

***О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТКОЛЬНОЙ
ПРОЧНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОНТАКТНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ***

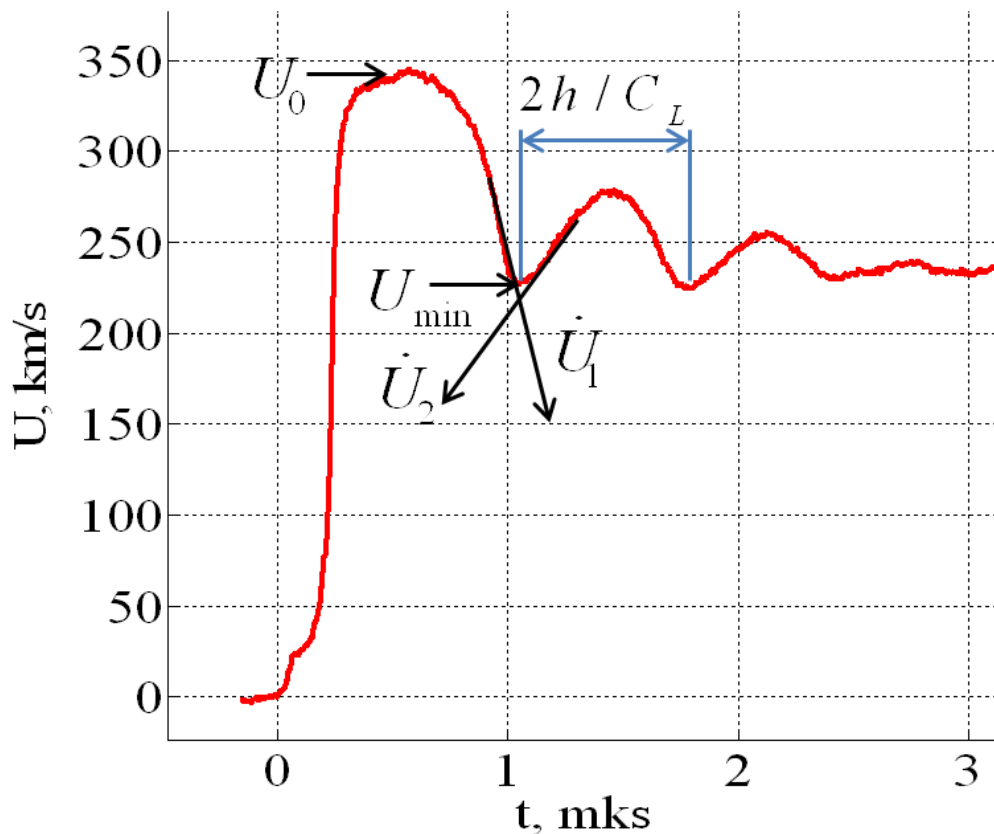
А.В.Красильников, В.Н.Ногин



22 марта 2017



Оценка откольной прочности*



$$\sigma_{отк} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{\min} + \delta U), \quad (1)$$

$$\delta U = \left(\frac{h}{C_0} - \frac{h}{C_L} \right) \frac{|\dot{U}_1| \cdot \dot{U}_2}{|\dot{U}_1| + \dot{U}_2}$$

$$\delta \sigma = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 \delta U \quad (2)$$

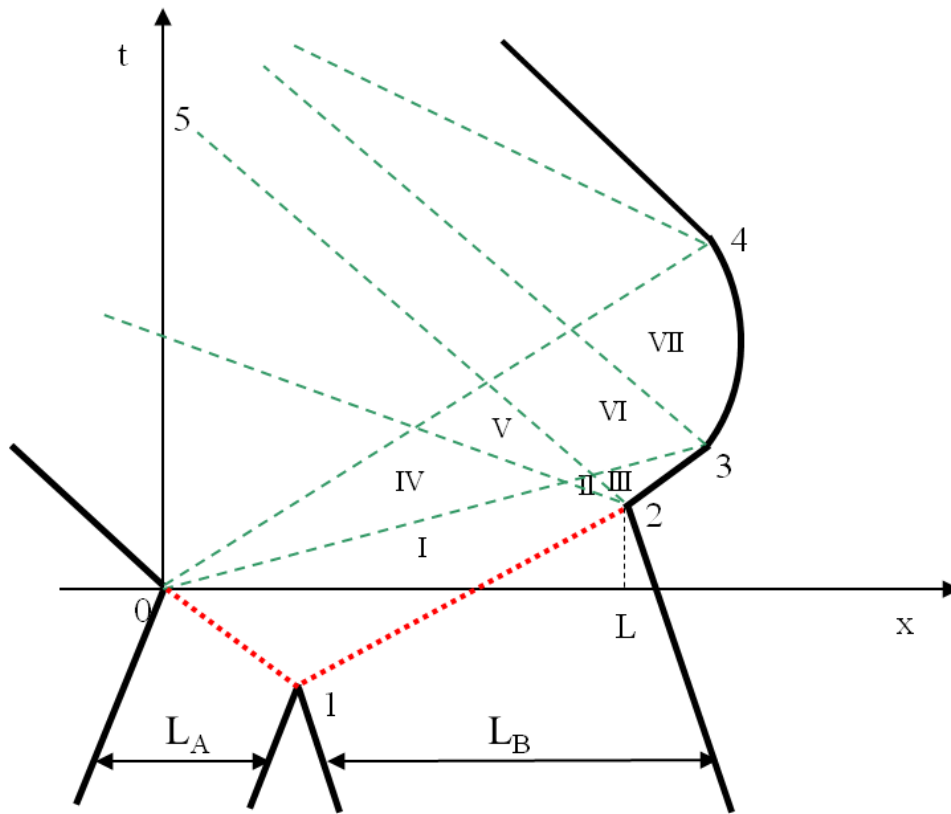
$$C_L = C_0 \quad \longrightarrow \quad \delta U = 0 \quad \longrightarrow \quad \sigma_{отк} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{\min}) \quad (3)$$

Цель доклада – оценка точности этих соотношений.



[*] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах, «Янус-К», (1996).

Задача о столкновении пластин*



$$P = (\gamma - 1) \rho E + C_0^2 (\rho - \rho_0), \quad \gamma = 3$$

$$P = (P_1 + P_0) \left(\frac{C}{C_1} \right)^3 - P_0$$

$$C_1 = \left(3 \frac{P_1 + P_0}{\rho_1} \right)^{1/2}$$

$$P_0 = \frac{\rho_0 C_0^2}{3}$$

Граничные условия:

$$P = 0 \implies C_2 = C_1 \left(\frac{P_0}{P_1 + P_0} \right)^{1/3}$$

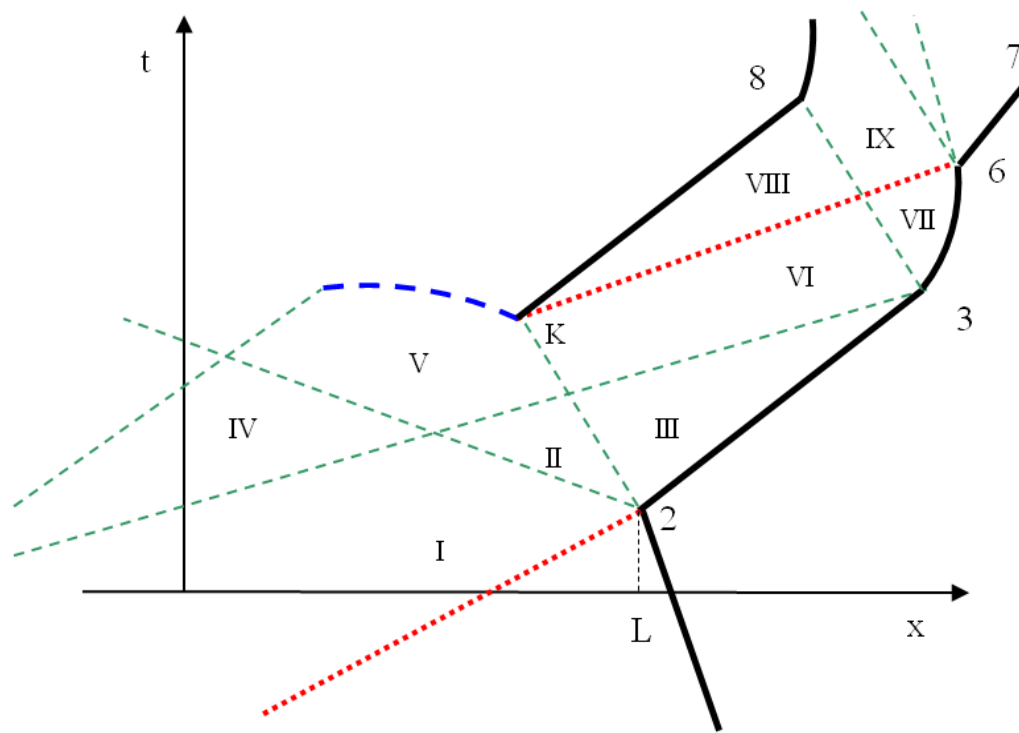
Красный пунктир – ударные волны, зеленый пунктир – характеристики, I – область покоя, III – область постоянного течения, II, IV – центрированные волны разрежения, V – область взаимодействия волн разрежения, VI – преломленная центрированная волна разрежения, VII – область взаимодействия преломленной центрированной волны со свободной границей.

Все характеристики – прямые линии!



[*] Ногин В.Н. О гидродинамическом затухании плоской ударной волны произвольной амплитуды. Труды X Международной конференции “Забабахинские научные чтения”. Снежинск (2010);

Откольное разрушение в задаче



акустическое приближение:

$$u - c = U_0 - C_2 = U_{отк} - C_2$$

$$U_{отк} = C_1 - C_2$$

$$u_{67} = U_0 = C_1 - C_2$$

$$t_2 = \frac{L_B - L_A}{D} \quad t_3 = \frac{L}{C_2} - t_2 \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right)$$

$$u_{23} = U_0 = C_1 - C_2$$

$$\begin{cases} U_n(t) = C_1 - C_2 \left(1 - \ln \frac{t_3}{t} \right) \\ x_n(t) = C_1 t + C_2 t \ln \frac{t_3}{t} \end{cases}$$

При $P = P_k$ откол:

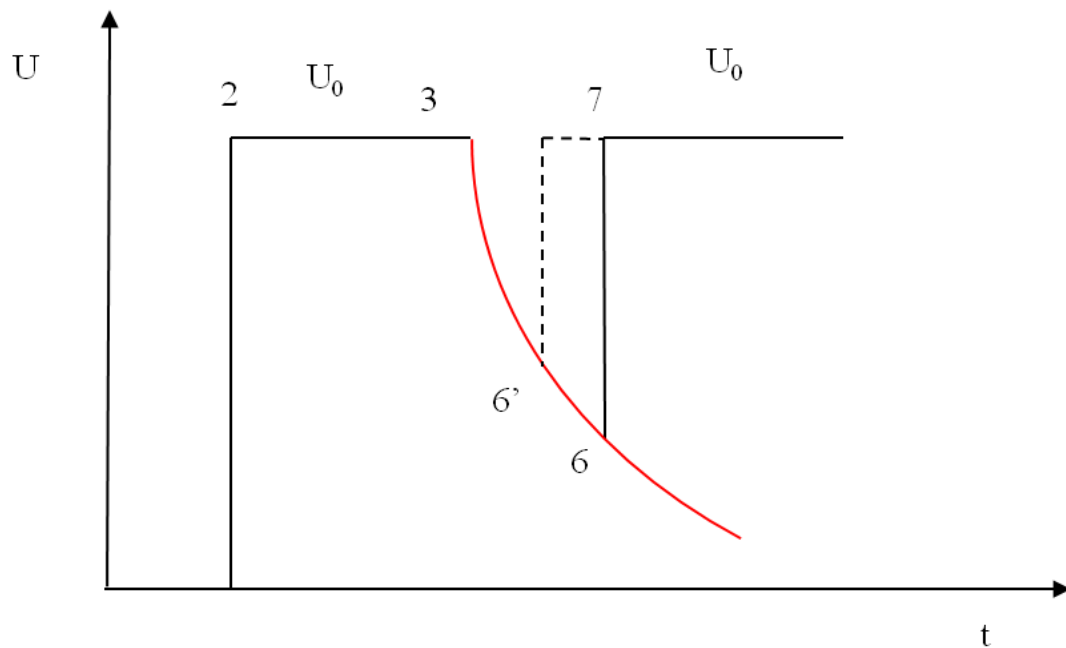
$$P = P_k \longrightarrow C_k = C_1 \left(\frac{P_k + P_0}{P_1 + P_0} \right)^{1/3}$$

с координатами:

$$\begin{cases} t_k = \frac{L + t_2 (2C_2 - C_1)}{2C_k} \\ x_k = (C_1 + 2C_k - 2C_2) t_k \end{cases}$$

Расчёт откольного сигнала

Первое приближение:



$$\begin{cases} x = (C_k + U_k) \cdot t = (C_1 + 2C_k - 2C_2) \cdot t \\ x(t) = C_1 t + C_2 t \ln \frac{t_3}{t} \end{cases}$$



$$U_0 - U_6 = U_0 - U_{\min} = 2(C_2 - C_k)$$

$$\frac{t_6}{t_3} = \exp\left(\frac{2(C_2 - C_k)}{C_2}\right) = \exp(2\Delta)$$

$$\Delta = 1 - \frac{C_k}{C_2} \ll 1 \quad \text{при} \quad -P_k \ll P_0$$



$$\sigma_{\text{отк}} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{\min}) = \rho_0 C_0 (C_2 - C_k) \approx \rho_0 C_0^2 \Delta \approx -P_k$$

Расчёт откольного сигнала

Второе приближение:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{t} + (C_1 - C_2) + C_2 \right) = \frac{1}{2} \left(C_1 + \frac{x}{t} \right) \longrightarrow \begin{aligned} x &= 2(C_k - C_2) \sqrt{tt_k} + C_1 t \\ x(t) &= C_1 t + C_2 t \ln \frac{t_3}{t} \end{aligned}$$

$$\ln \frac{t_3}{t_{6'}} = 2 \left(\frac{C_k}{C_2} - 1 \right) \sqrt{\frac{t_k}{t_{6'}}} = -2\Delta \sqrt{\frac{t_k}{t_{6'}}$$

$$t_{6'} \approx t_6 (1 - A\Delta) \longrightarrow A = 2 \left(1 - \sqrt{\frac{t_k}{t_6}} \right)$$



$$U_0 - U_{6'} = U_0 - U_{\min} = 2(C_2 - C_k) - C_2 A \Delta$$

$$\sigma_{отк} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (U_0 - U_{\min}) \approx \rho_0 C_0^2 \Delta \left(1 - \frac{A}{2} \right) = \rho_0 C_0^2 \Delta \sqrt{\frac{t_k}{t_6}}$$

Расчёт откольного сигнала

Второе приближение:

$$\sqrt{\frac{t_k}{t_6}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{L + (2C_2 - C_1)t_2}{L + (C_2 - C_1)t_2} \frac{e^{-2\Delta}}{1 - \Delta}}$$

Следствие:

$$\Delta \approx -\frac{1}{3} \frac{P_k}{P_0} \ll 1$$

величина поправки слабо зависит от значения откольной прочности и определяется геометрией эксперимента!

Предельные случаи

Симметричный удар

$$t_2 = 0$$

$$\sqrt{\frac{t_k}{t_6}} = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

Треугольный профиль

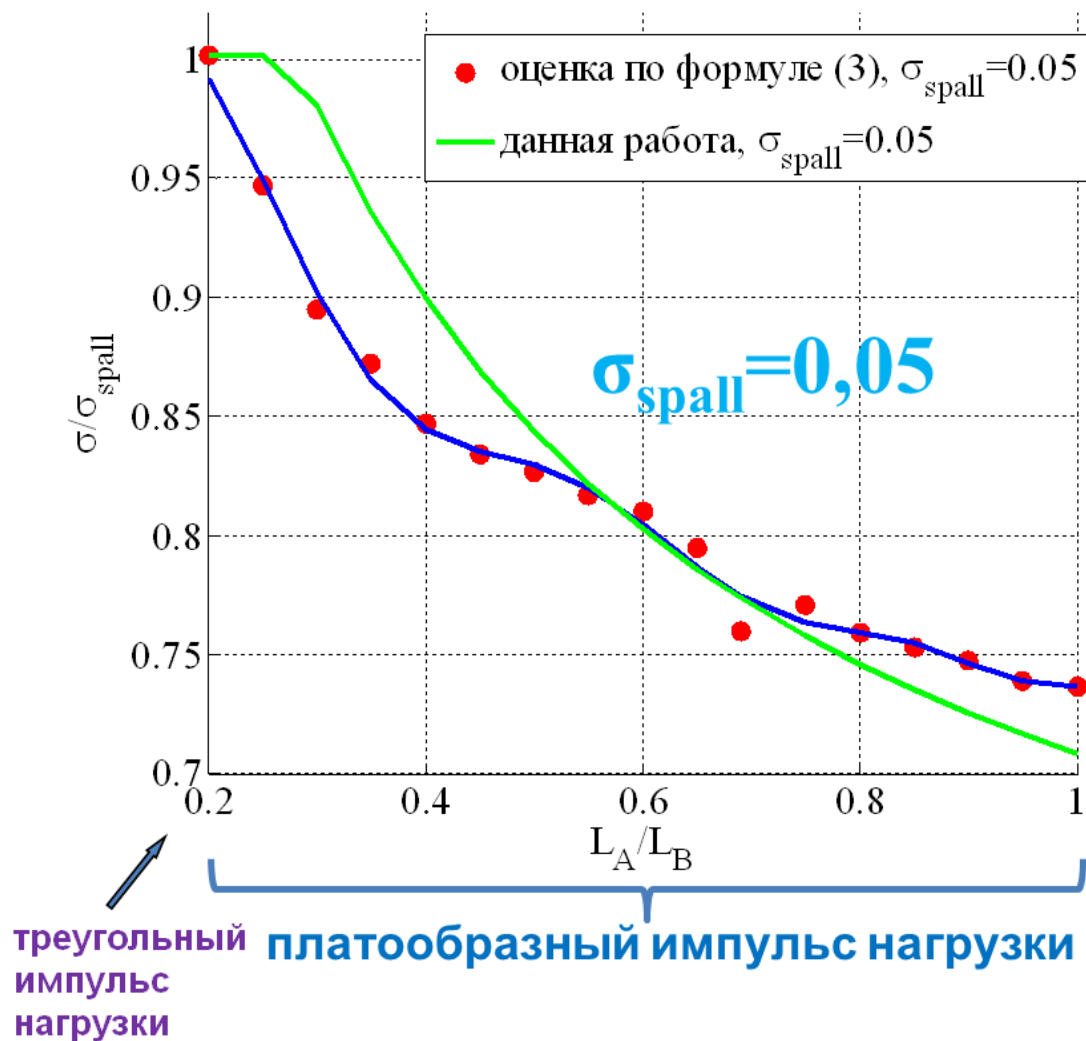
$$t_2 = \frac{L}{C_1}$$

$$\sqrt{\frac{t_k}{t_6}} = 1$$



Расчётное моделирование столкновения

Расчёт задачи в той же постановке, «ВОЛНА» []*



Таким образом, значение откольной прочности, полученное по формуле (3), меняется в зависимости от геометрии эксперимента!



[*] Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В. и др. Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод расчета движений сжимаемых сред. Вопросы атомной науки и техники, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1989, вып. 2, с. 9-25.

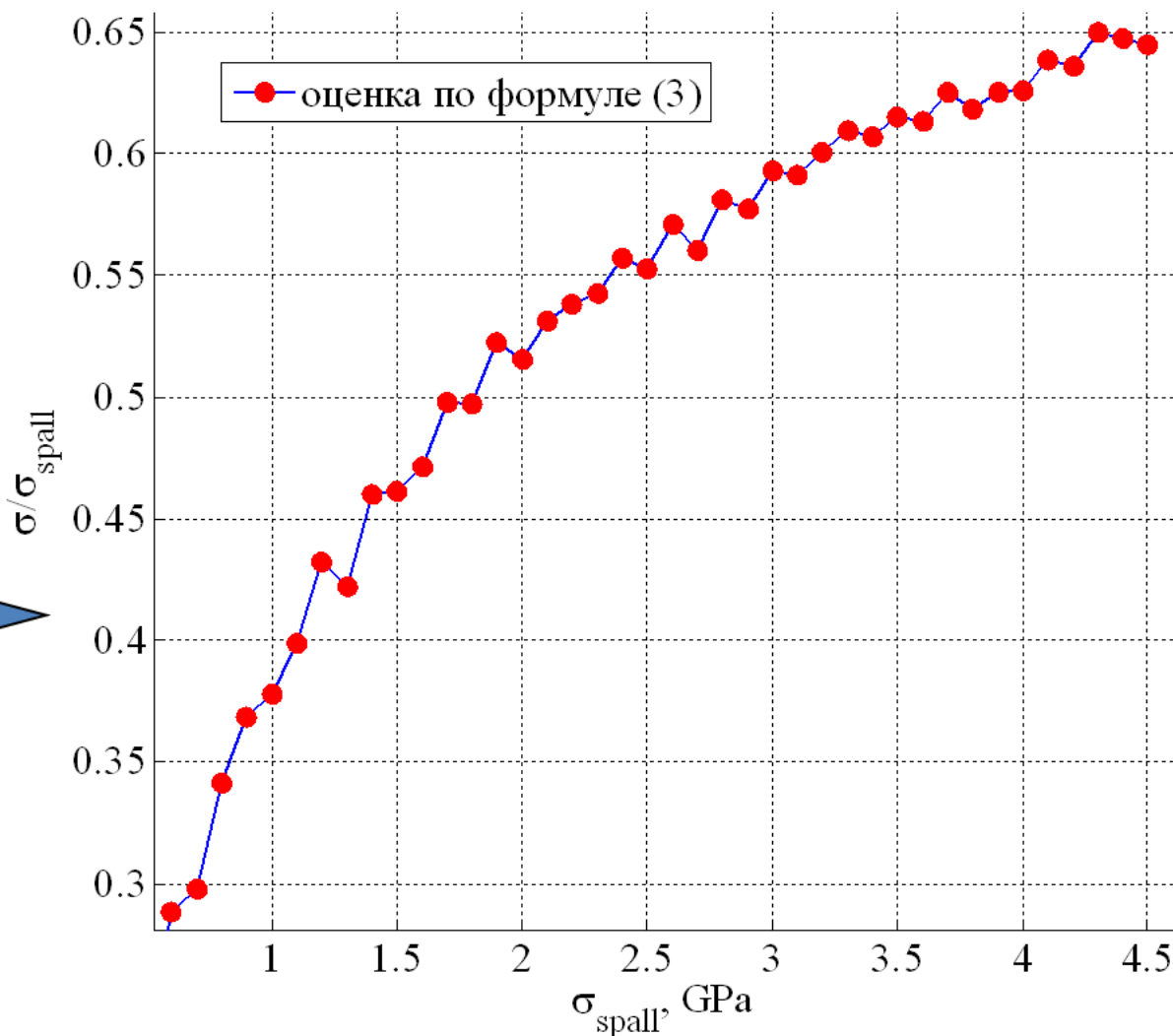
Расчётное моделирование столкновения

Задача о столкновении
пластин 12X18H10T
равной толщины

Современное табличное
уравнение состояния
12X18H10T [*],
гидродинамическое
приближение

$$\rho_0 = 7.89 \text{ Г/см}^3$$

$$U = 2 \text{ км/с}$$



[*] Задорожный Г.А., Петровцев А.В., Дремов В.В. Уравнение состояния стали 12X18H10T. Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения». РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл., Россия. 2005. С.305-312.

Расчётное моделирование столкновения

Задача о столкновении
пластин 12X18H10T
различной толщины

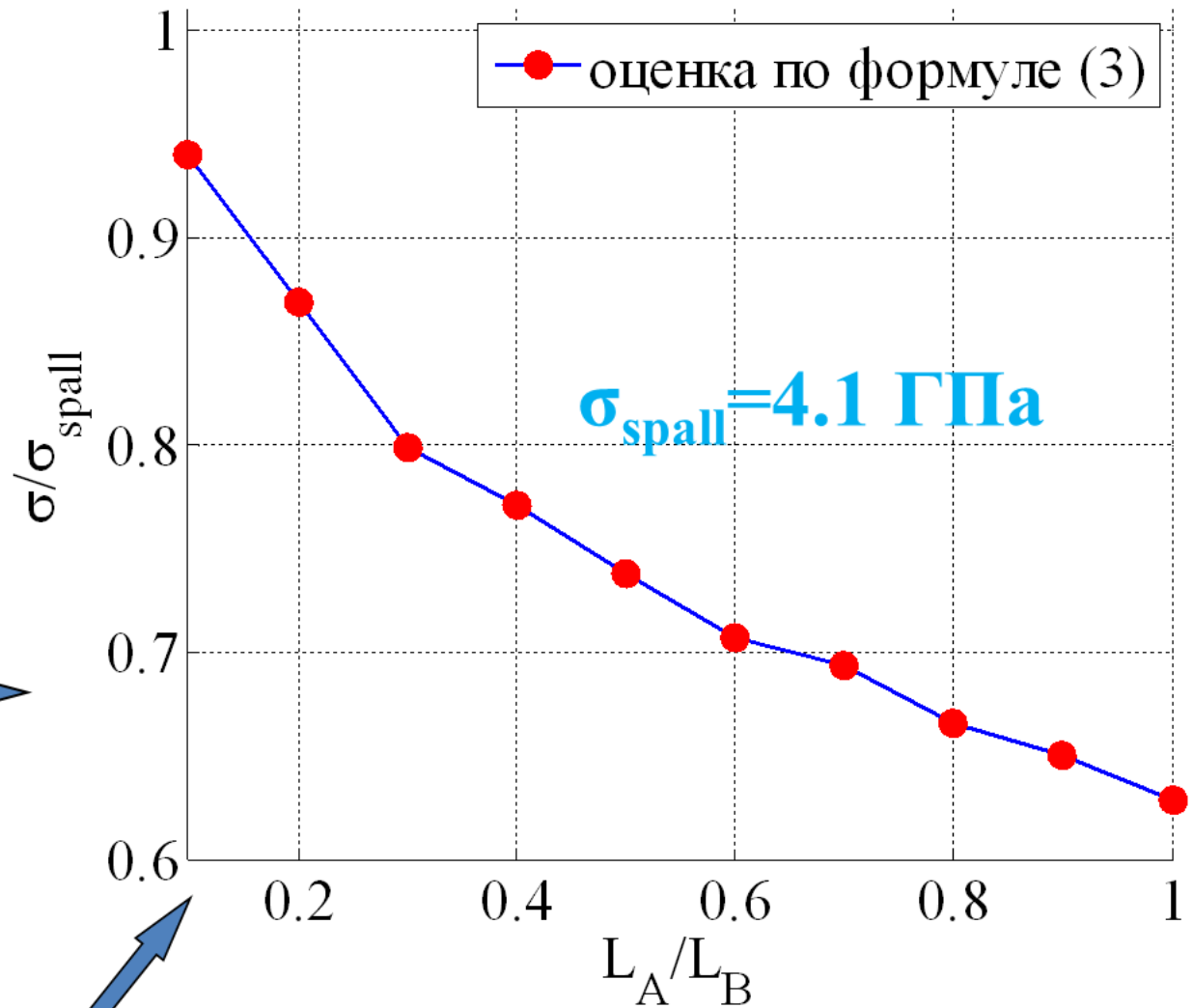
Современное табличное
уравнение состояния
12X18H10T,
гидродинамическое
приближение

$$\rho_0 = 7.89 \text{ г/см}^3$$

$$U = 350 \text{ м/с}$$



треугольный
импульс
нагрузки



платообразный импульс нагрузки



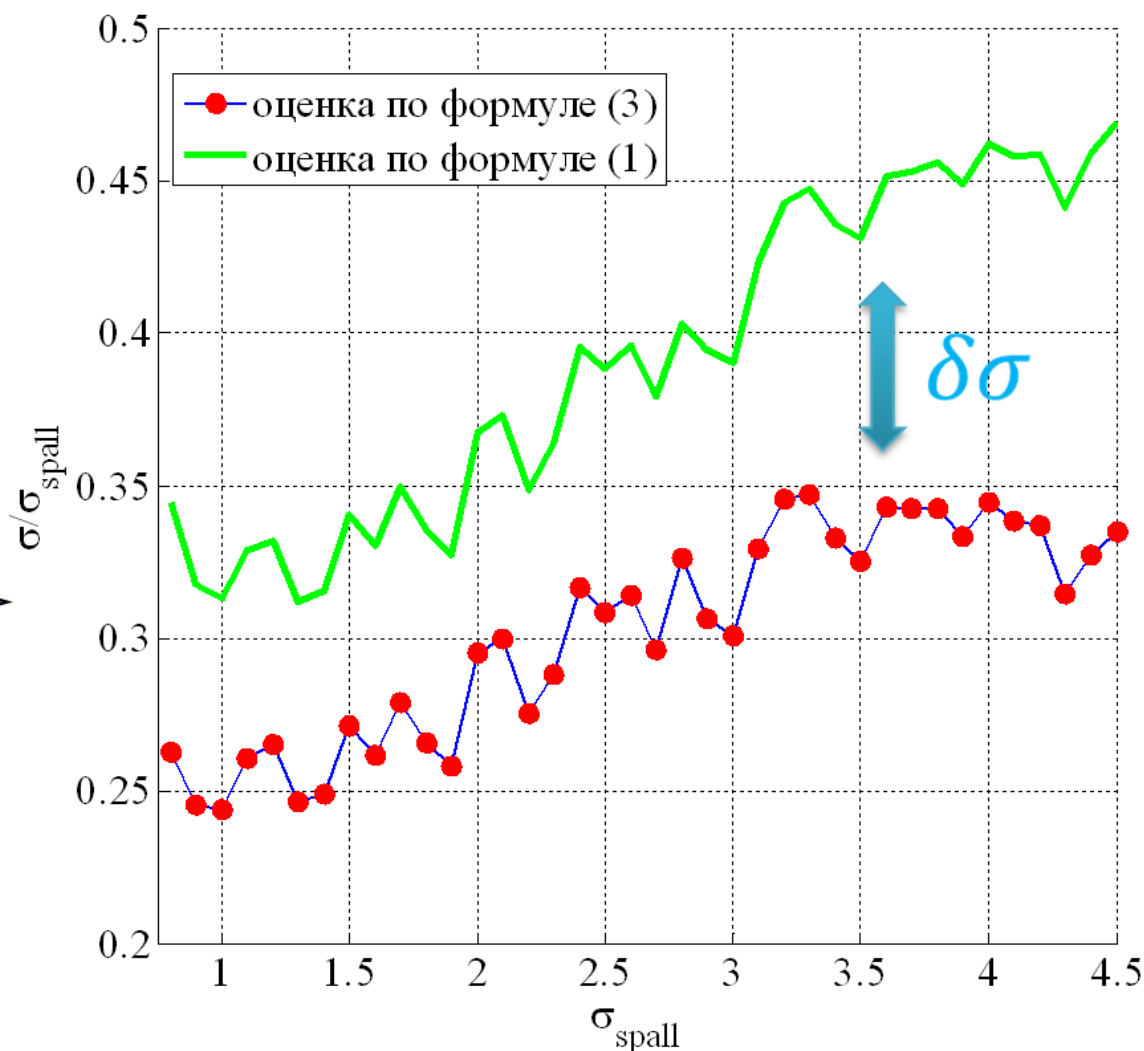
Расчётное моделирование столкновения

Задача о столкновении
пластин 12X18H10T
равной толщины

С табличным УрС и
упругопластической
моделью [*]

$$\rho_0 = 7.89 \text{ г/см}^3$$

$$U = 2 \text{ км/с}$$



[*] Petrovtsev A.V., Bychenkov V.A., and Kovalenko G.V., Numerical simulation of elastic-viscous-plastic properties, polymorphic transformations and spall fracture in iron, in: Shock Compression of Condensed Matter-2001, Bulletin of the American Physical Society, 2001, vol.46, No.4, p.52.

Сравнение с экспериментами*

Задача о столкновении пластин 12X18Н10Т различной толщины

С табличным УрС и
упругопластической моделью

$$\rho_0 = 7.89 \text{ г/см}^3$$

$$U = 350 \text{ м/с}$$

Эксперимент 1 [*]

$$L_A = 2 \text{ мм}$$

$$L_B = 6 \text{ мм}$$

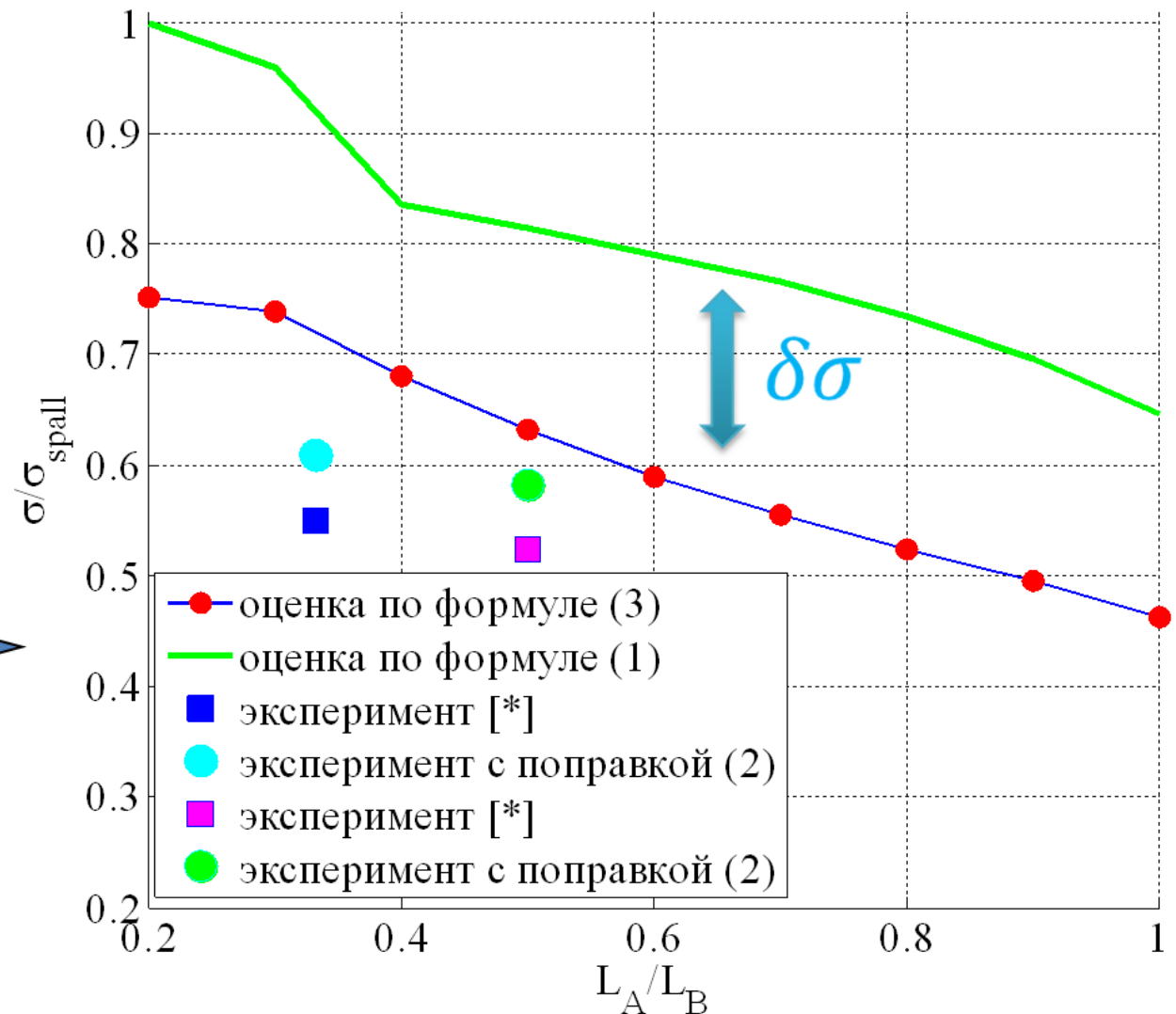
$$U = 351.4 \text{ м/с}$$

Эксперимент 2 [*]

$$L_A = 2 \text{ мм}$$

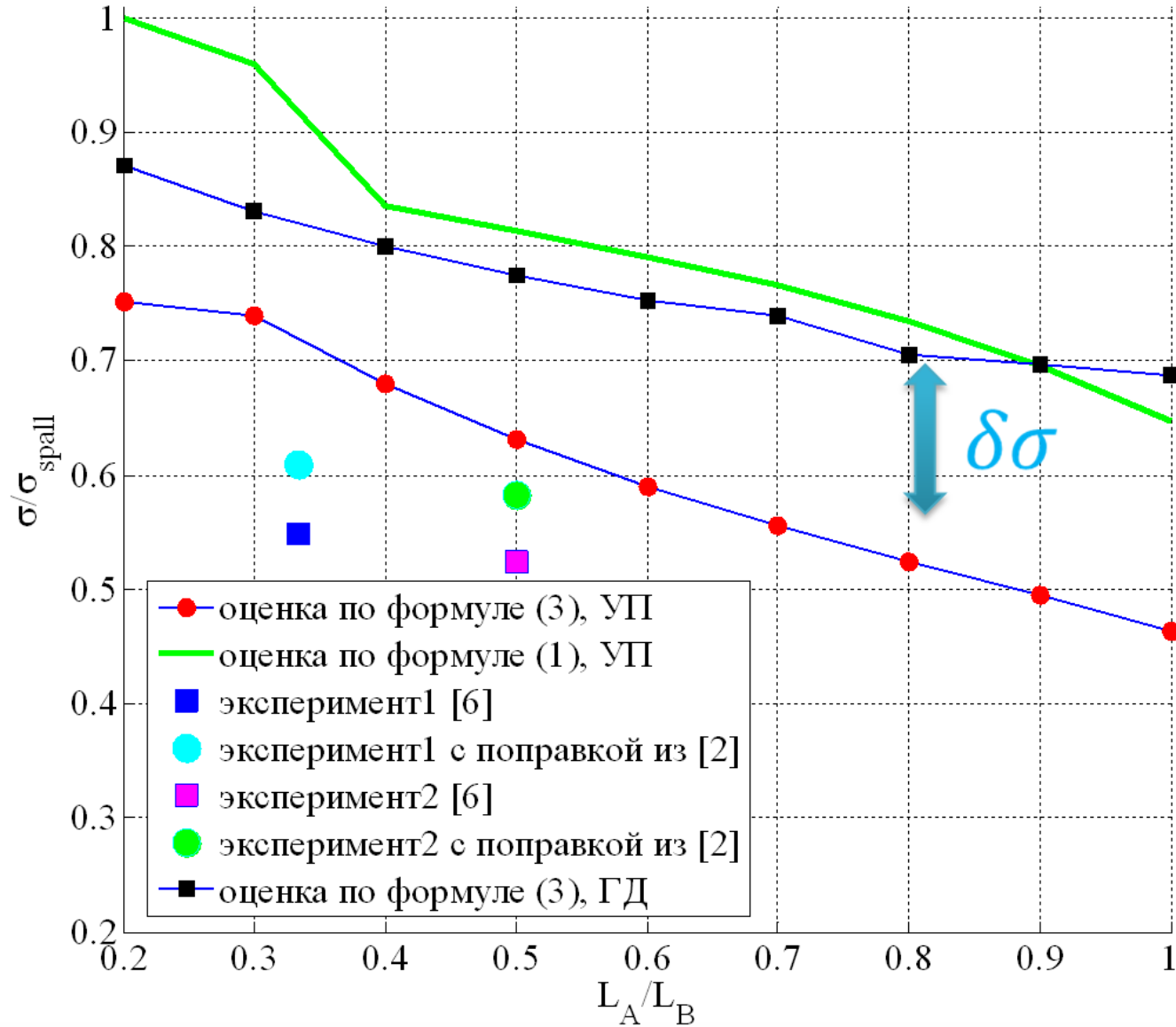
$$L_B = 4 \text{ мм}$$

$$U = 348.8 \text{ м/с}$$

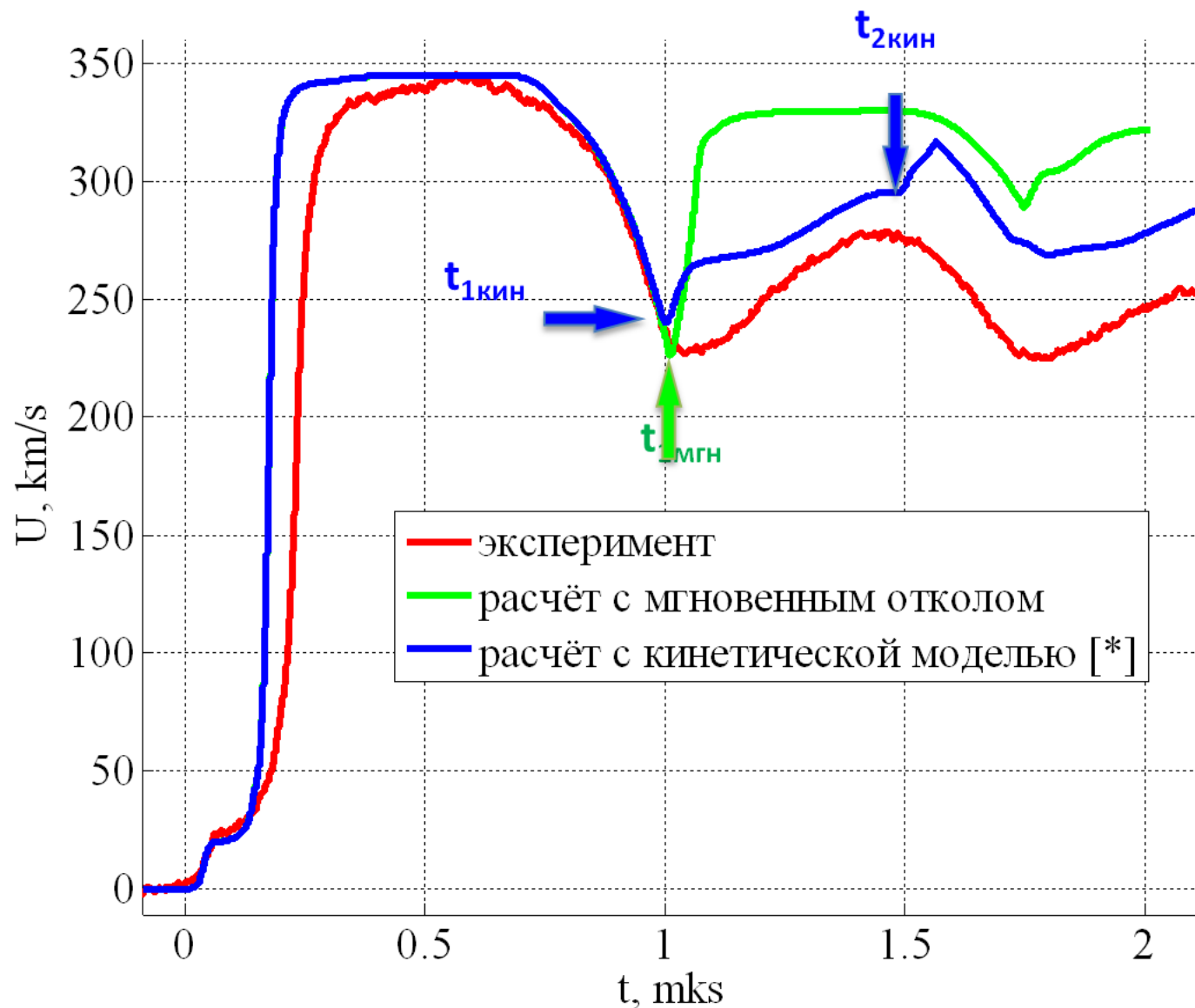


[*] Павленко А.В., Абраменко С.И., Валеев М.Ф., Зуев Ю.Н., Шестаков А.Е., Шестакова Е.А., Малюгина С.Н., Казаков Д.Н. Особенности пластического деформирования и откольного разрушения конструкционной стали 12X18H10T. Труды X Международной конференции "Забабахинские научные чтения". Снежинск (2010); <http://www.vniitf.ru/images/zst/2010/sec4/4-34.pdf>

Сравнение гидродинамического и упругопластического приближений с экспериментом



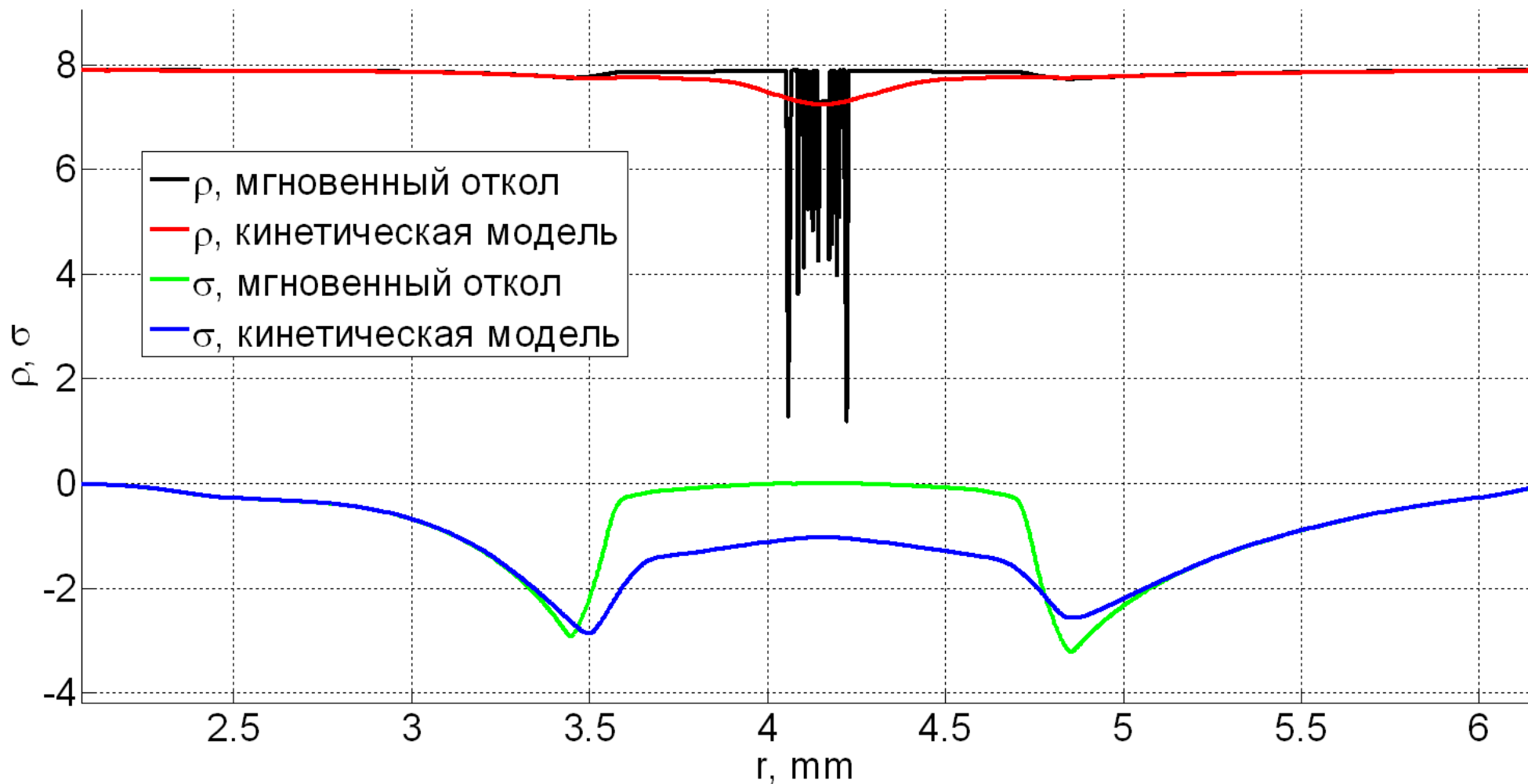
Отличие в моделях разрушений



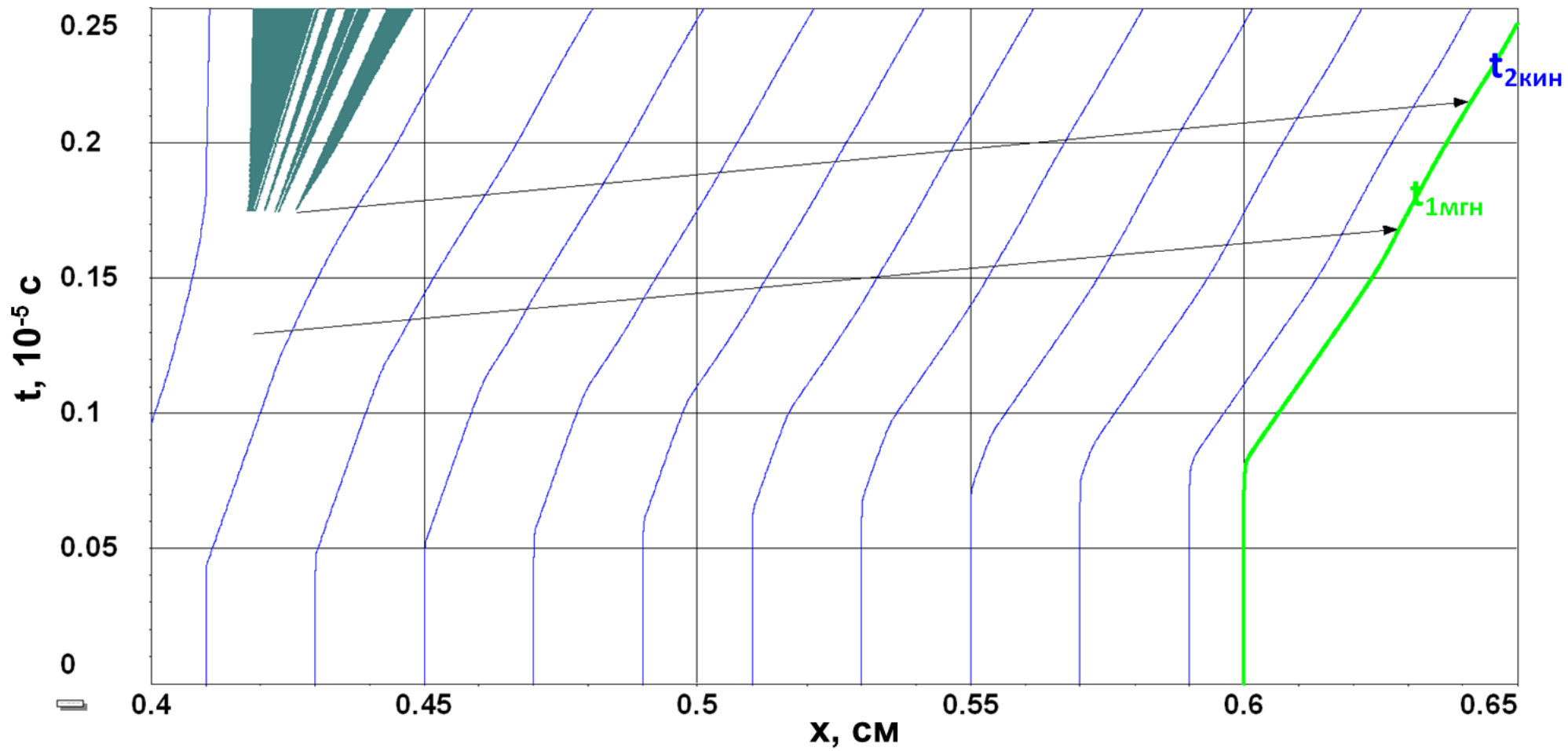
[*] Petrovtsev A.V., Bychenkov V.A., and Kovalenko G.V., *Numerical simulation of elastic-viscous-plastic properties, polymorphic transformations and spall fracture in iron*, in: *Shock Compression of Condensed Matter-2001*, Bulletin of the American Physical Society, 2001, vol.46, No.4, p.52.

Отличие в моделях разрушений

Сравнение плотностей и растягивающих напряжений в области накопления поврежденности и в её малой окрестности



Отличие в моделях разрушений



Спасибо за внимание!

Thank you for your attention!