

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СНАРЯДОВ И АВИАДВИГАТЕЛЯ С БЕТОННЫМИ ЗАЩИТНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

---

**Батуев С.П.,**  
Радченко А.В.,  
Радченко П.А.

---

Система уравнений, описывающих нестационарные адиабатные движения сжимаемой среды в произвольной системе координат, включает следующие уравнения:

– неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla_i v^i = 0;$$

– движения

$$\rho a^k = \nabla_i \sigma^{ik} + F^k;$$

– энергии

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma^{ij} e_{ij},$$

где

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i).$$

$$\sigma^{ij} = -Pg^{ij} + S^{ij}$$

$$P = \sum_{n=1}^3 K_n \left( \frac{V}{V_0} - 1 \right)^n + K_0 \rho E$$

$$2G \left( g^{im} g^{jk} e_{mk} - \frac{1}{3} g^{mk} e_{mk} g^{ij} \right) = \frac{DS^{ij}}{Dt} + \lambda S^{ij}, \quad (\lambda \geq 0)$$

$$\frac{DS^{ij}}{Dt} = \frac{dS^{ij}}{dt} - g^{im} \omega_{mk} S^{kj} - g^{jm} \omega_{mk} S^{ik}$$

Параметр  $\lambda$  определяется с помощью условия Мизеса:  $S^{ij} S_{ij} \leq \frac{2}{3} \sigma_d^2$

Критерий разрушения:  $e_u < \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}$ ,

где  $T_1, T_2$  – первый и второй инварианты тензора деформаций,  $e_u = 1$

$$\sigma^{ij} = -Pg^{ij} + S^{ij}$$

$$P = K \left( \frac{V_0}{V} - 1 \right)$$

$$\sigma_d = 7.7 + \frac{11.398P}{13.9 + 0.82P},$$

$$2G \left( g^{im} g^{jk} e_{mk} - \frac{1}{3} g^{mk} e_{mk} g^{ij} \right) = \frac{DS^{ij}}{Dt} + \lambda S^{ij}, \quad (\lambda \geq 0)$$

$$\frac{DS^{ij}}{Dt} = \frac{dS^{ij}}{dt} - g^{im} \omega_{mk} S^{kj} - g^{jm} \omega_{mk} S^{ik}$$

Параметр  $\lambda$  определяется с помощью условия Мизеса:  $S^{ij} S_{ij} \leq \frac{2}{3} \sigma_d^2$

$$C_1(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + C_2(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + C_3(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \\ + C_4\sigma_{11} + C_5\sigma_{22} + C_6\sigma_{33} + C_7\sigma_{12}^2 + C_8\sigma_{23}^2 + C_9\sigma_{31}^2 \geq 1$$

Если критерий выполняется при сжатии: считается, что материал теряет свойства анизотропии и для описания такой среды используется гидродинамическая модель, при которой материал сопротивляется объемному сжатию и не сопротивляется сдвигу и растяжению.

Если критерий выполняется при растяжении: материал считается полностью разрушенным, и компоненты тензора напряжений полагаются равными нулю.

$$C_1 = [(Y_t Y_c)^{-1} + (Z_t Z_c)^{-1} - (X_t X_c)^{-1}] / 2;$$

$$C_2 = [(X_t X_c)^{-1} + (Z_t Z_c)^{-1} - (Y_t Y_c)^{-1}] / 2;$$

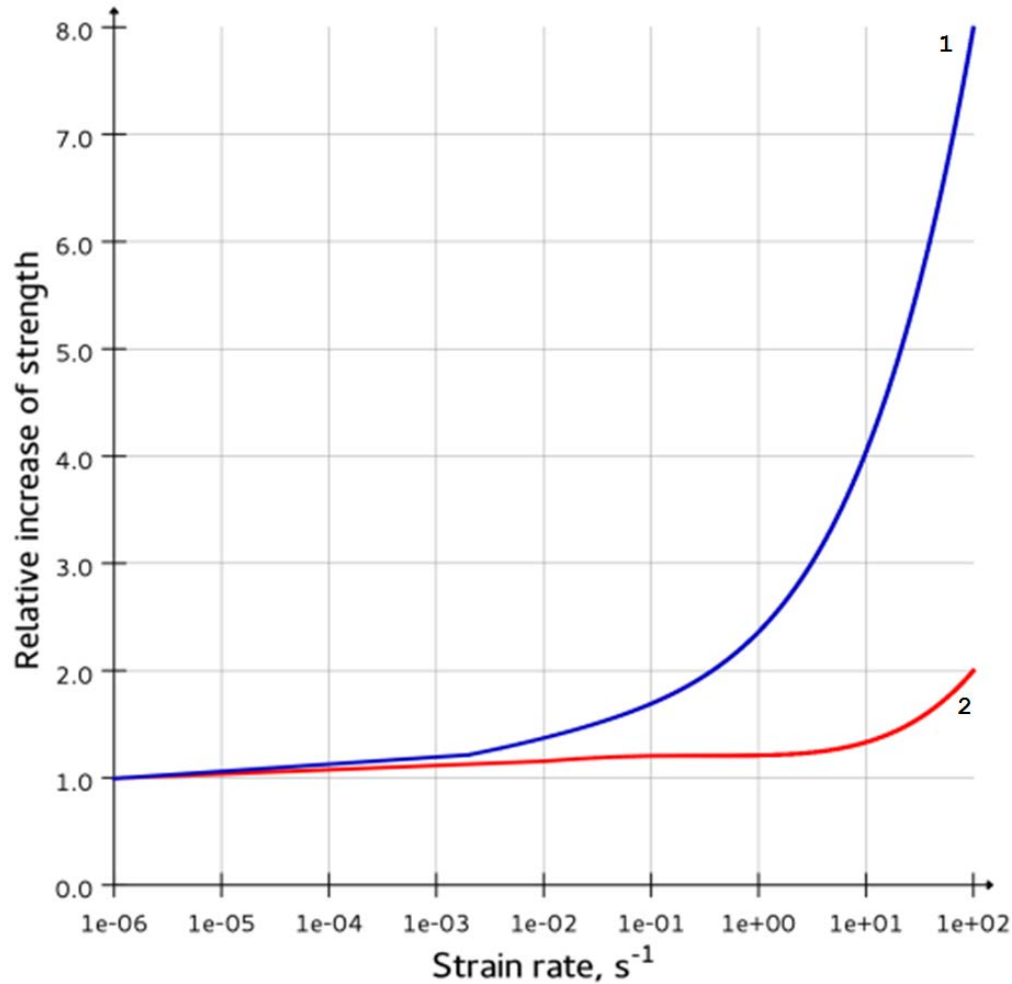
$$C_3 = [(X_t X_c)^{-1} + (Y_t Y_c)^{-1} - (Z_t Z_c)^{-1}] / 2;$$

$$C_4 = (X_t^{-1} - X_c^{-1}); \quad C_7 = S_{yz}^{-2};$$

$$C_5 = (Y_t^{-1} - Y_c^{-1}); \quad C_8 = S_{zx}^{-2};$$

$$C_6 = (Z_t^{-1} - Z_c^{-1}); \quad C_9 = S_{xy}^{-2}.$$

# МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ БЕТОНА



$$K_d = R_d / R_s$$

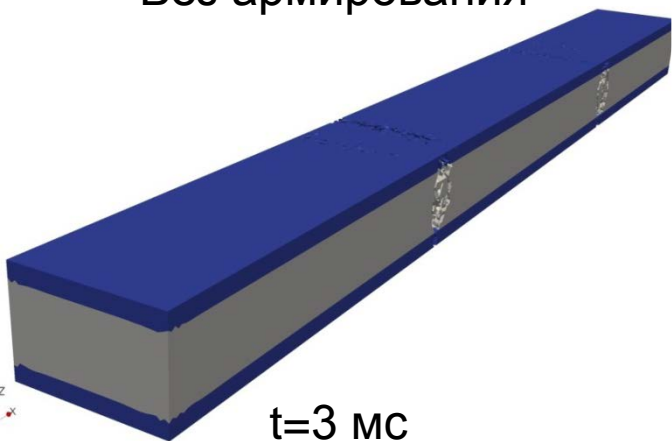
$$R_s = 0.55\sqrt{R_c R_t}$$

$$K_{dt} = 0.00158333e^5 + 0.0252855e^4 + 0.15255e^3 + 0.47898e^2 + 1.01959e + 2.36037.$$

$$K_{dc} = 0.000832308e^5 + 0.0110547e^4 + 0.0447734e^3 + 0.0475887e^2 + 0.0184316e + 1.20895.$$

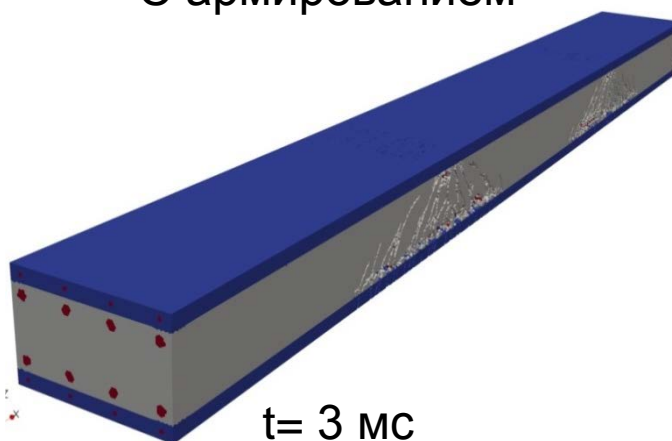
# Разрушение балок из бетона и фибробетона

Без армирования

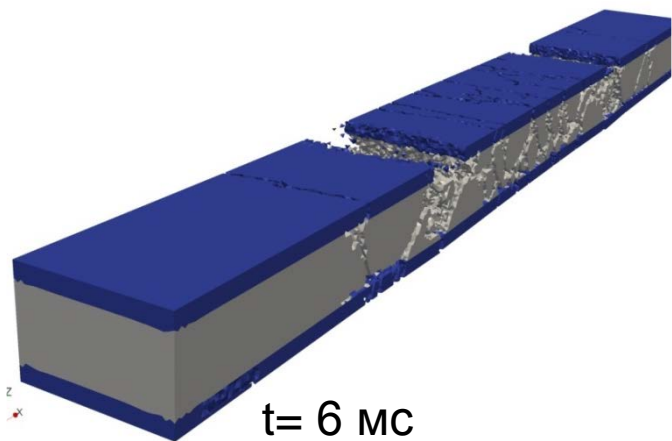


$t=3$  мс

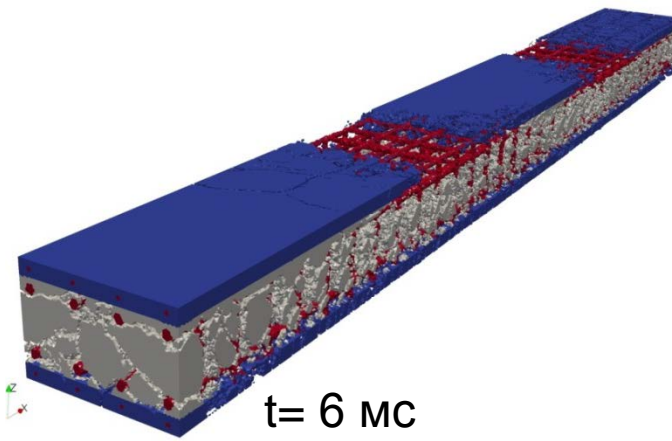
С армированием



$t=3$  мс

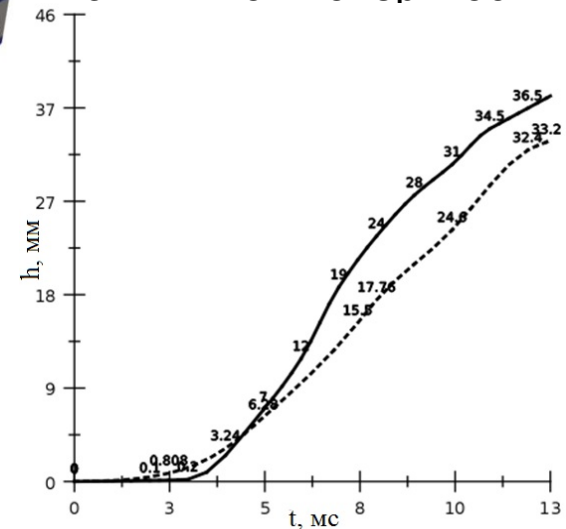


$t=6$  мс

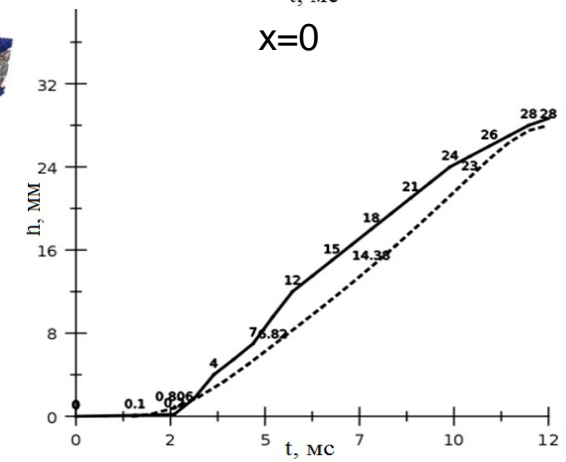


$t=6$  мс

Перемещение точки  
на тыльной поверхности



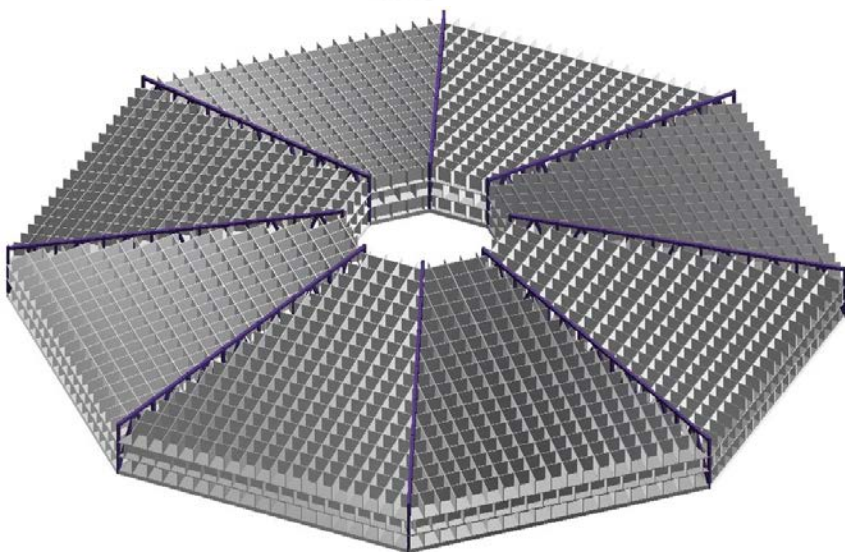
$x=0$



$x=0,33$  м



Внешний вид оболочки



Внутренняя сотовая конструкция



# Численное исследование оболочки АС

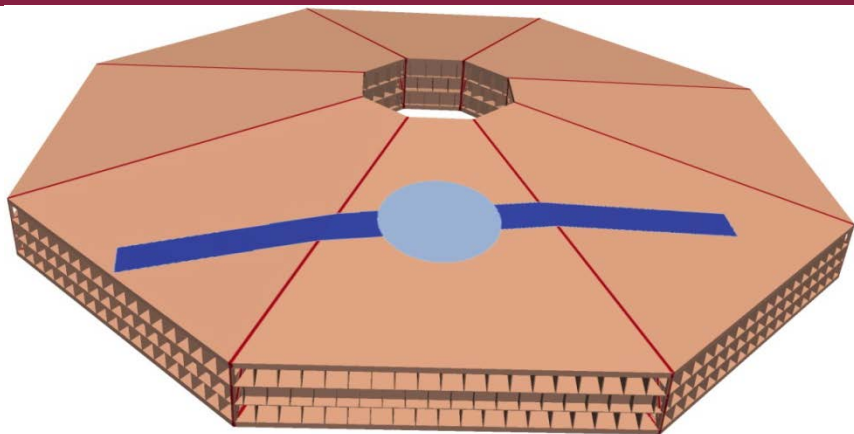
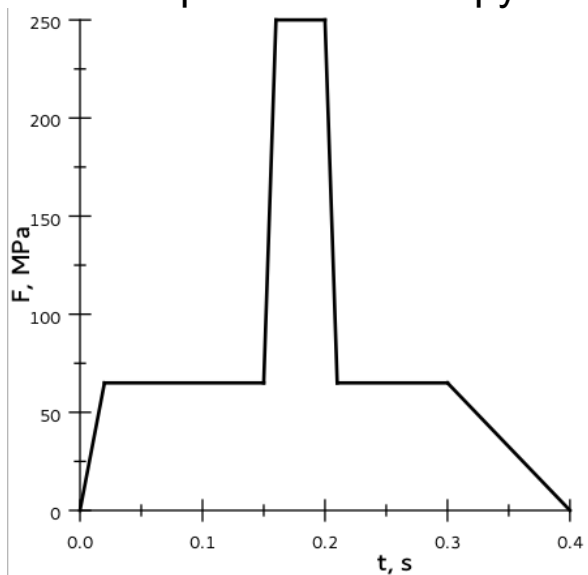
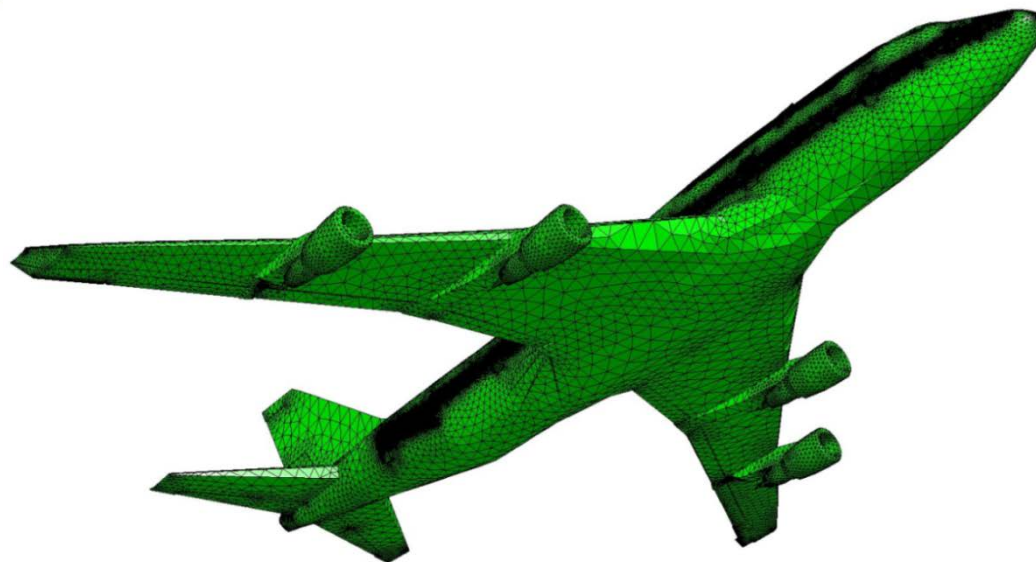


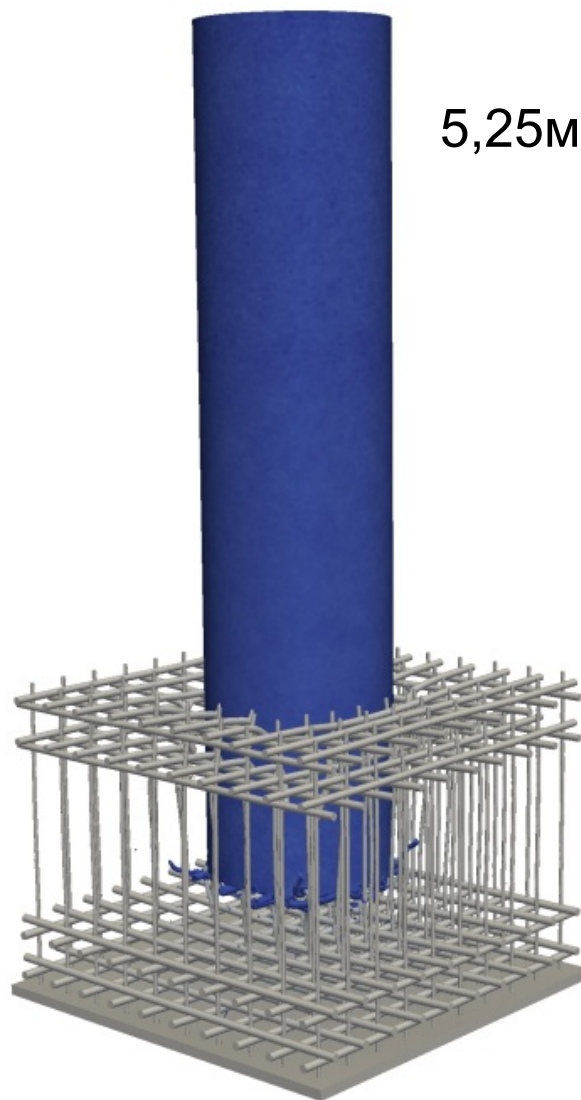
Схема приложения нагрузки



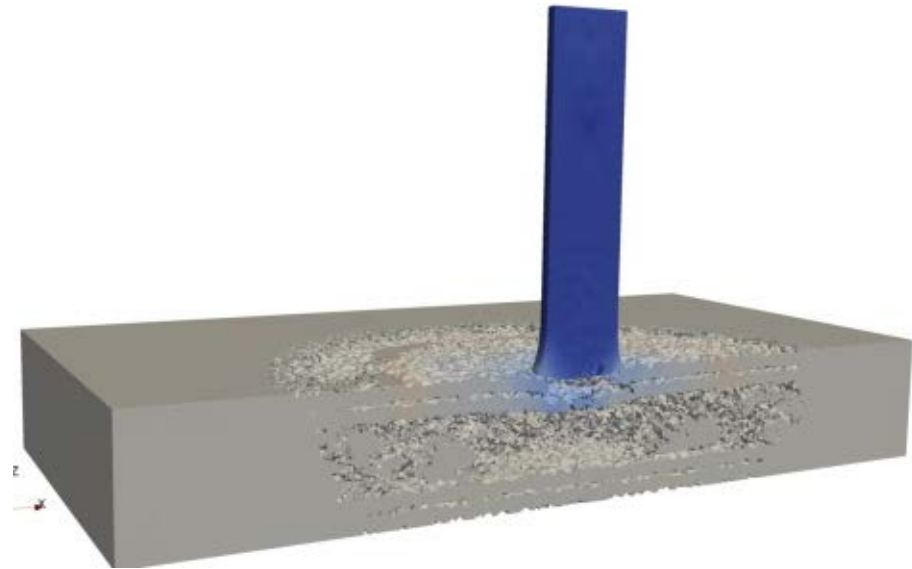
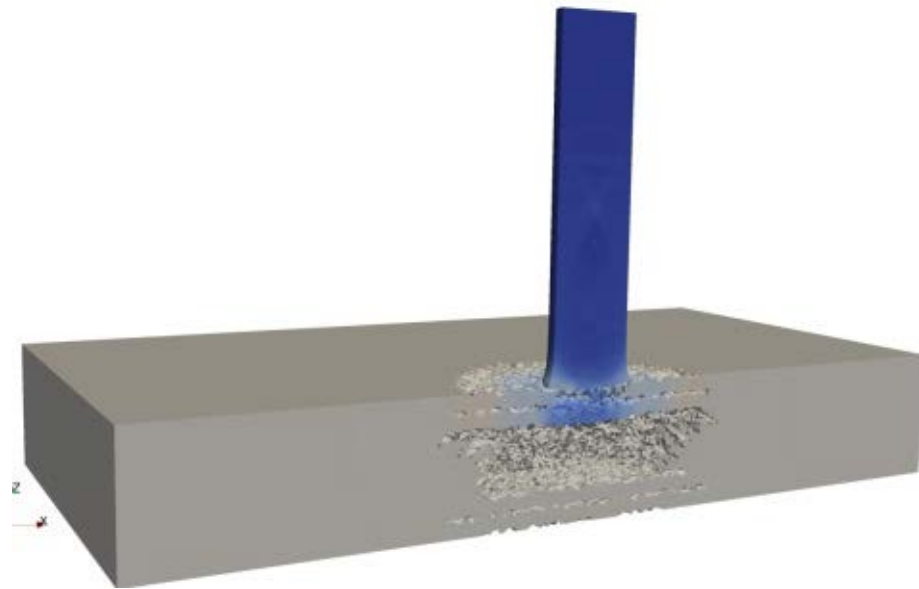
Зависимость нагружения от времени



# Внедрение модели авиадвигателя

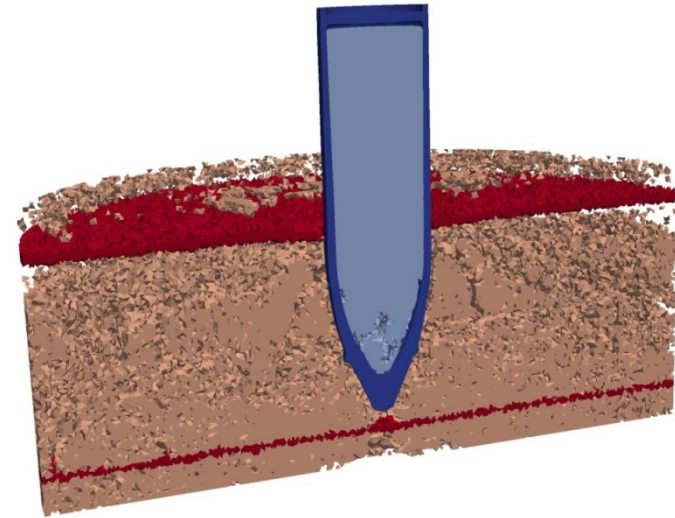
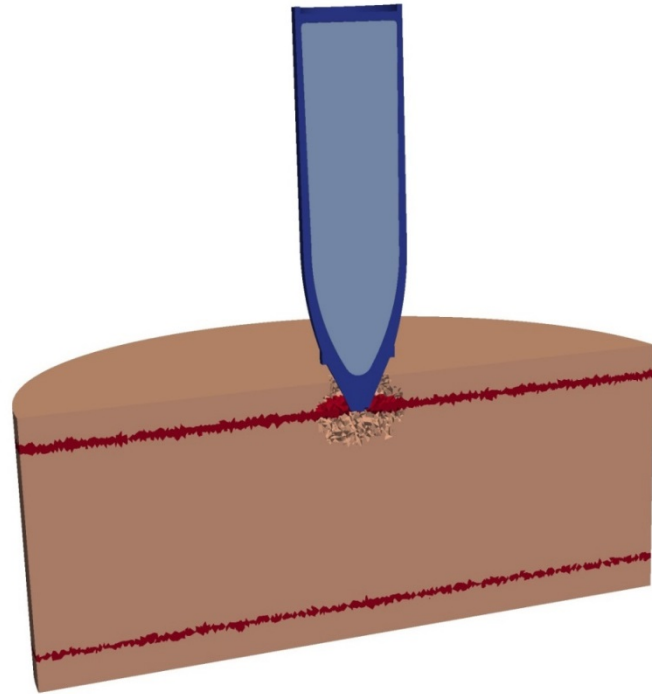


# Внедрение модели авиадвигателя



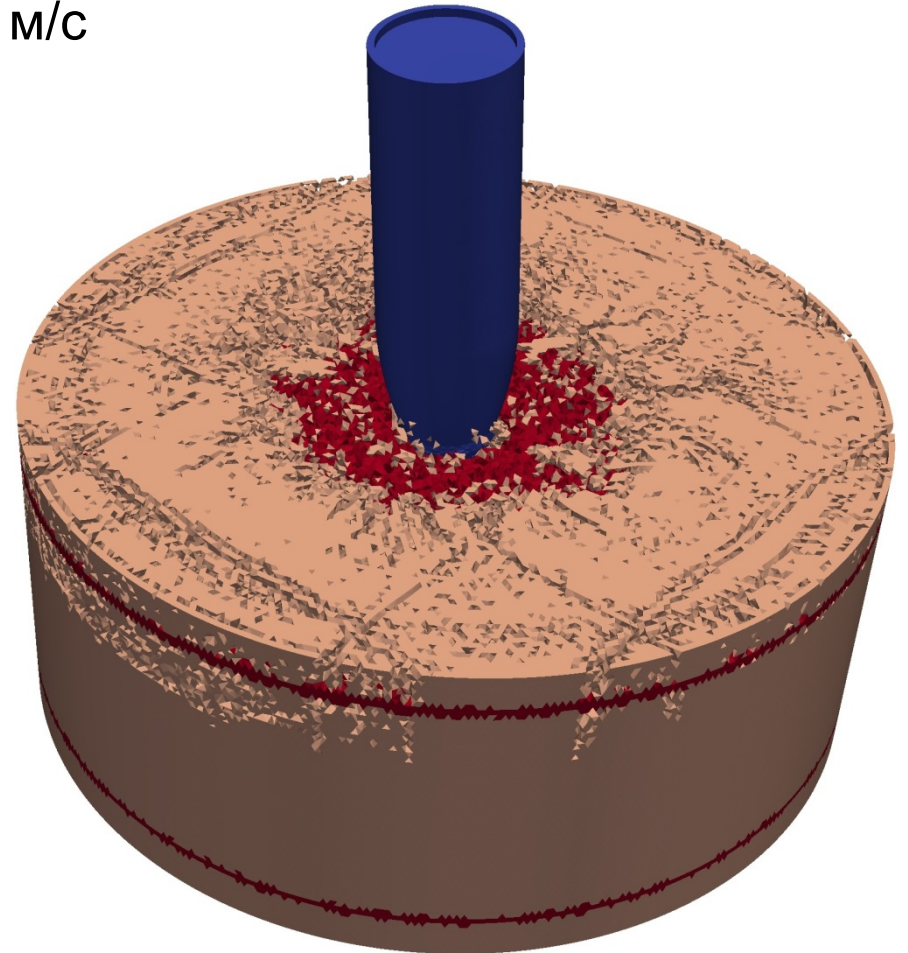
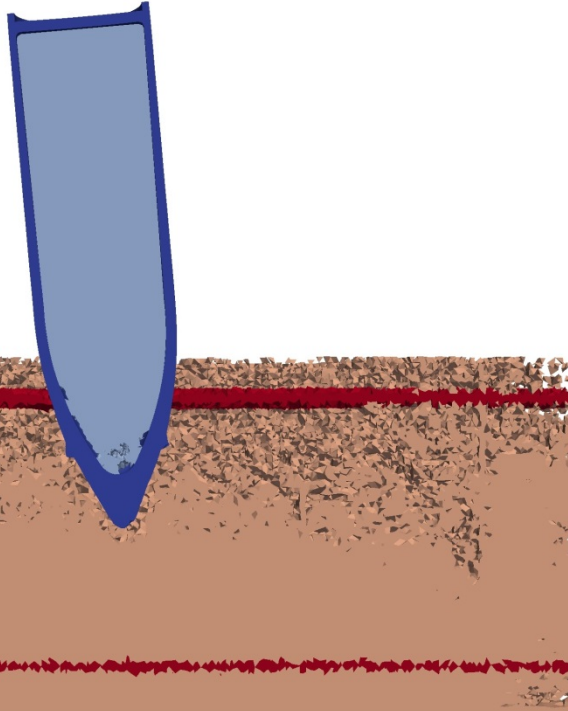
# Внедрение снаряда

300 м/с



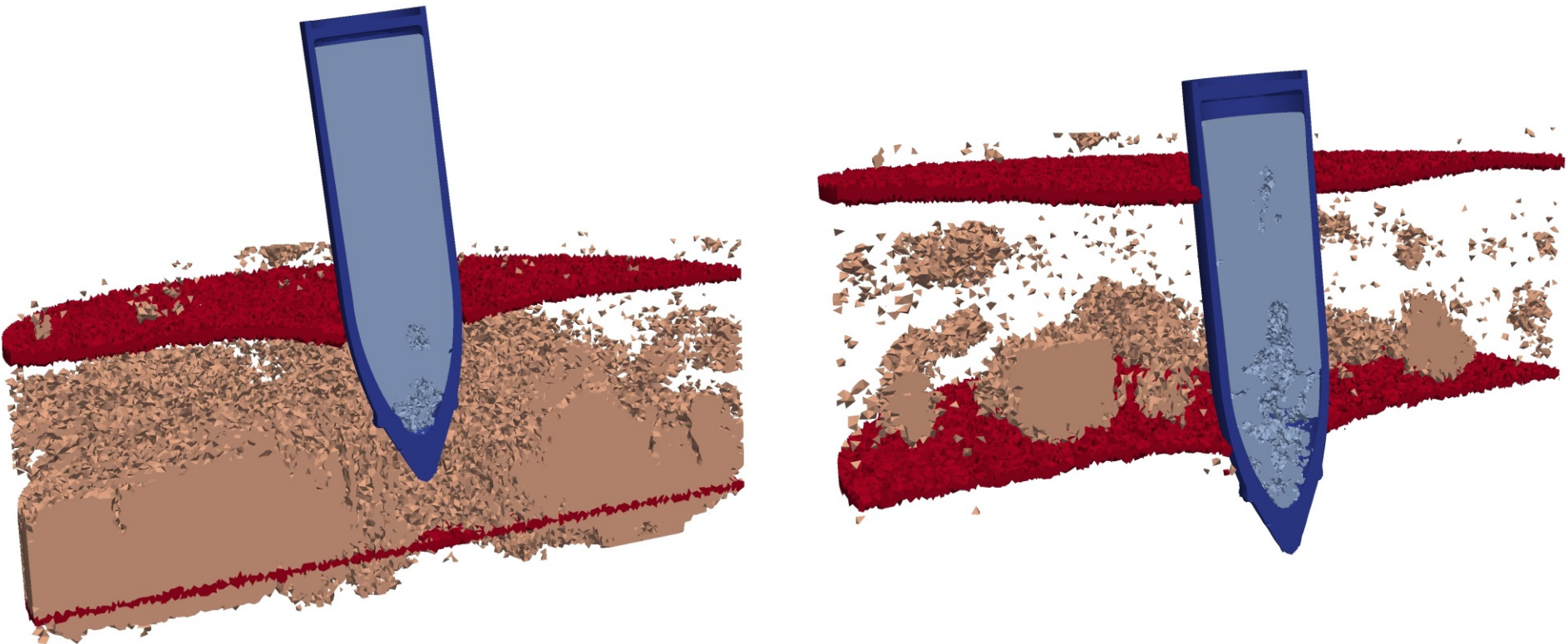
# Внедрение снаряда

300 м/с



# Внедрение снаряда

300 м/с





Спасибо за внимание!

---