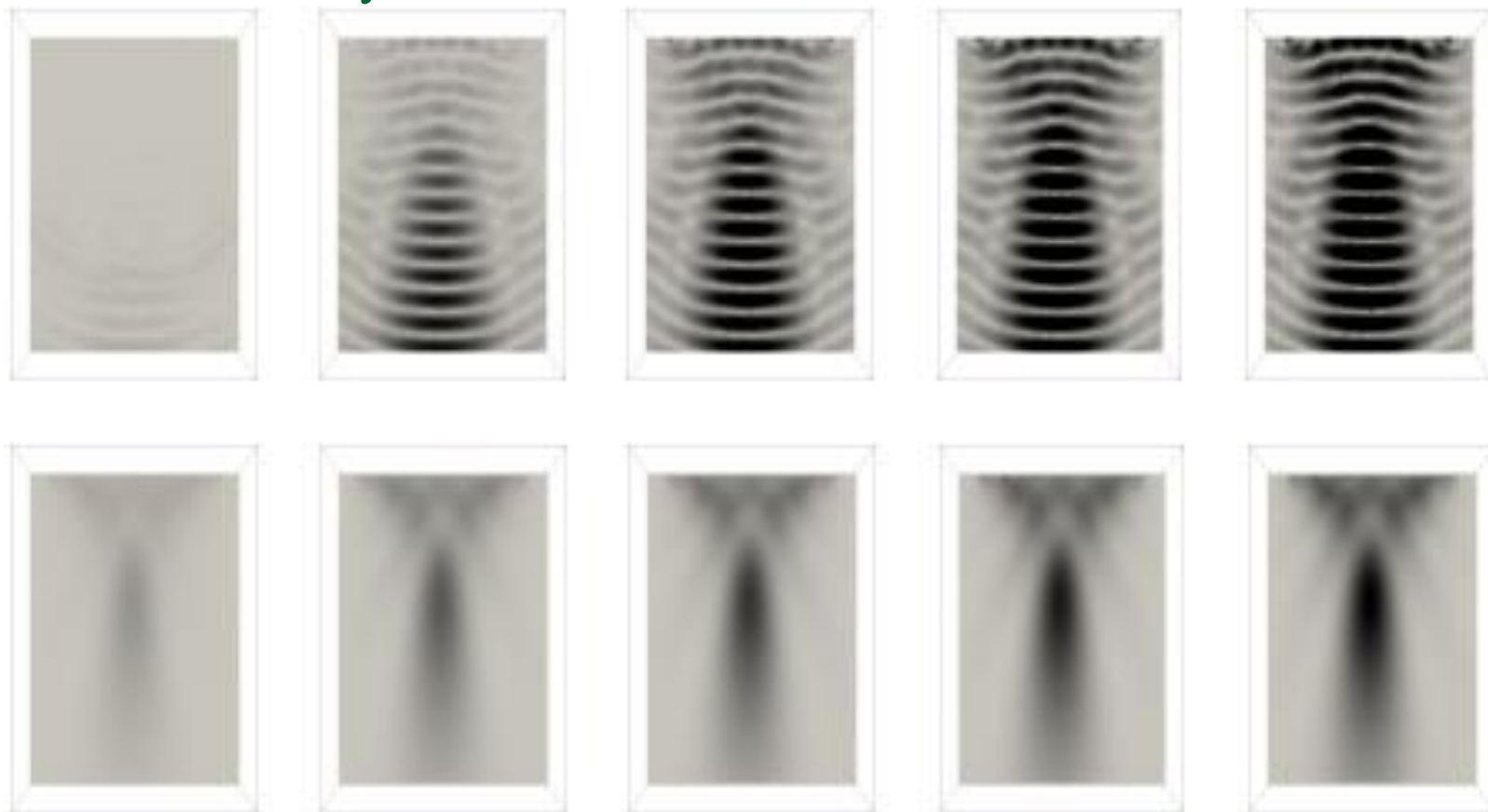
Результаты расчетов: $\tau = 5.0$ с, YZ, 0.65-3.65 с



Результаты расчетов: шаг по времени 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 от курантовского



Результаты расчетов: $\tau = 5.0$ с,
длина импульса 0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5 с



Результаты расчетов: частота

10, 12.5, 15, 17.5, 20, 30, 40, 50, 60, 70 с^{-1}

$\tau = 1.0 \text{ с}$



$\tau = 3.0 \text{ с}$



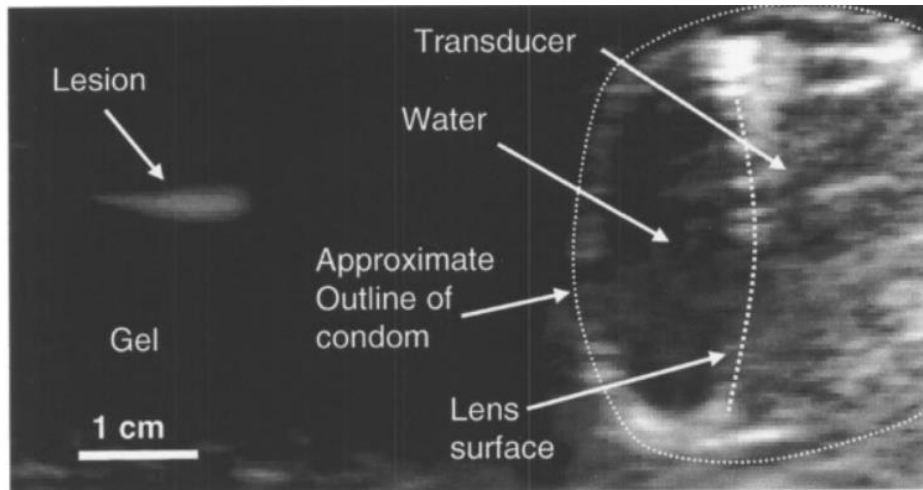
$\tau = 5.0 \text{ с}$



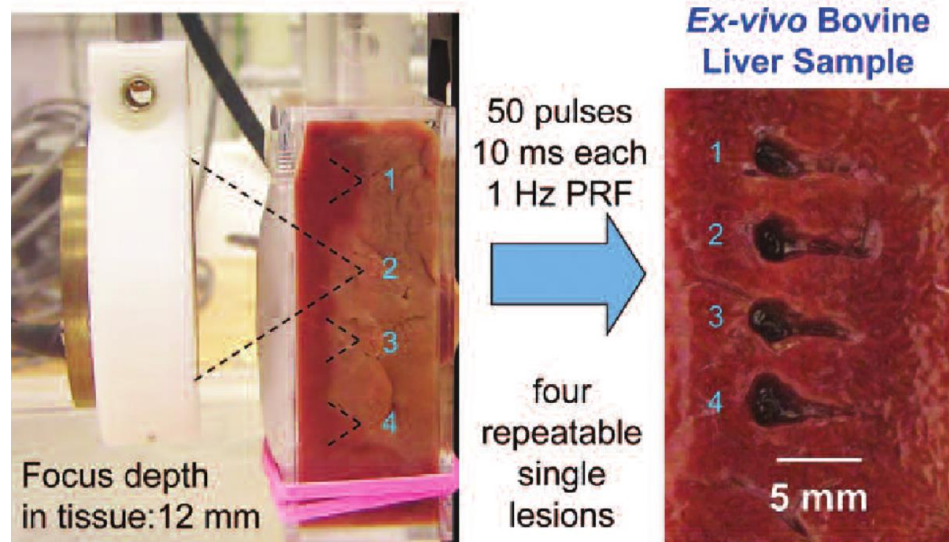
$\tau = 10.0 \text{ с}$



Клинические данные



Arthur H. Chan, Victor Y. Fujimoto, Donald E. Moore, Roy W. Martin, and Shahram Vaezy. An image-guided high intensity focused ultrasound device for uterine fibroids treatment // *Medical Physics* 29, 2611 (2002); doi: 10.1118/1.1513990



Disintegration of tissue using high intensity focused ultrasound: Two approaches that utilize shock waves / A. Maxwell, O. Sapozhnikov, M. Bailey et al. // *Acoustics today*. — 2012. — Vol. 8, no. 4. — P. 24–36.

Заключение

- Программный комплекс на основе сеточно-характеристического метода был модифицирован для проведения достаточно длительных расчетов на нерегулярных тетраэдральных сетках без потерь механической энергии или устойчивости.
- Разработана методика оценки тепловой энергии, поглощенной мягкими тканями при длительном воздействии ультразвукового импульса.
- Проведены серийные расчеты для задачи о длительном воздействии фокусированного ультразвука высокой интенсивности (High-Intensity Focused Ultrasound, HIFU) на биологические ткани.

Благодарю за внимание!

amisto@yandex.ru