



РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР ВНИИЭФ



МЕТОД РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ НА НЕПОДВИЖНОЙ СЧЕТНОЙ СЕТКЕ

Краюхин А.А., Стадник А.Л., Янилкин Ю.В.

РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИТМФ, г. Саров.

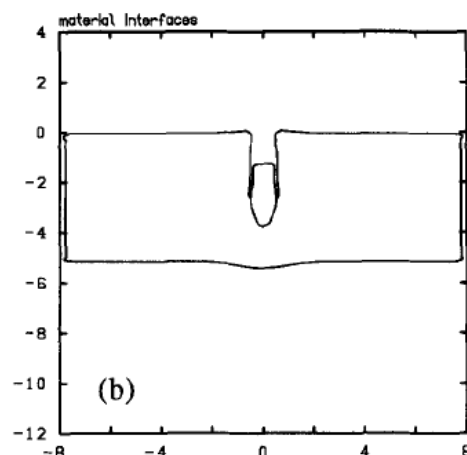
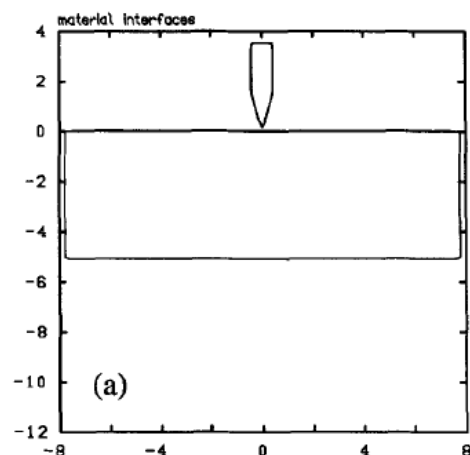
XIV международная конференция «Забабахинские научные чтения» 18-22 марта
2019 г., г. Снежинск

ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ВНЕДРЕНИЯ МАЛОДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ В ПРОЧНЫЕ ПРЕГРАДЫ



- **«Прилипание»** материалов ударника и преграды при их контакте вызывает дополнительный рост величины ускорения торможения ударника – уменьшение запреградной скорости или снижение глубины внедрения.
- **Сохранение первоначальной формы** проникателя – изменение внешних обводов проникателя приводит к изменению формы каверны, оказывает влияние на траекторию движения и т.д.

Прямой расчет опыта пробития плиты из Al вольфрамовым ударником по эйлеровому коду **СТН*** – качественное и количественное отличие от опыта.



Результаты опыта:

- $V_0=0.81$ км/с – скорость удара.
- $V_r=0.595$ км/с – запреградная скорость ударника.
- Форма ударника не изменилась.

Один из способов решения – использование приближения **абсолютно твердого тела** для описания ударника.

* Silling S.A. // Report SAND92-2487. Albuquerque, 1994.

Метод BODY-3D представляет собой способ расчета пространственного движения жесткого ударника в упругопластической среде на неподвижной счетной сетке, заключающийся в численном моделировании течения окружающей среды в неинерциальной системе отсчета (СО), в которой ударник является неподвижным.

Ударник – абсолютно твердое тело с массой m , радиус-вектором центра масс $\mathbf{r}_c$, тензором инерции в главных осях относительно центра масс $\mathbf{J}$.

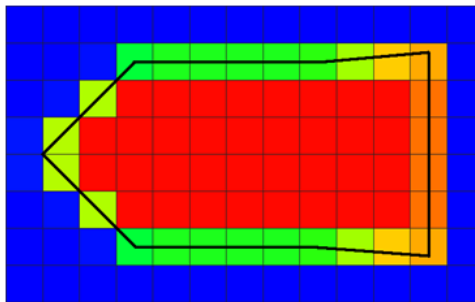
Уравнения движения тела: $m \cdot \vec{a} = \vec{F}$, $\mathbf{J} \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{M}$.

Сила сопротивления внедрению: $\vec{F} = \int (\sigma_n \cdot \vec{n} + \sigma_\tau \cdot \vec{\tau}) \cdot dS$.

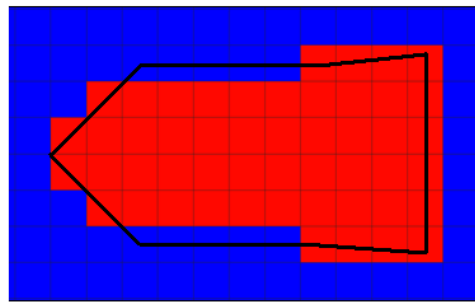
Момент силы: $\vec{M} = \int_S [\vec{r}, (\sigma_n \cdot \vec{n} + \sigma_\tau \cdot \vec{\tau})] \cdot dS$.

Касательное напряжение: $\sigma_\tau = \begin{cases} 0, & \sigma_n < 0 \\ \min\{\mu \cdot \sigma_n, Y\}, & \sigma_n \geq 0 \end{cases}$.

Поле веществ на начало расчета



до корректировки
начальных данных



после корректировки
начальных данных

Нормальное напряжение

$$\sigma_{mm} = \max\{0, P - S_{mm}\}$$

P – давление.

S_{mm} – компонента девиатора тензора напряжений.

Расчет силы сопротивления внедрению и момента силы

$$F_x = \sum_i f_x^i = \sum_i s_i \cdot \left[-\sigma_{xx}^i \cdot n_{xi} + \frac{V_x^i}{|\vec{V}_i|} \cdot \left(\min\{\mu \cdot \sigma_{yy}^i, Y_i\} \cdot n_{yi}^2 + \min\{\mu \cdot \sigma_{zz}^i, Y_i\} \cdot n_{zi}^2 \right) \right]$$

$$F_y = \sum_i f_y^i = \sum_i s_i \cdot \left[-\sigma_{yy}^i \cdot n_{yi} + \frac{V_y^i}{|\vec{V}_i|} \cdot \left(\min\{\mu \cdot \sigma_{xx}^i, Y_i\} \cdot n_{xi}^2 + \min\{\mu \cdot \sigma_{zz}^i, Y_i\} \cdot n_{zi}^2 \right) \right]$$

$$M_z = \sum_i [f_y^i \cdot (x_i - x_c) - f_x^i \cdot (y_i - y_c)] \quad \omega^n = \omega^{n-1} + \frac{M_z^n}{J_c} \cdot \Delta t$$

Пусть СО $x'y'z'$ вращается вокруг оси z' со скоростью ω относительно СО xzy (оси z' и z совпадают). Численное моделирование проводится в СО $x'y'z'$, связанной с неподвижным ударником. Тогда массовая скорость среды является относительной скоростью в СО $x'y'z'$.

Изменение массовой скорости записывается в виде: $d\vec{V}^{omn} = \left(\vec{a}^{omn} + \left[\vec{\omega}, \vec{V}^{omn} \right] \right) \cdot dt.$

$$\vec{a}^{omn} = \vec{a}^{gd} + \vec{a}^{up} + \vec{a}^F.$$

$\vec{a}^F = -\vec{i} \cdot F_x / m - \vec{j} \cdot F_y / m$ – ускорение за счет действия силы сопротивления внедрению.

$$\vec{a}^C = \left[-\vec{\omega}, \vec{V}^{omn} \right] = -\vec{i} \cdot (-\omega) \cdot V_y^{omn} + \vec{j} \cdot (-\omega) \cdot V_x^{omn}.$$

Массовая скорость вещества: $\vec{V}_n^{omn} = \vec{V}_{n-1}^{omn} + \left(\vec{a}^{gd} + \vec{a}^{up} + \vec{a}^F + \vec{a}^C \right) \cdot \Delta t.$

Для расчета новых координат узлов ячеек требуется рассчитать переносную скорость:

$$\vec{V}_n^{nep} = \left[-\vec{\omega}^n, \vec{r}^{n-1} \right] = -\vec{i} \cdot (-\omega^n) \cdot (y^{n-1} - y_c) + \vec{j} \cdot (-\omega^n) \cdot (x^{n-1} - x_c).$$

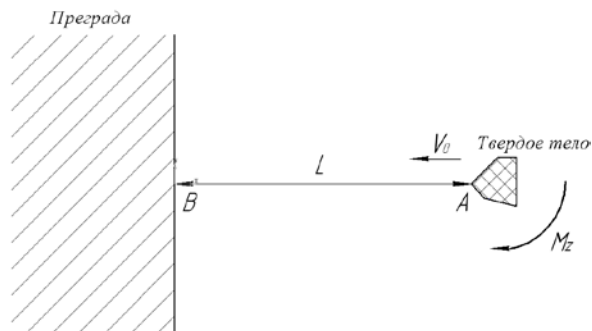
Вычисление новых координат узлов счетных ячеек:

$$x^n = x^{n-1} + (V_{x,n}^{omn} + V_{x,n}^{nep}) \cdot \Delta t, \quad y^n = y^{n-1} + (V_{y,n}^{omn} + V_{y,n}^{nep}) \cdot \Delta t.$$

ТЕСТОВЫЙ РАСЧЕТ: ПАДЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА ПРЕГРАДУ



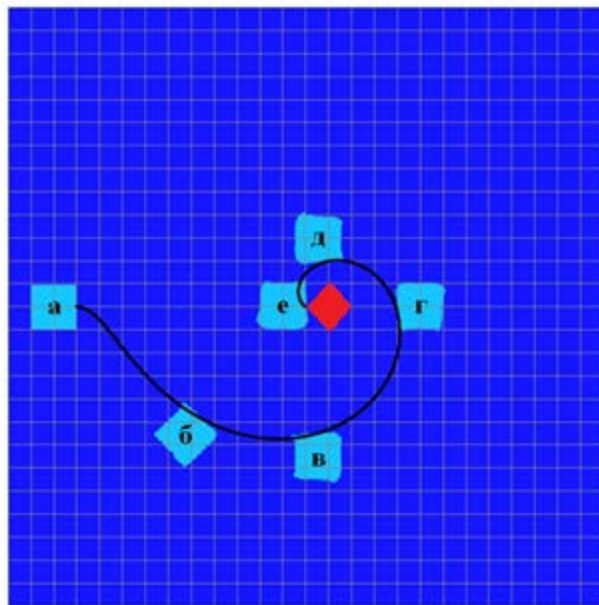
Геометрия задачи в схематичном виде



$$M_z = \frac{4 \cdot \pi \cdot J_C \cdot V_0^2}{L^2}$$

$$t_\gamma = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot J_C}{M_z}}$$

Траектория движения точки (В) в СО $x'y'z'$:
аналитич. решение и рез-ты расчета



Нач. условия: $V_0=0.1$ км/с, $L=10$ см, $J_C=1$ г·см².
 $M_z=0.001256$ г·см²/(10·мкс)².

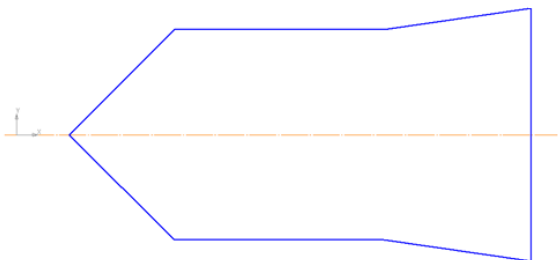
Моменты времени и угол поворота:

- а) $t=0$ ($\gamma=0$),
- б) $t=35.4$ 10·мкс ($\gamma=\pi/4$),
- в) $t=50$ 10·мкс ($\gamma=\pi/2$),
- г) $t=70.7$ 10·мкс ($\gamma=\pi$),
- д) $t=86.6$ 10·мкс ($\gamma=3 \cdot \pi/2$),
- е) $t=100$ 10·мкс ($\gamma=2 \cdot \pi$).

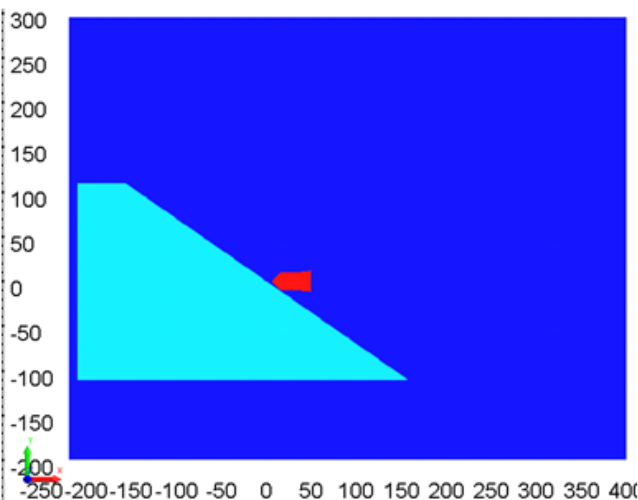
РАСЧЕТЫ НАКЛОННОГО ВНЕДРЕНИЯ КОМПАКТНОГО УДАРНИКА В ГРУНТОВУЮ ПРЕГРАДУ ПО МЕТОДИКЕ ЭГАК



Геометрия ударника
(x – ось симметрии)



Геометрия расчетов



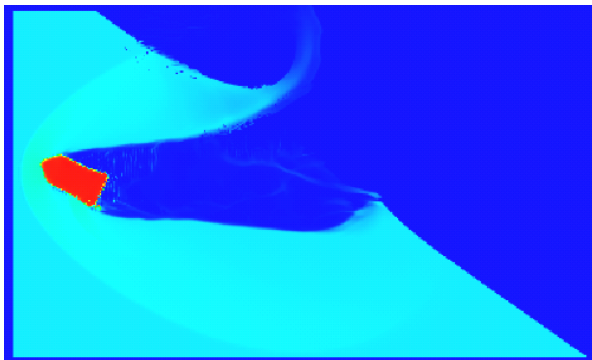
- Преграда: мягкий грунт ($\rho_0=1.72$ г/см³).
- Скорость соударения: $V_0=2$ км/с.
- Условия удара: угол подхода $\theta=35^\circ$, угол атаки $\alpha=0$.
- Счетная сетка: кубическая эйлерова $h=1$ см ($N=10$ ячеек на радиус ударника).

Особенности расчетов:

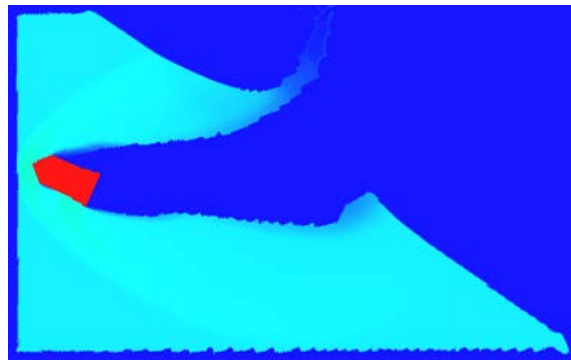
- Расчет 1: Стандартный подход (стальной ударник).
- Расчет 2: Ударник – абсолютно твердое тело ($\mu=0$).
- Расчет 3: Ударник – абсолютно твердое тело ($\mu=0.3$).

μ – коэффициент трения.

Поля плотности на момент времени $t=1.3$ мс

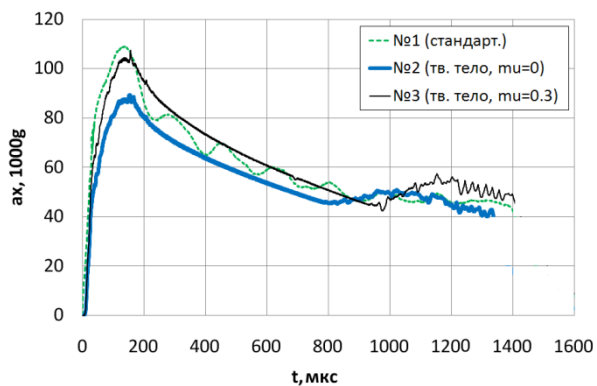


расчет 1 (стандарт.)

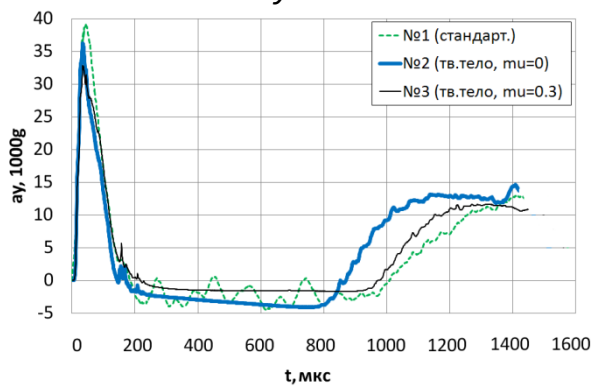


расчет 2 (твердое тело, $\mu=0$),
 $\gamma=24^\circ$ - угол поворота

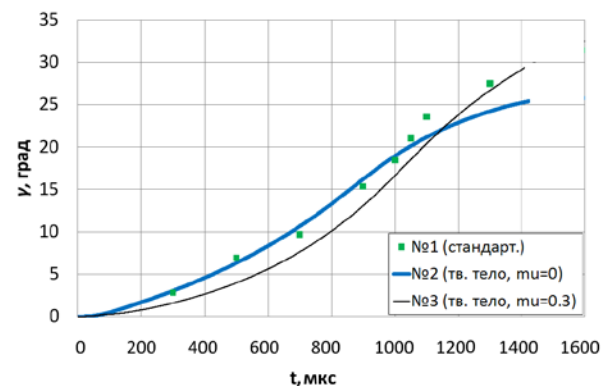
$a_x(t)$



$a_y(t)$

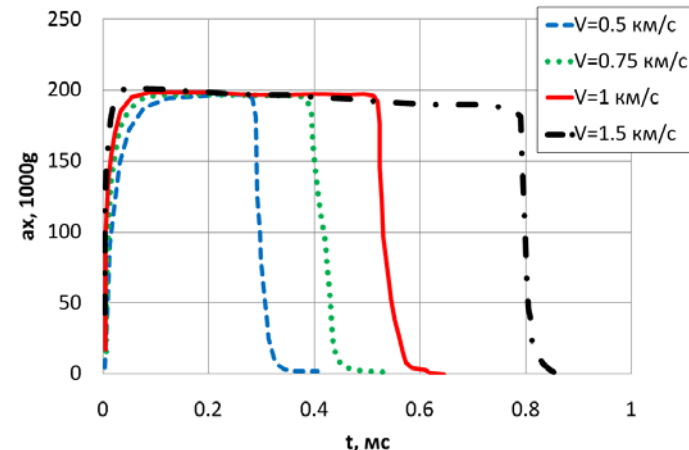


$\gamma(t)$



Постановка расчетов AUTODYN*

- Ударник: цилиндр из стали с оживальным наконечником ($CRH=3$), диаметр $D=0.6$ см, длина $L=12$ см, масса $m=27$ г.
- Преграда: алюминий ($Y=0.4$ ГПа).
- Скорость соударения: $V_0=0.5 \div 1.5$ км/с.
- Условия соударения: удар нормальный.

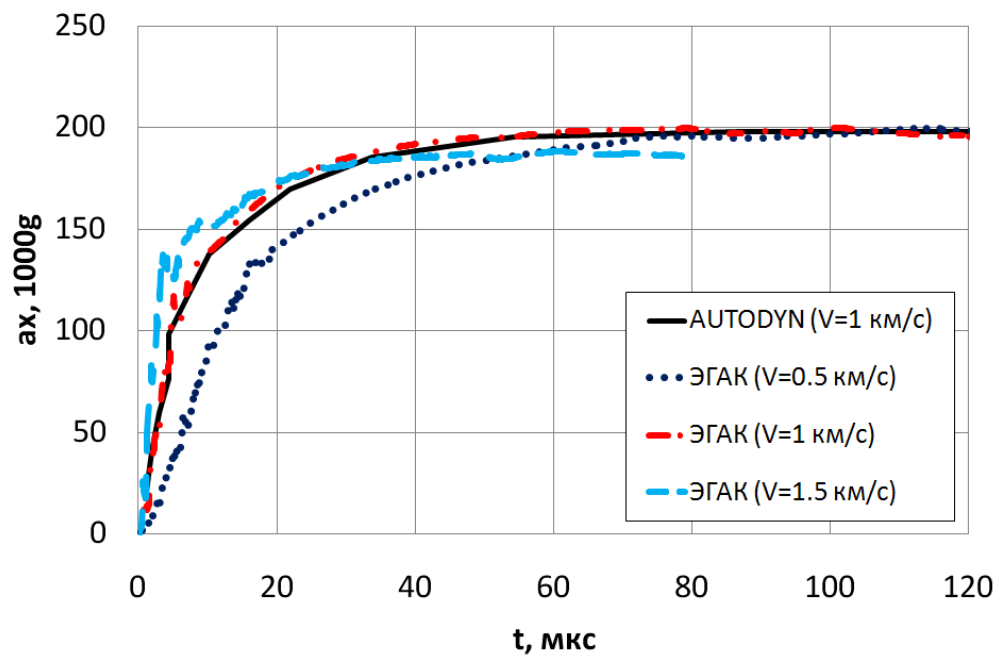
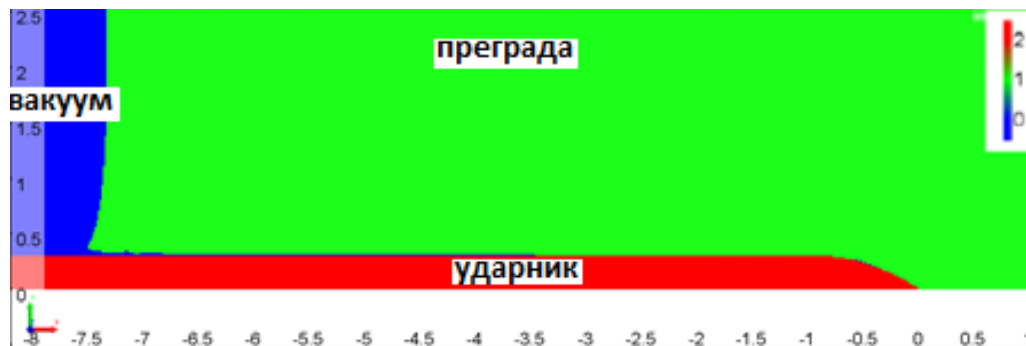


Зависимости ускорения торможения ударника от времени (AUTODYN)

Постановка расчетов ЭГАК

- Для описания алюминия применялось УРС Ми-Грюнайзена и $Y=0.4$ ГПа.
- Квадратная эйлеровая сетка с $h=0.015$ см ($N=20$ ячеек на радиус ударника).
- Ударник – абсолютно твердое тело.
- Скорость удара $V_0=0.5, 1$ и 1.5 км/с.

Поле веществ



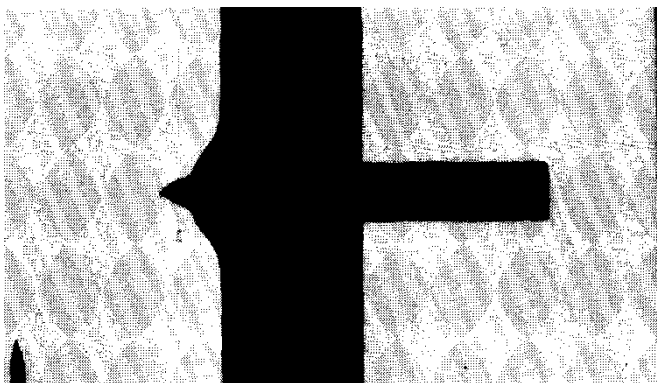
Зависимости ускорения торможения ударника от времени

РАСЧЕТЫ ОПЫТОВ ПРОБИВАНИЯ ПЛИТЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СТАЛЬНЫМ УДАРНИКОМ*

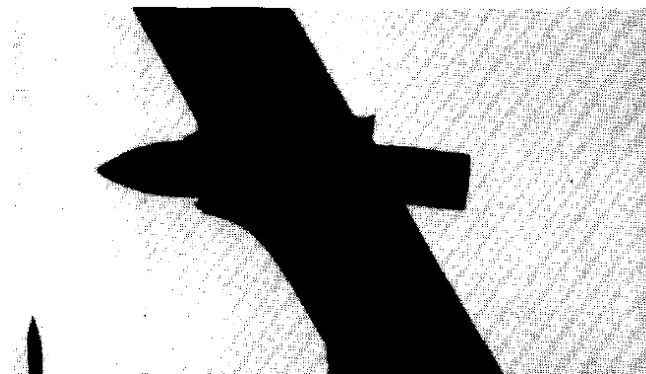


- Ударник: цилиндр из стали с оживальным наконечником ($CRH=3$), диаметр $D=1.29$ см, длина $L=8.89$ см, масса $m=81$ г.
- Преграда: пластина из Al 6061-T651, толщина $H=2.63$ см.
- Скорость соударения: $V_0=0.28\div 0.86$ км/с.
- Условия соударения: удар нормальный и под углом $\theta=60^\circ$ к поверхности.

Рентгенограммы опытов

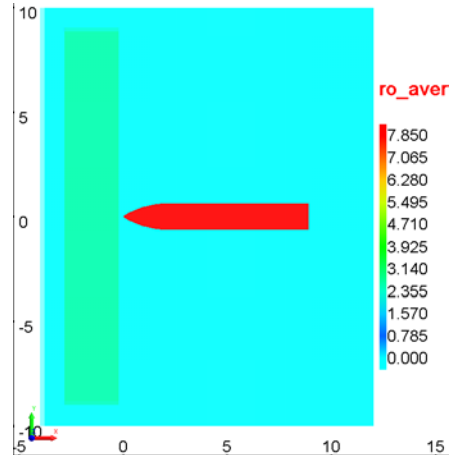


$\theta=90^\circ$, $V_0=0.308$ км/с, $t=185$ мкс.



$\theta=60^\circ$, $V_0=0.73$ км/с, $t=90.6$ мкс.

Нормальный удар ($\theta=90^\circ$)



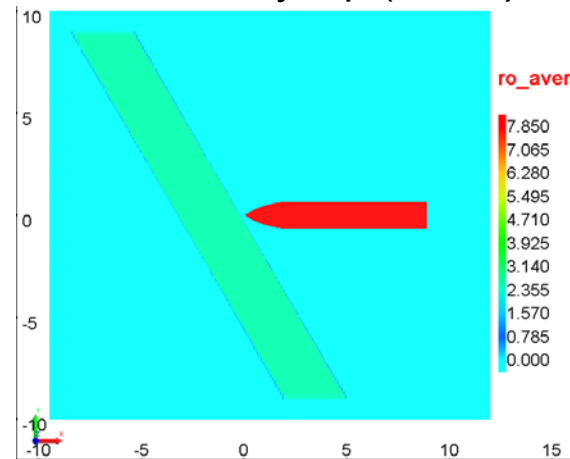
➤ Ударник: абсолютно твердое тело с характеристиками $m=40.5$ г, $x_C=4.9$ см, $y_C=0$, $J_C=220$ г·см².

➤ Счетная сетка: эйлерова кубическая с $N=20$ (N – количество ячеек на радиус ударника).

➤ УРС Ми-Грюнайзена.

Материал	ρ_0 , г/см ³	c_0 , км/с	Γ	n	P_{crit} , ГПа
Al 6061-T6	2.703	5.24	1.15	4	-1.1

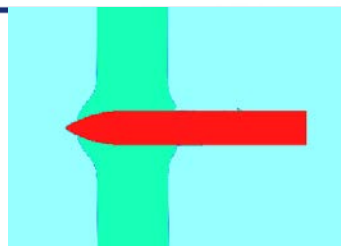
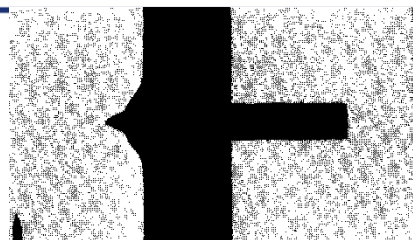
Наклонный удар ($\theta=60^\circ$)



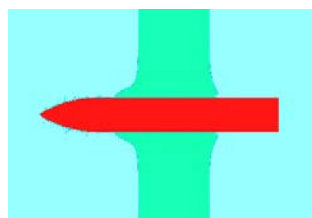
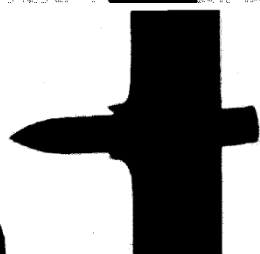
➤ Модель упругопластичности Джонсона-Кука.

Материал	A , ГПа	b , ГПа	k	c	m	C_v , кДж/(г·К)	T_m , °К	ν
Al 6061-T6	0.335	0.085	0.11	0.012	1	$875 \cdot 10^{-6}$	925	0.34

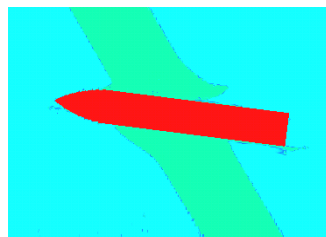
СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ И РАСЧЕТОВ: КАРТИНА ПРОБИВАНИЯ ПРЕГРАДЫ



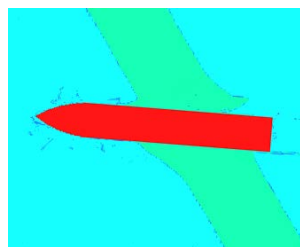
$\theta=90^\circ$, $V_0=0.308$ км/с, $t=185$ мкс.



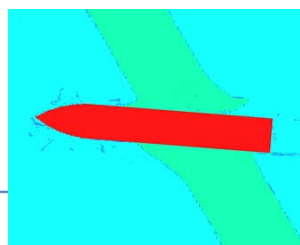
$\theta=90^\circ$, $V_0=0.863$ км/с, $t=85.2$ мкс.



$\theta=60^\circ$, $V_0=0.4$ км/с, $t=204.3$ мкс.

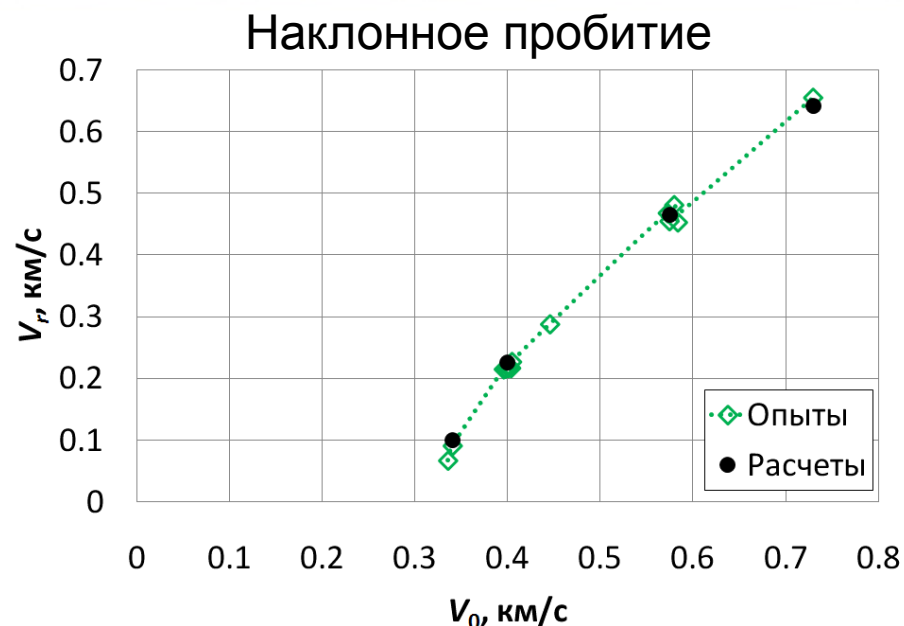
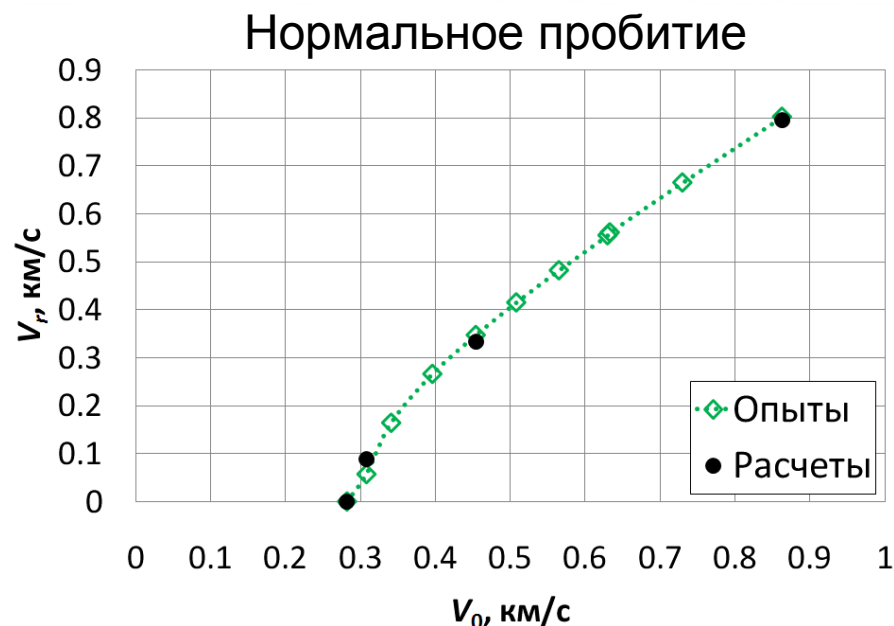


$\theta=60^\circ$, $V_0=0.573$ км/с, $t=152.8$ мкс.



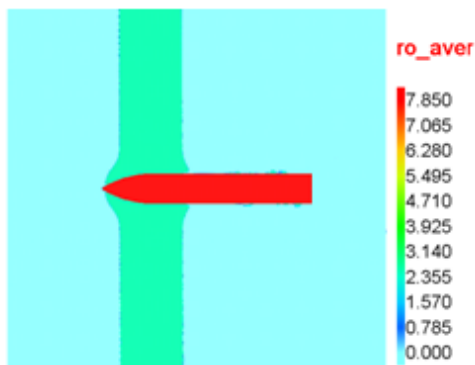
$\theta=60^\circ$, $V_0=0.73$ км/с, $t=90.6$ мкс.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ И РАСЧЕТОВ: ЗАПРЕГРАДНАЯ СКОРОСТЬ УДАРНИКА

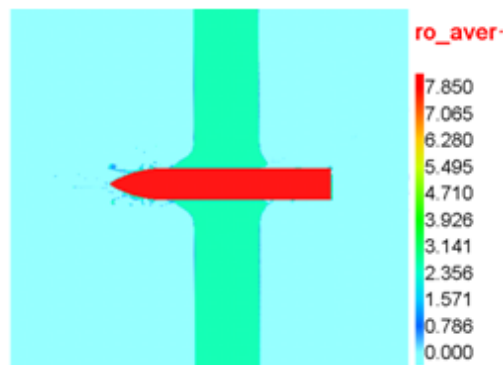


Зависимости запреградной скорости ударника от скорости соударения

$V_0=0.282$ км/с

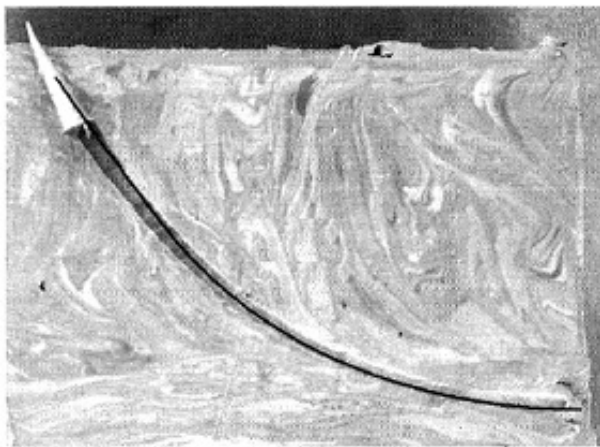


$V_0=0.308$ км/с



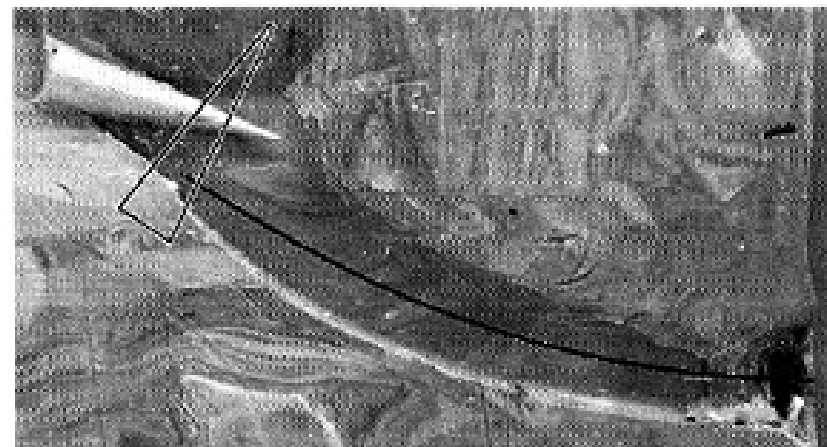
- Ударник: стальной конус с углом полураствора $\varphi=8.167^\circ$, диаметром основания $D=7$ мм, высотой $H=23$ мм и массой $m=2.5$ г.
- Преграда: один или два пластилиновых блока толщиной $100\div 120$ мм.
- Скорость соударения: $V_0=0.25\div 0.32$ км/с (средняя скорость 0.28 км/с).
- Условия соударения: удар нормальный, угол атаки $\alpha\approx 0\div 20^\circ$.

$$\alpha < \alpha_{\text{crit}} \approx 10^\circ$$

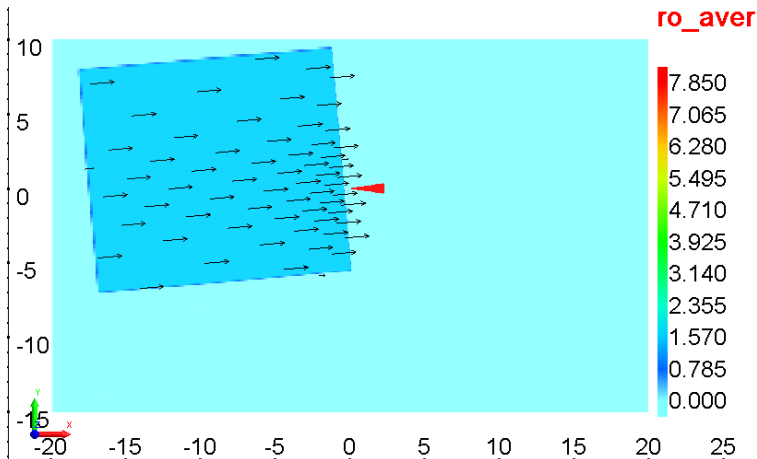


Траектория – окружность большого радиуса.

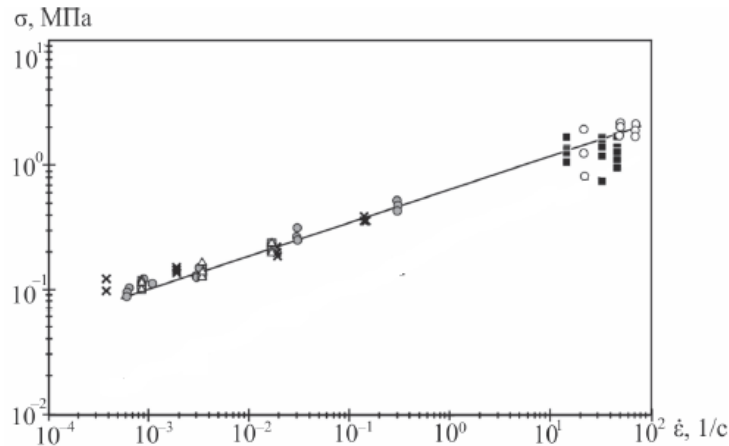
$$\alpha \geq \alpha_{\text{crit}} \approx 10^\circ$$



Проникание завершается «кувырком» ударника.



Начальная геометрия расчета при угле атаки $\alpha=5^\circ$



Опытная зависимость величины предела текучести пластилина от скорости деформации

- Скорость соударения: $V_0=0.28$ км/с.
- Угол атаки: $\alpha=0\div 17^\circ$.
- Ударник: абсолютно твердое тело с характеристиками $m=1.25$ г, $x_C=1.65$ см, $y_C=0$, $J_C=0.296$ г·см².
- Счетная сетка: эйлеровая кубическая с $N=10$.

- УРС Ми-Грюнайзена для пластилина

ρ_0 , г/см ³	C_0 , км/с	Γ	n	P_{spall} , ГПа
1.48	1.55	1	3	-0.005

- Модель упругопластичности пластилина:

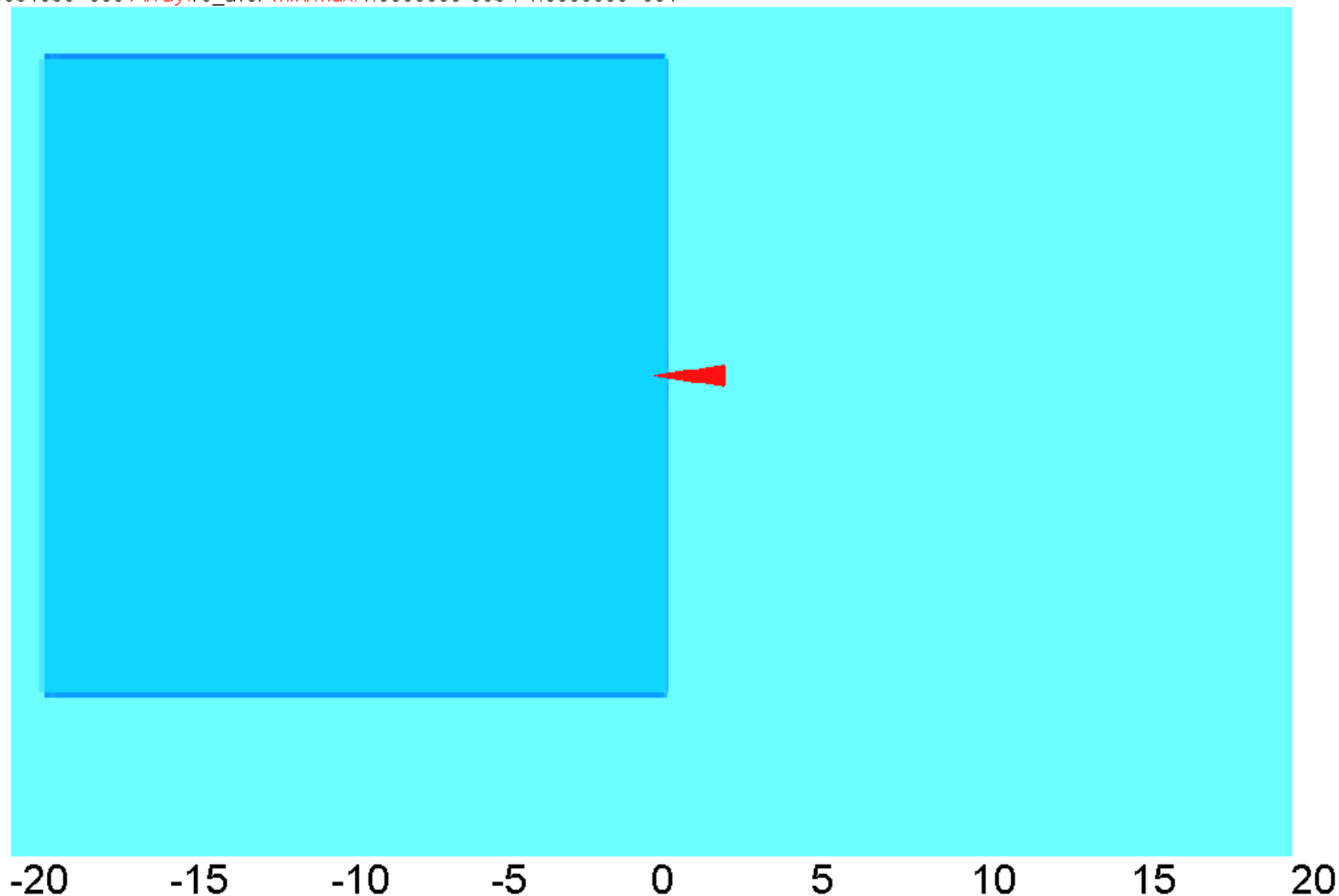
$$Y = \min \{ A \cdot \dot{\epsilon}^n, Y_{\max} \}.$$

$$A=0.637 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}, n=0.266.$$

$$Y_{\max}=3.5 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}.$$

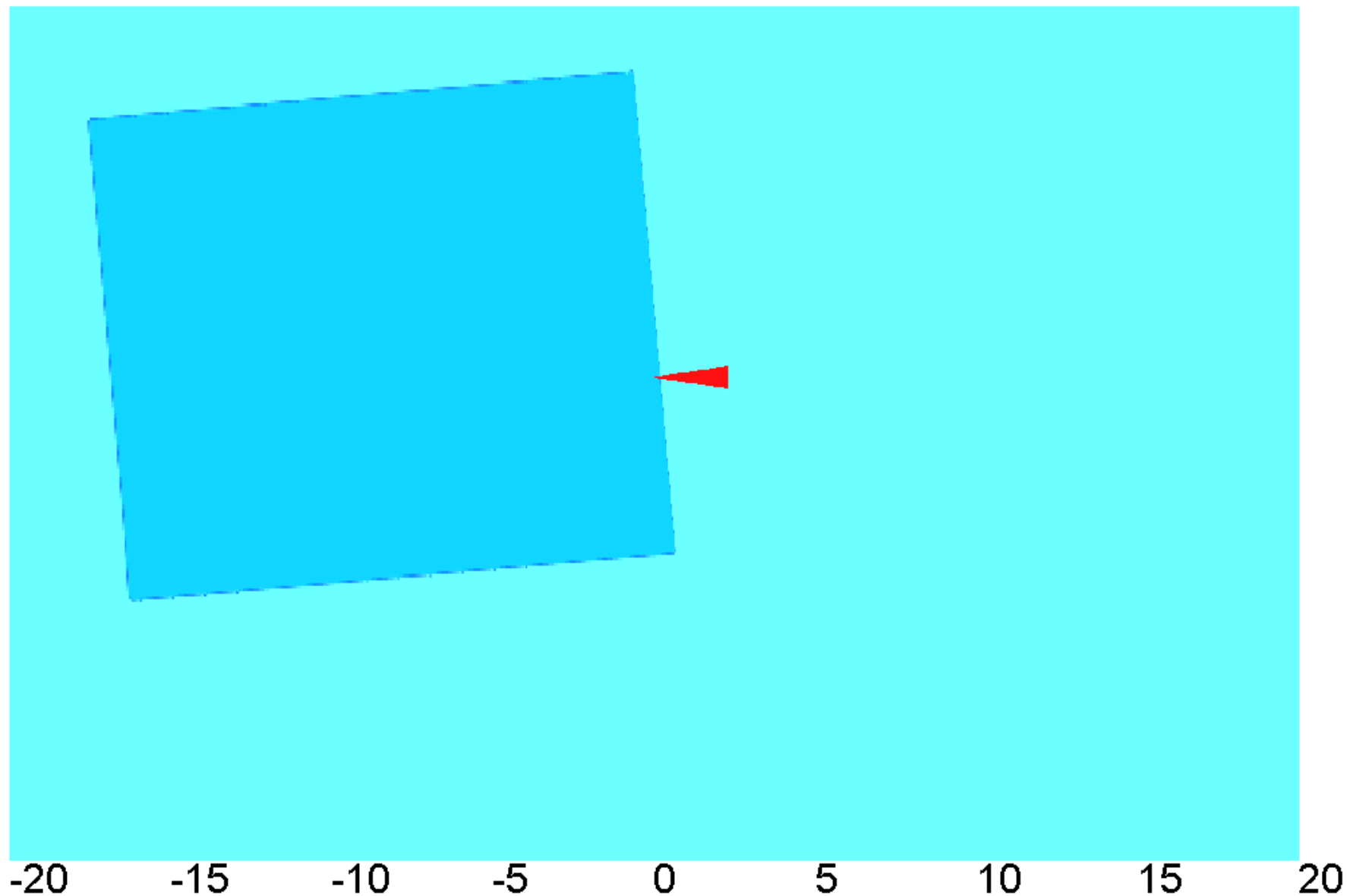
Результаты расчета при угле атаки $\alpha=0$.

Time: 2.003153e+000 Array: ro_aver Min/max: 1.000000e-003 : 1.000000e+001



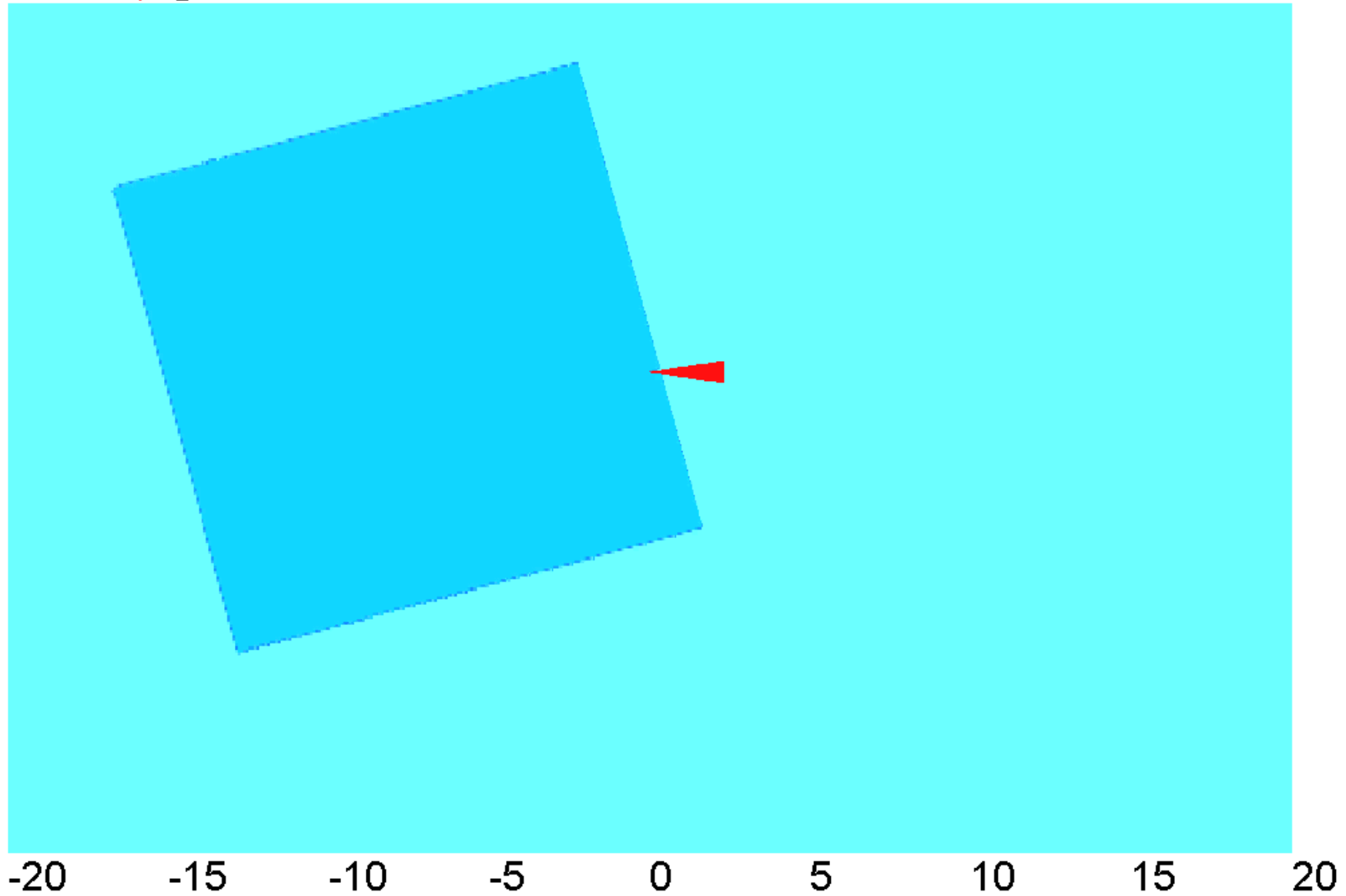
Результаты расчета при угле атаки $\alpha=5^\circ$.

2.001522e+000 Array:ro_aver Min/max:1.000000e-003 : 1.000000e+001



Результаты расчета при угле атаки $\alpha=15^\circ$.

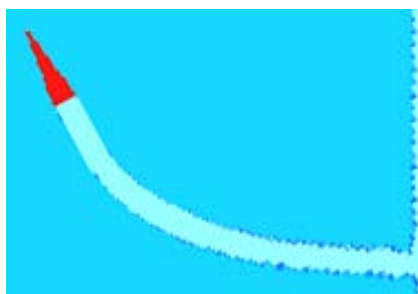
time: 2.001626e+000 Array: ro_aver Min/max: 1.000000e-003 : 1.000000e+001



$\alpha=2^\circ$



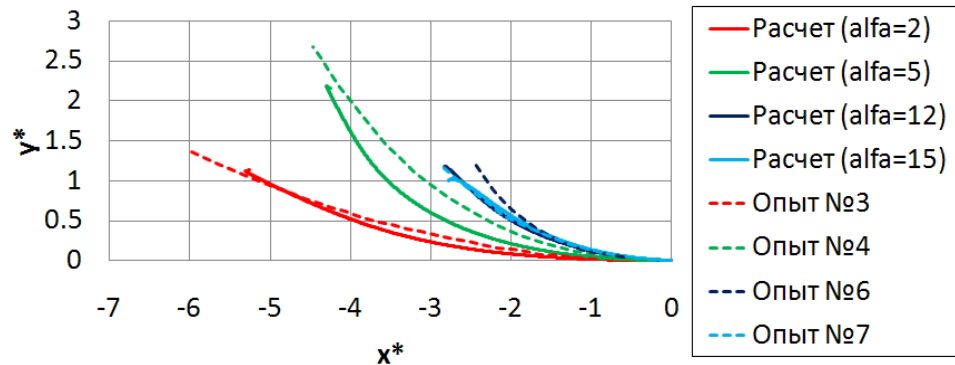
$\alpha=5^\circ$



$\alpha=12^\circ$



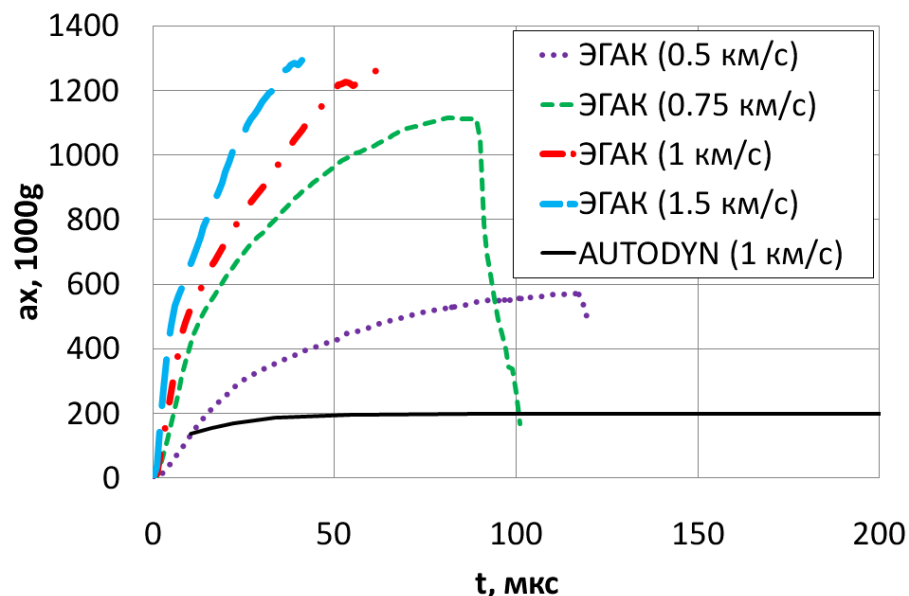
$\alpha=15^\circ$



Траектории движения центра масс ударника в опытах и расчетах при разных углах атаки

- Разработан и реализован в методике ЭГАК метод BODY-3D для расчета пространственного движения абсолютно твердого тела в упругопластической среде на неподвижной счетной сетке.
- Проведена верификация и валидация метода BODY-3D на модельных задачах и опытах, связанных с движением малодеформируемых ударников в упругопластических средах.
- Результаты расчетов хорошо согласуются «эталонными» численными решениями и экспериментальными данными.
- Перспектива использования предложенного подхода в сопряженных расчетах.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

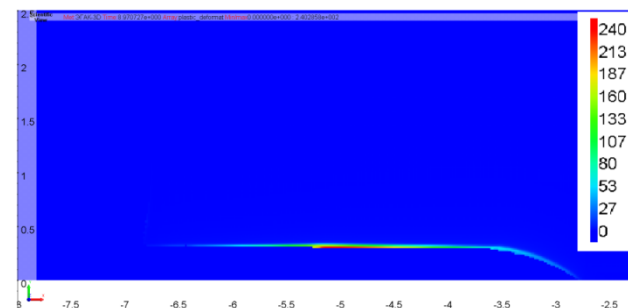


Зависимости ускорения торможения ударника от времени

Поле веществ

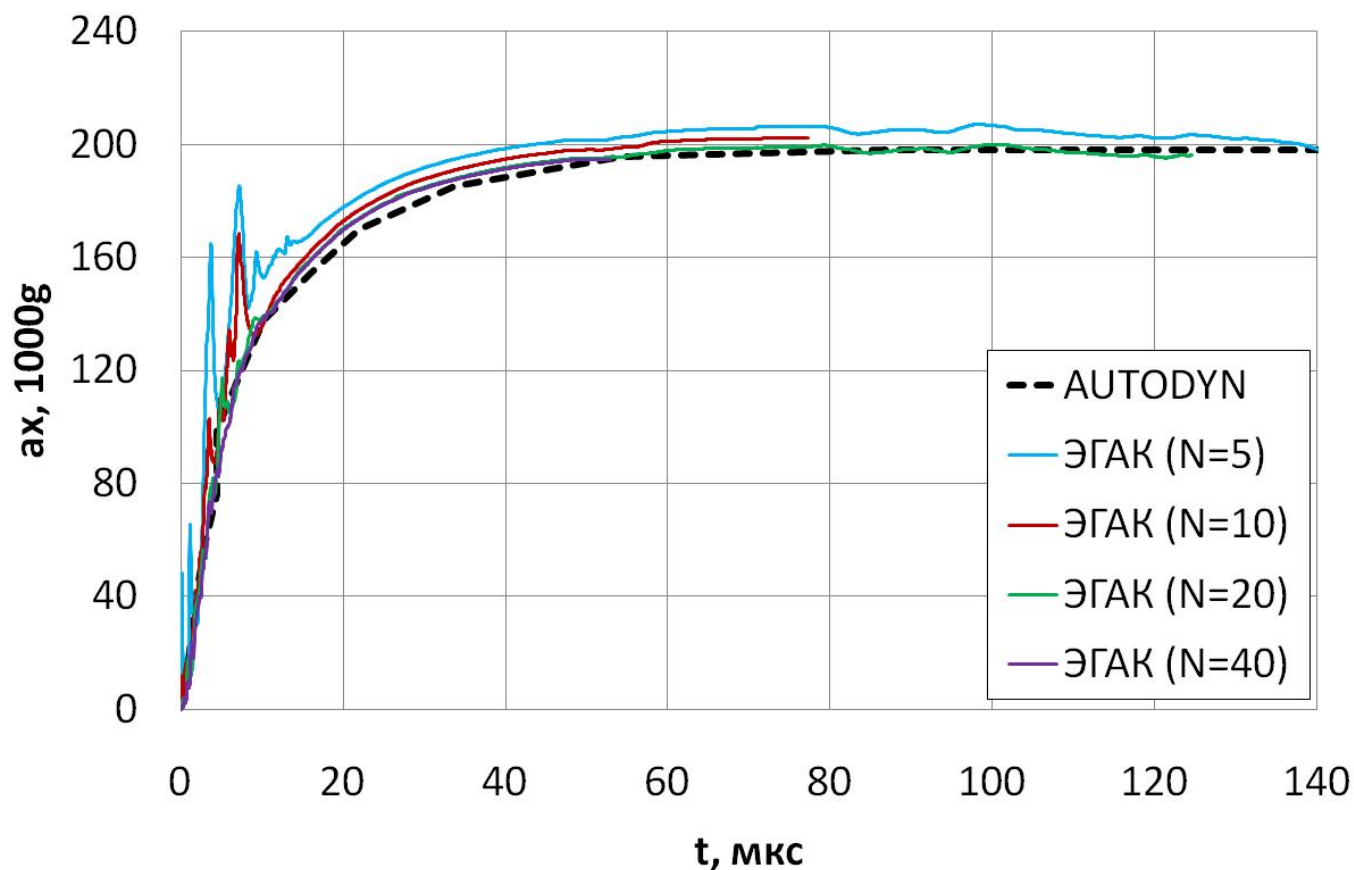


Поле интенсивности пластической деформации



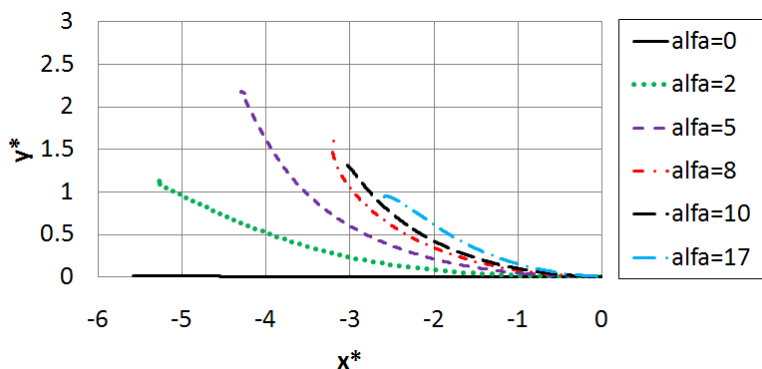
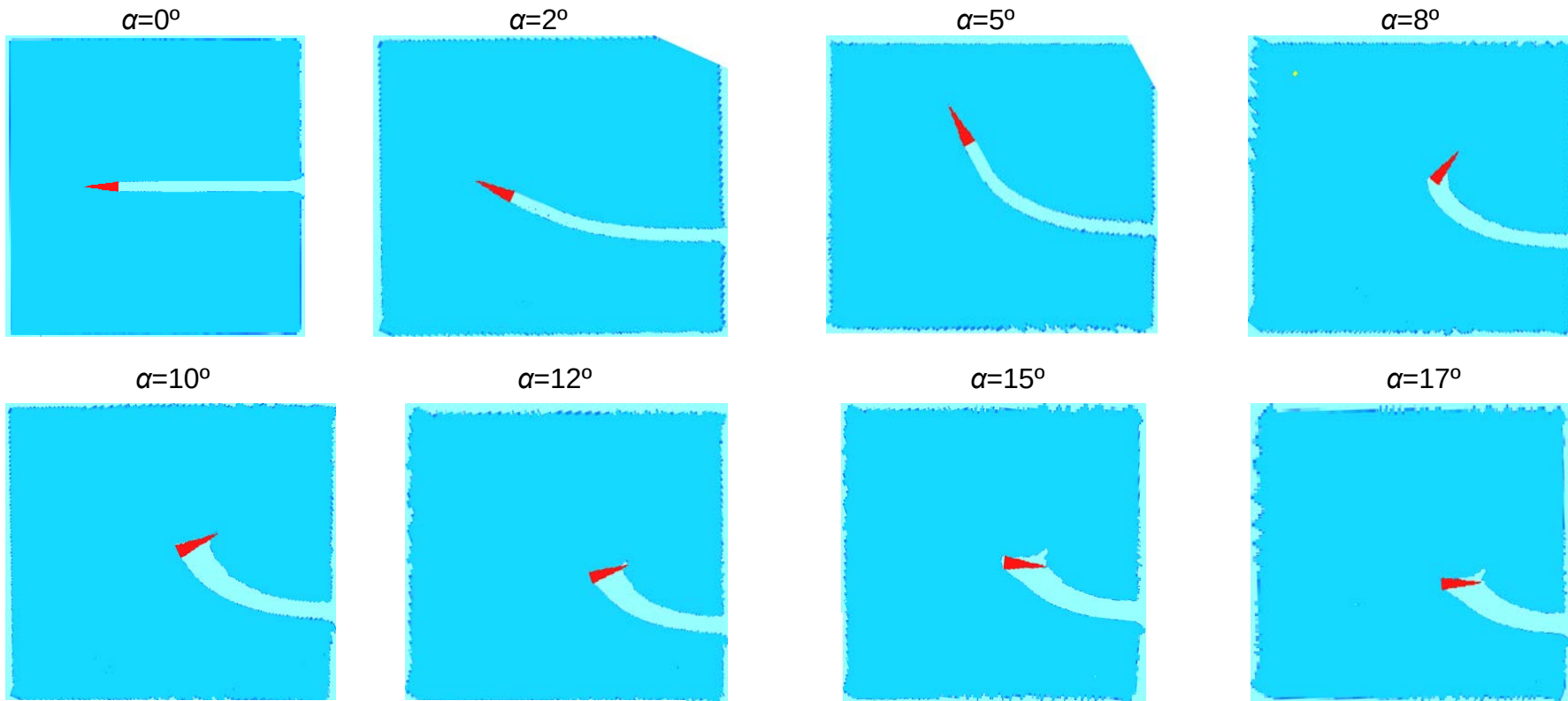
Рост ускорения торможения ударника по мере его заглубления связан с диссипацией энергии при пластическом деформировании тонкого слоя на поверхности каверны из-за эффекта «прилипания» при контакте материалов ударника и преграды в эйлеровом расчете!

N – количество ячеек на радиус ударника (абсолютно твердое тело).



Зависимости ускорения торможения ударника от времени при $V_0=1$ км/с

Каверны в преграде после остановки ударника



Траектории движения центра масс ударника при разных углах атаки