

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ

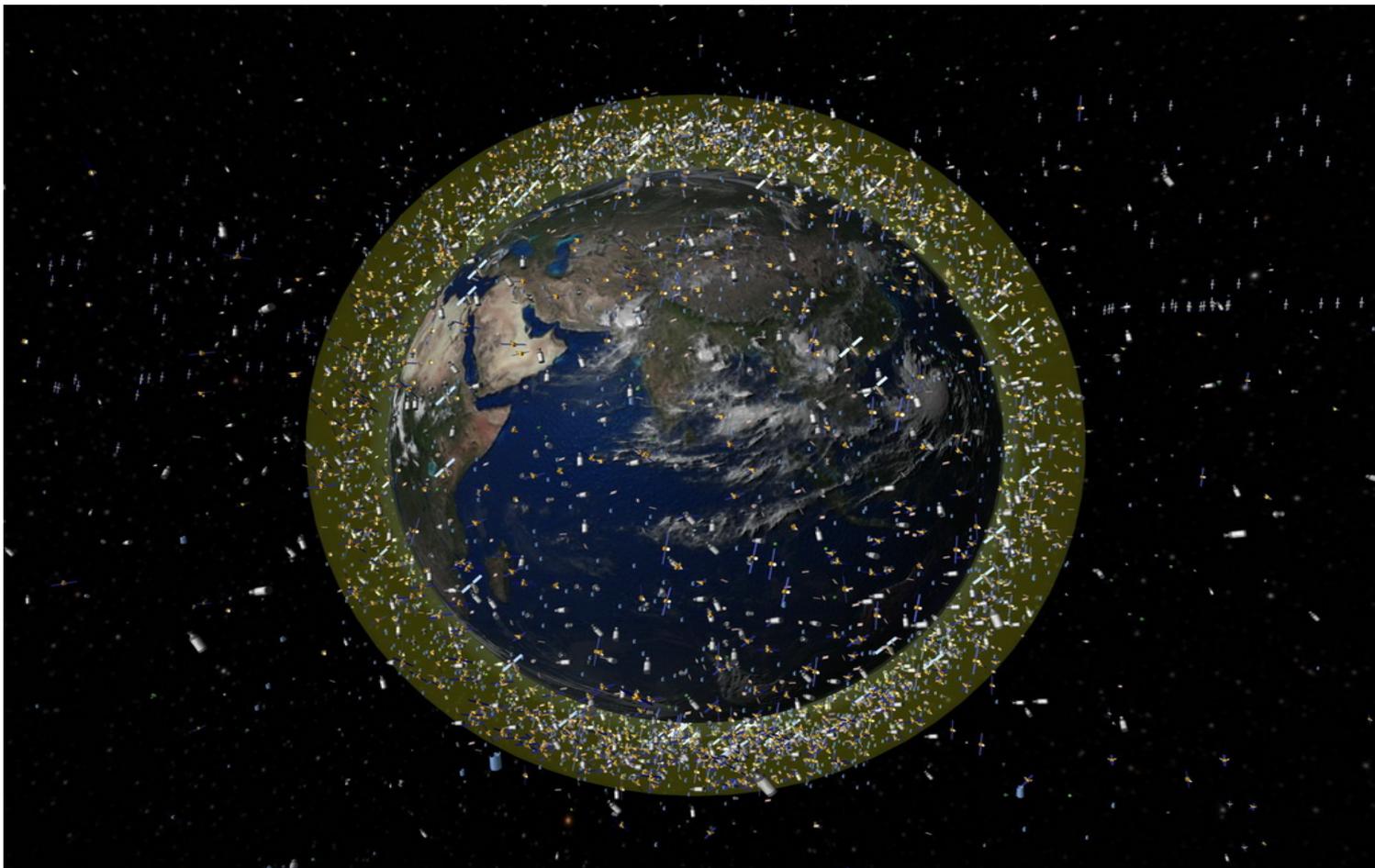
А.В. Герасимов

НИИ прикладной математики и механики Томского
государственного университета

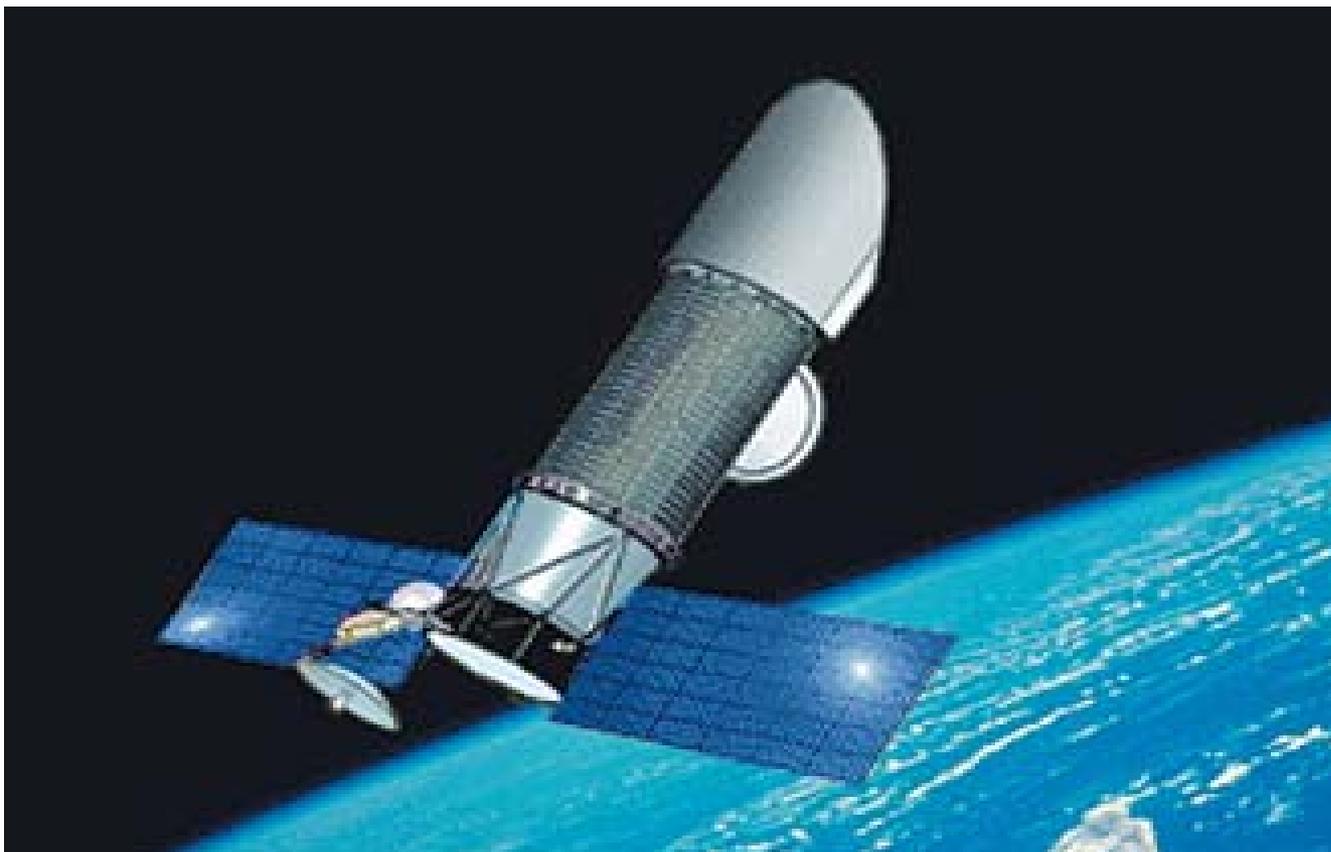


- **Большая насыщенность околоземного пространства техногенными осколками, образовавшимися при разрушении спутников, последних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и других аппаратов и устройств, представляет значительную опасность для автоматических и пилотируемых космических объектов. Значительное время полета космических аппаратов повышает для них вероятность столкновения с опасными высокоскоростными элементами. При столкновении корпусов космических аппаратов и осколков с большими скоростями может произойти пробитие защитных оболочек и нарушение нормального функционирования систем и аппаратуры спутников.**
- **Поэтому, численное моделирование высокоскоростного взаимодействия твердых тел позволяет воспроизвести, с приемлемыми затратами, характерные особенности физических процессов, протекающих при столкновении, рассмотреть и выбрать оптимальные схемы защиты.**
- **В работе, на основе решения модельных задач показано, что варьирование геометрических параметров, числа слоев, а также характера распределения физико-механических параметров используемых материалов по толщине защитной конструкции, позволяет влиять на напряженно-деформированное состояние пластин, уменьшать в них уровень напряжений и разрушений и получить, в итоге, защитную конструкцию, которая будет надежно работать и при более высоких скоростях. Также было показано влияние формы ударника на процесс его высокоскоростного взаимодействия с разнесенной преградой. Все это позволяет прогнозировать возможные способы защиты космических аппаратов от естественных и техногенных осколков.**

ЗОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСКОЛКОВ

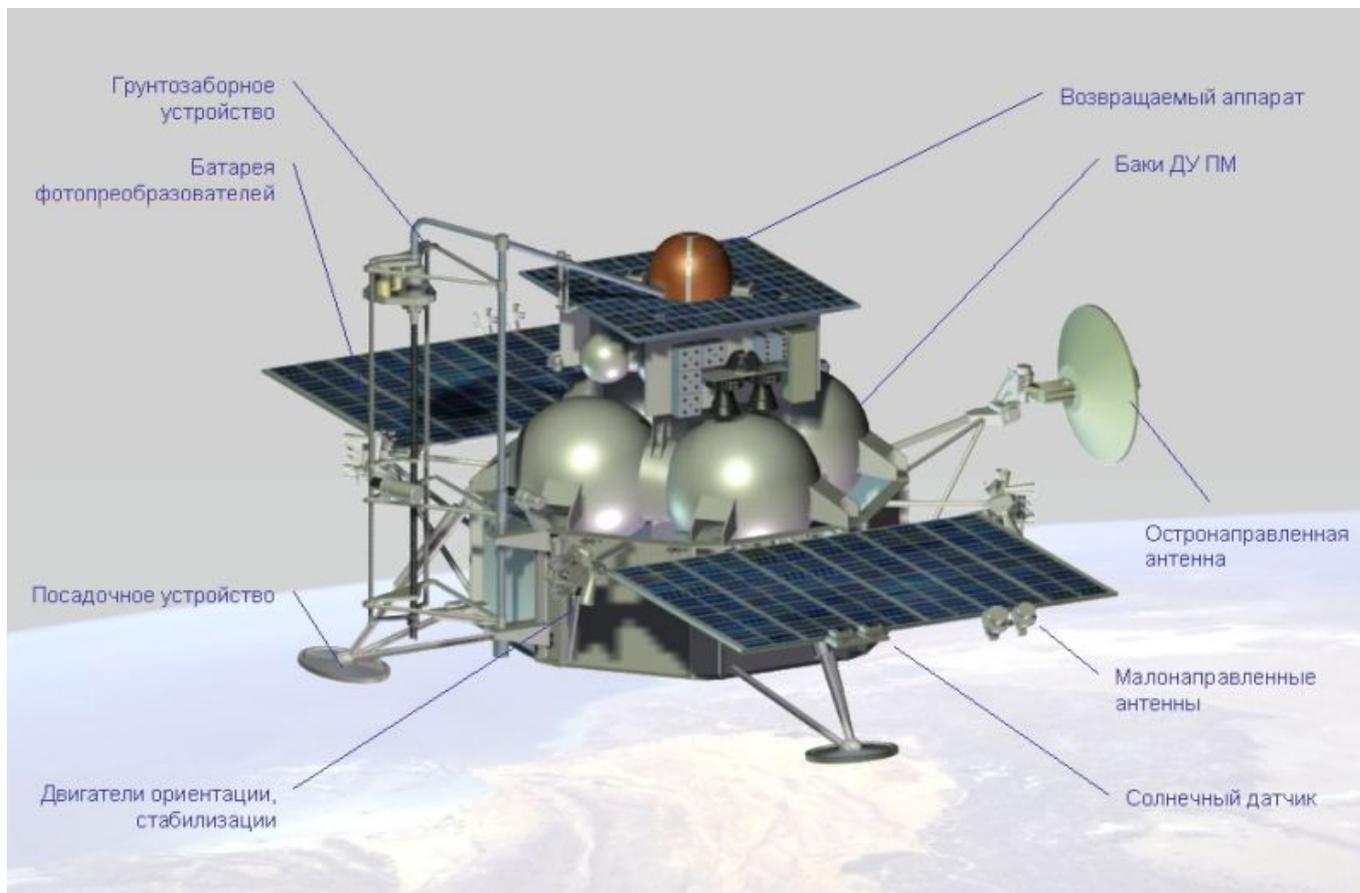


Спектр-УФ” - орбитальная обсерватория, в задачи которой входит изучение Вселенной в ультрафиолетовом диапазоне.

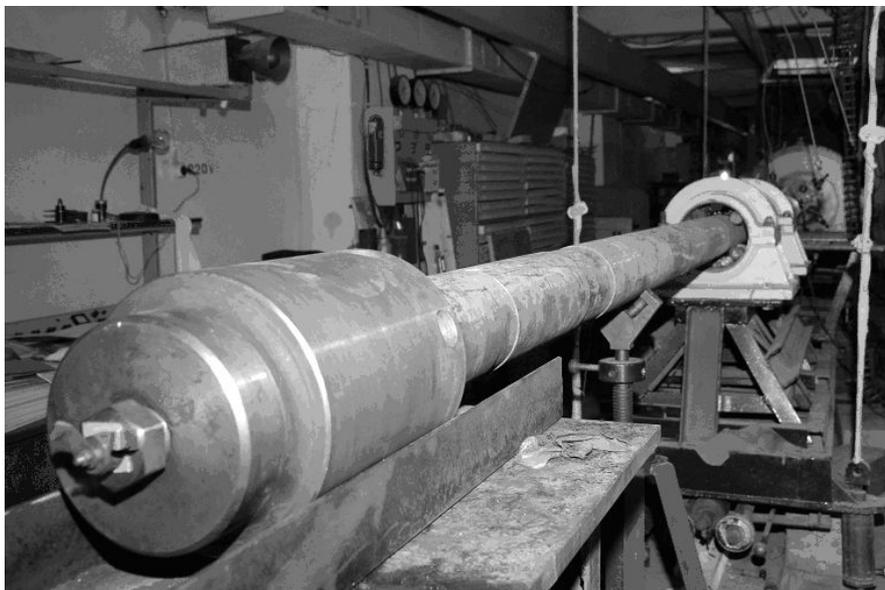


Вид аппарата “Спектр-УФ”

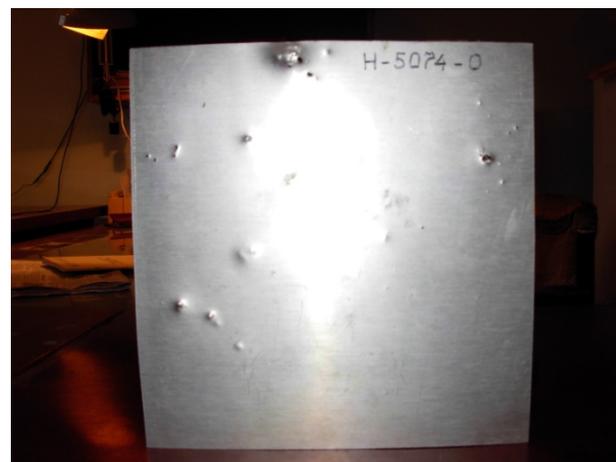
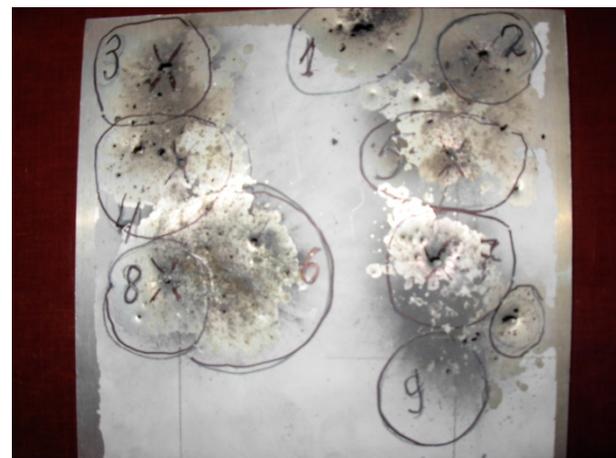
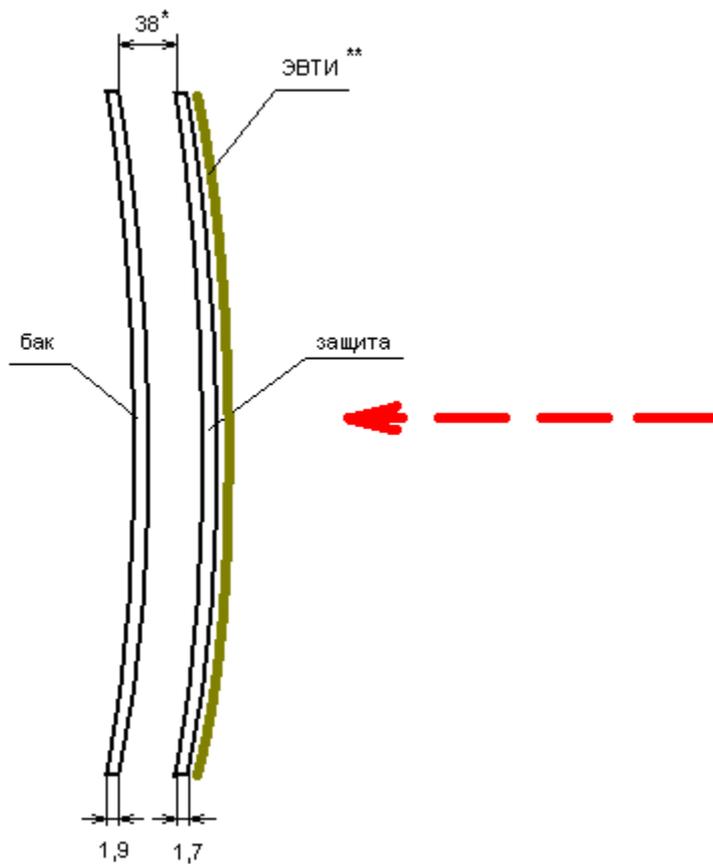
ФОБОС-ГРУНТ



ЛЕГКОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ



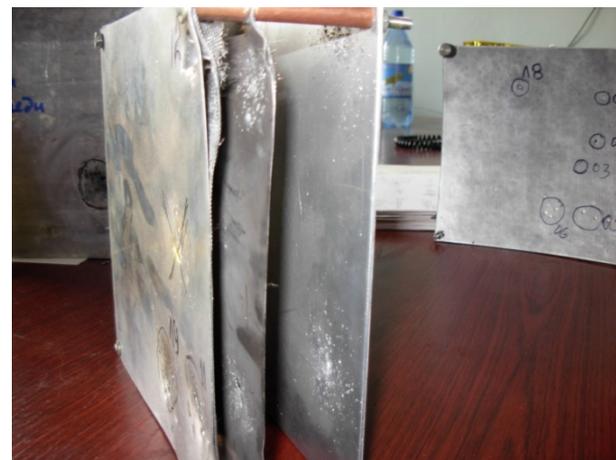
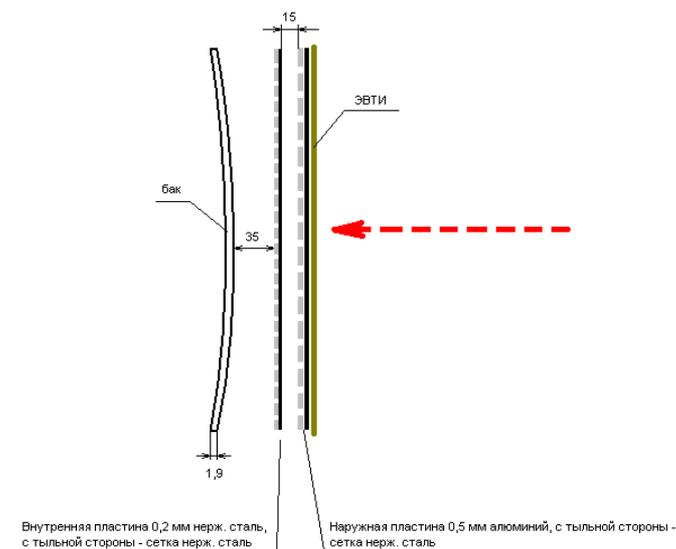
ФРАГМЕНТ БАКА С ЭЛЕМЕНТОМ ЗАЩИТЫ



СЕТОЧНАЯ ЗАЩИТА



ЗАЩИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНАЦИИ СПЛОШНЫХ И СЕТОЧНЫХ ПЛАСТИН



P.S. Если найдется 2 мм лист АМг6, он будет ставиться вместо "бака"

Уравнение неразрывности

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0;$$

Уравнения движения

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j};$$

Уравнение энергии

$$\rho \frac{dE}{dt} = S_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt},$$

Определяющие соотношения

$$2\mu\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right) = \frac{DS_{ij}}{Dt} + \lambda S_{ij};$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik}\omega_{jk} - S_{jk}\omega_{ik};$$

$$2\omega_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i};$$

$$2e_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i},$$

Условие пластичности

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} \sigma^2,$$

Уравнение состояния

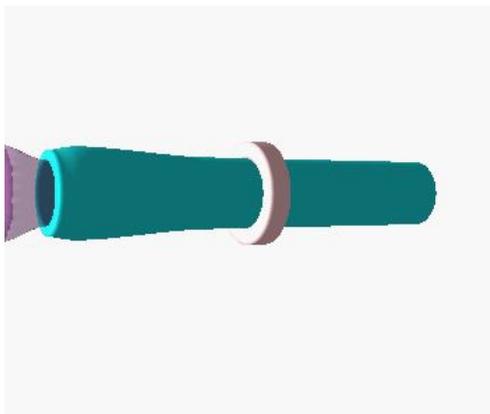
$$P = \frac{K(1 - \Gamma_0 \xi / 2)}{(1 - c\xi)^2} \xi + \rho_0 \Gamma_0 E, \quad \xi = 1 - \rho_0 / \rho$$

Естественная гетерогенность структуры материала пластин и техногенных осколков, влияющая на распределение физико-механических характеристик (ФМХ) материала, является одним из основных факторов, определяющих характер разрушения реальных материалов. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при использовании случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения (моделирование начальных дефектных структур материала).

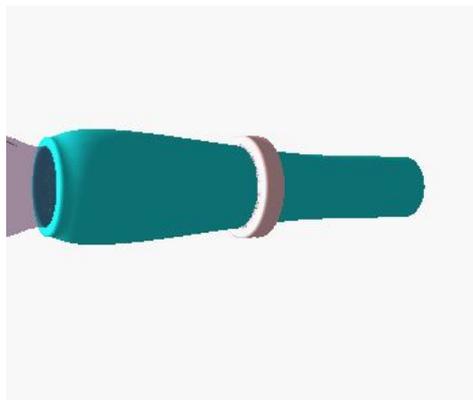
- **Используемые в современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают вероятностного фактора в задаче дробления твердых тел, что может существенно исказить реальную картину ударного и взрывного разрушения рассматриваемых объектов. Последнее особенно проявляется при решении осесимметричных задач, где все точки по окружной координате рассчитываемого элемента исходно равноправны в силу используемых при численном моделировании стандартных уравнений механики сплошных сред. На практике, однако, имеется широкий ряд задач, где фрагментация является преимущественно вероятностным процессом, например, взрывное разрушение осесимметричных оболочек, где характер дробления заранее неизвестен, пробитие и разрушение тонких преград ударником по нормали к поверхности, так называемое «лепесткование», и т.д.**

- **Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в физико-механические характеристики тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным, используемым в данной работе.**

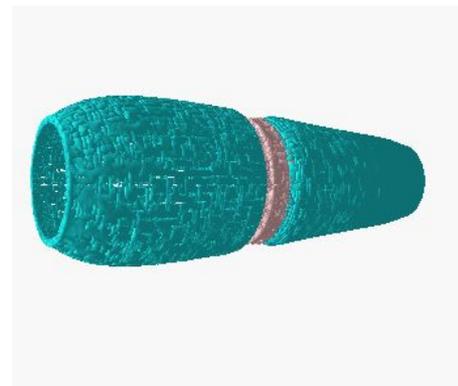
Эволюция оболочки и кольца в процессе расширения представлена далее на рисунках (начиная с 30 мкс, продукты детонации не показаны). При решении данной задачи, для моделирования начальных неоднородностей применялся следующий подход-распределение предельного значения эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области по нормальному закону распределения с дисперсией 10-процентного отклонения.



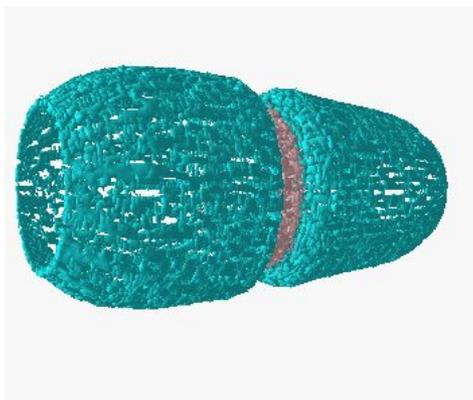
10 мкс



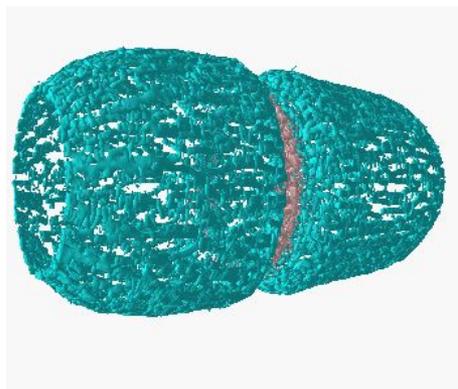
20 мкс



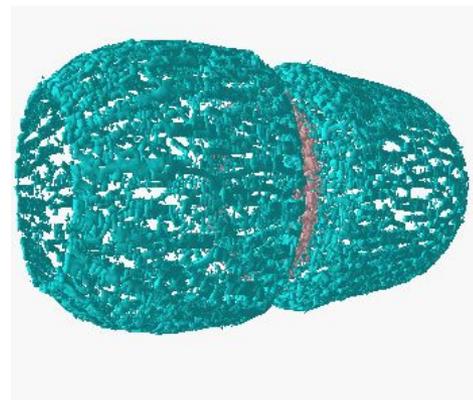
40 мкс



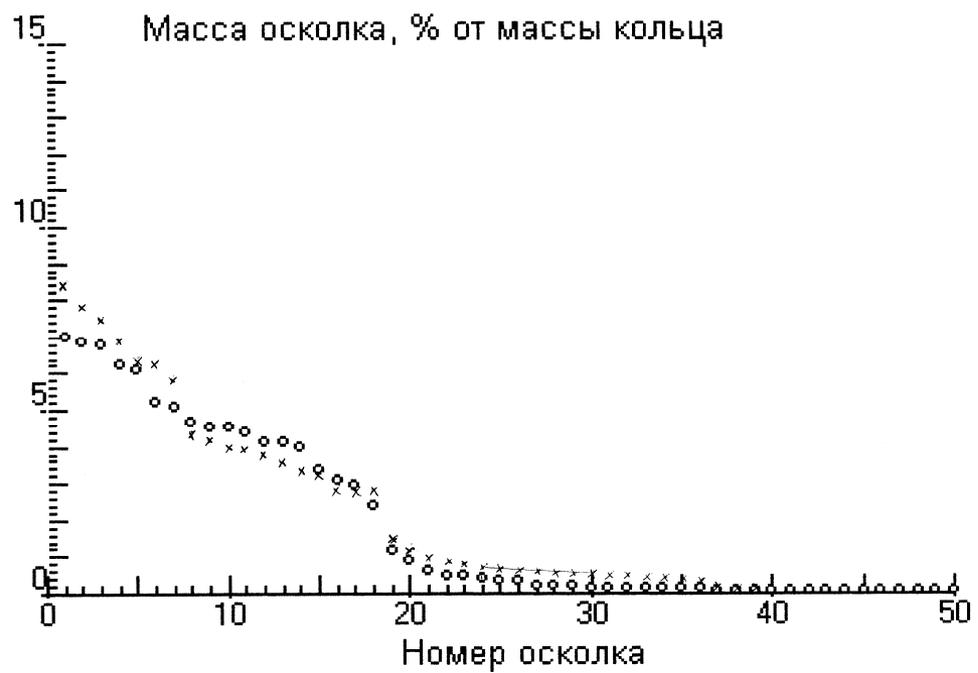
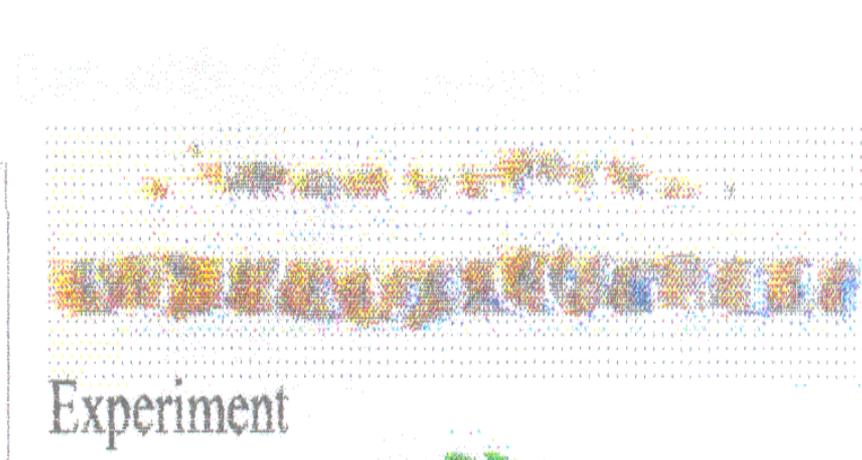
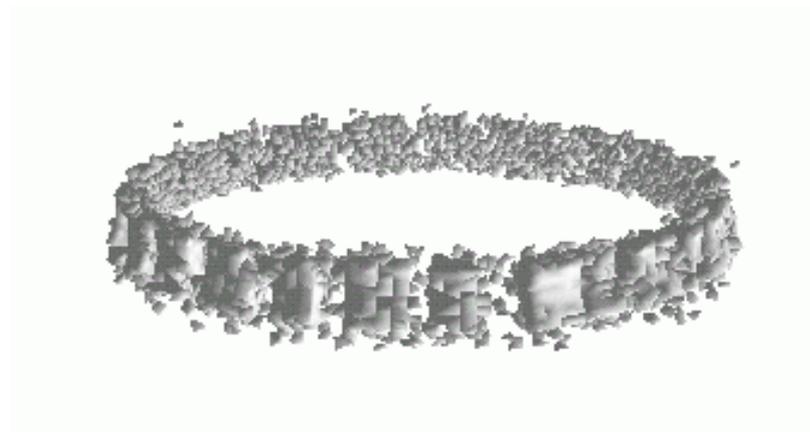
60 мкс



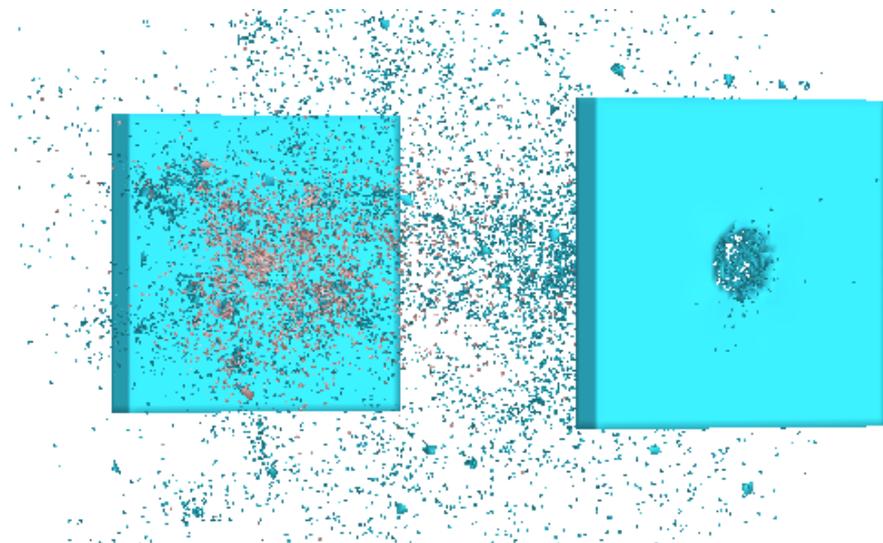
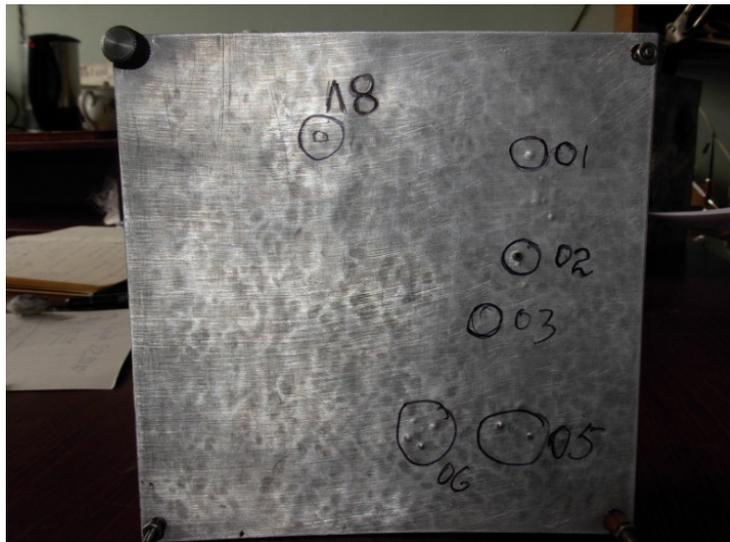
70 мкс



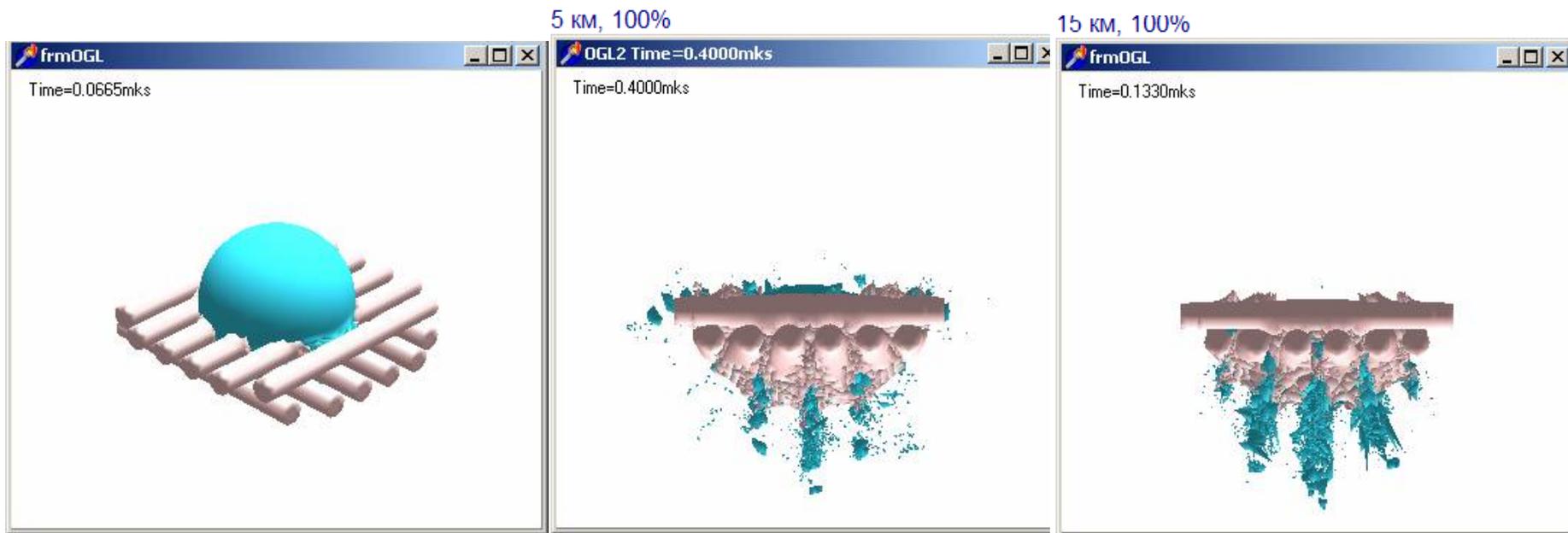
75 мкс



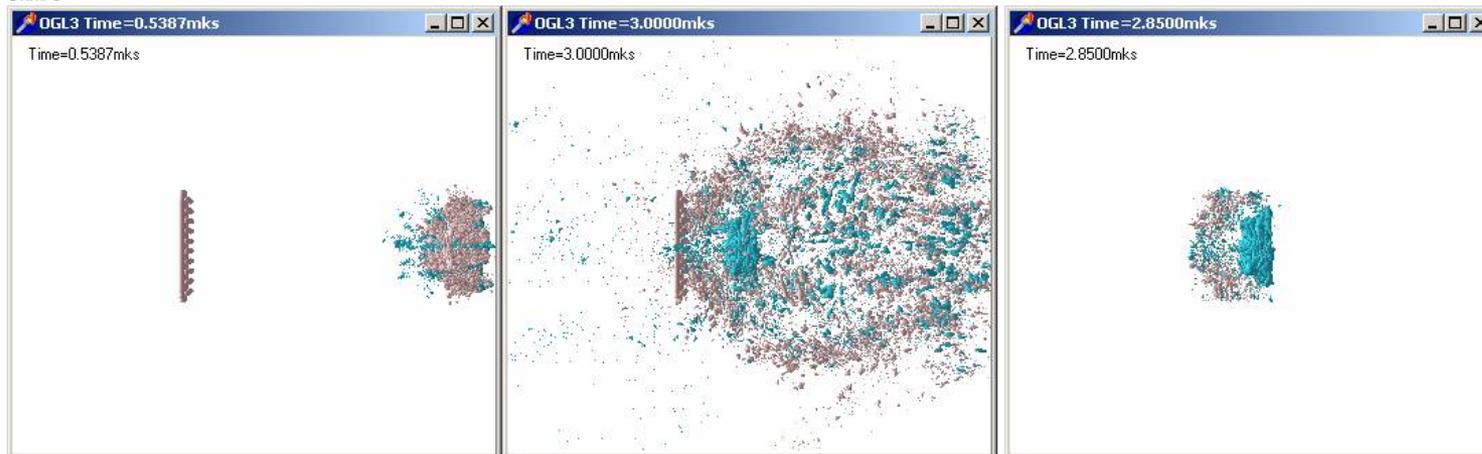
**Преграда: Al –Al. Толщина пластины - 0,17 см
и 0,19 см, размер 1,25 см × 1,25 см, Расстояние между пластинами – 3,8
см. Стальной шарик: радиус – 0,1 см, Скорость=2100м/с**



ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЕТКА - УДАРНИК

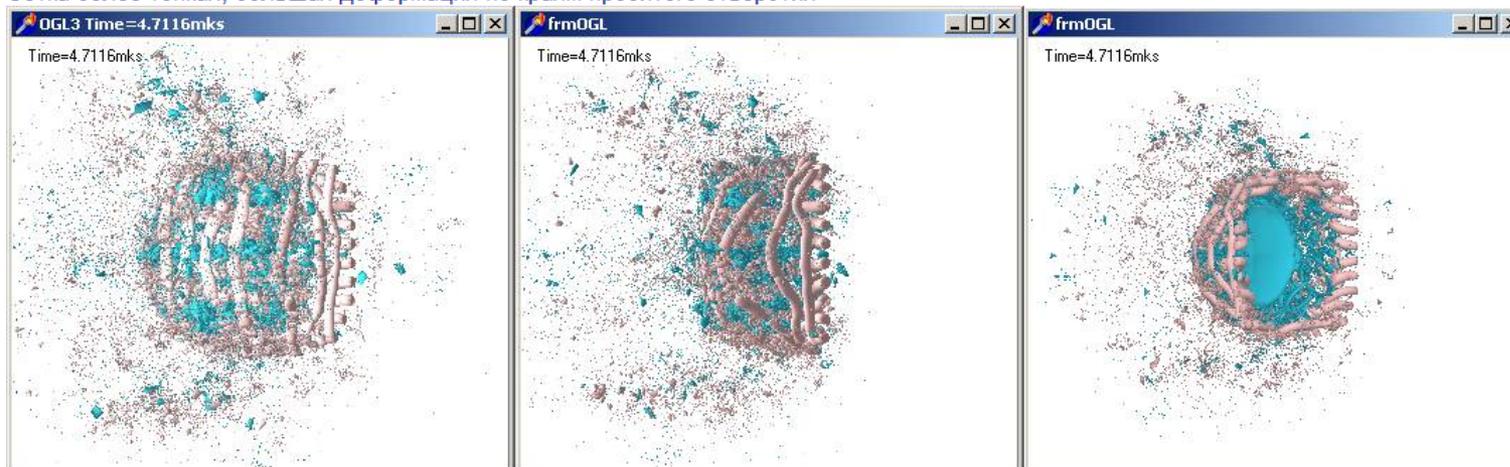


5km/c

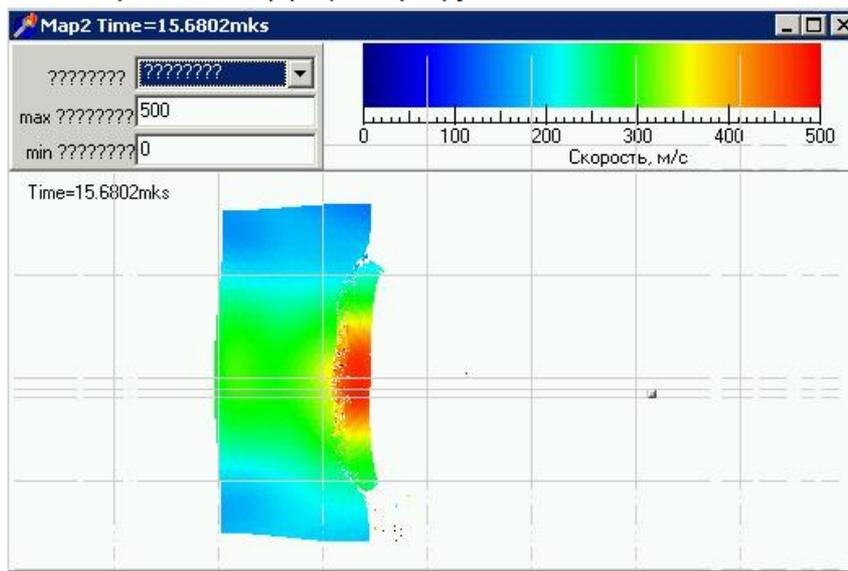


Обрезка по итогам запись

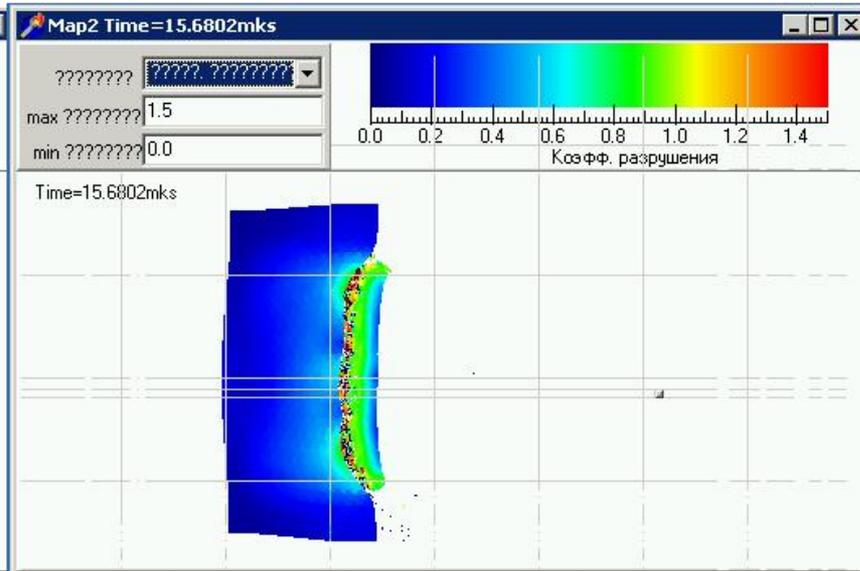
5км, вторая преграда, вид с тыльной стороны(под углом), сбоку и с лицевой(под углом), фактически уже после пробития
Сетка более тонкая, большая деформация по краям пробитого отверстия



Скорость соударения - 5 км/с: а – распределение скорости
 $t=15.6002$ мкс; б – распределение коэффициента разрушения
 $t=15.6002$ мкс

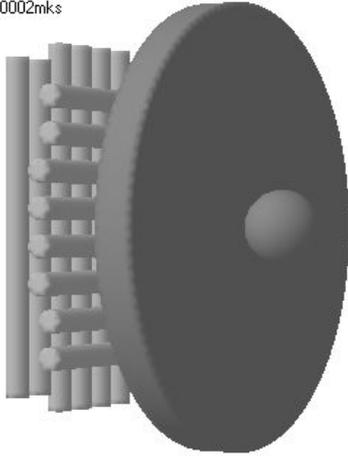


а



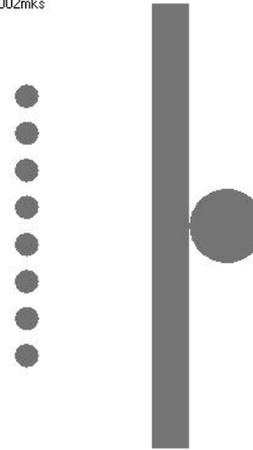
б

Time=0.0002mks



а

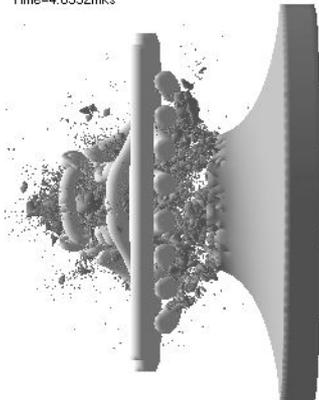
Time=0.0002mks



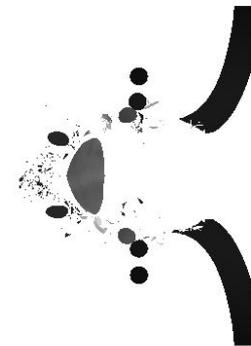
б

Начальная конфигурация (а) и 2-D сечение(б) второй двухслойной преграды (алюминиевая пластина - стальная сетка)

Time=4.8592mks

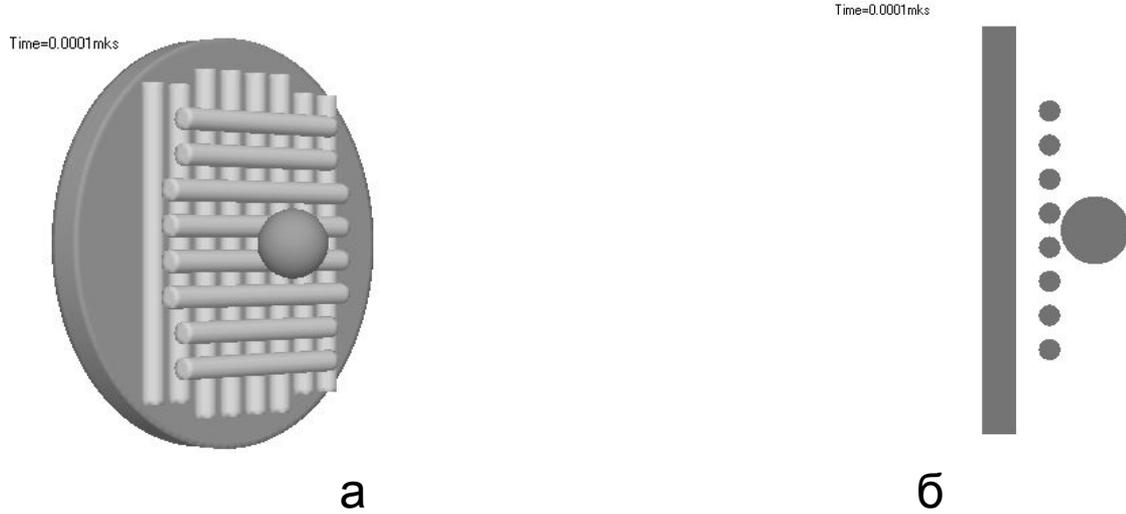


а

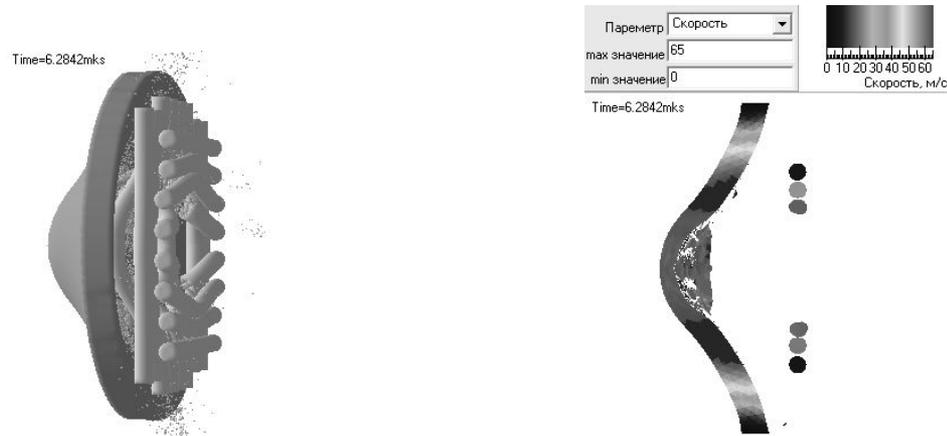


б

Конфигурация системы (а) и распределение скорости (б) в системе (2-D разрез) в момент времени $t=4,8592$ мкс при соударении со скоростью $V=3000$ м/сек

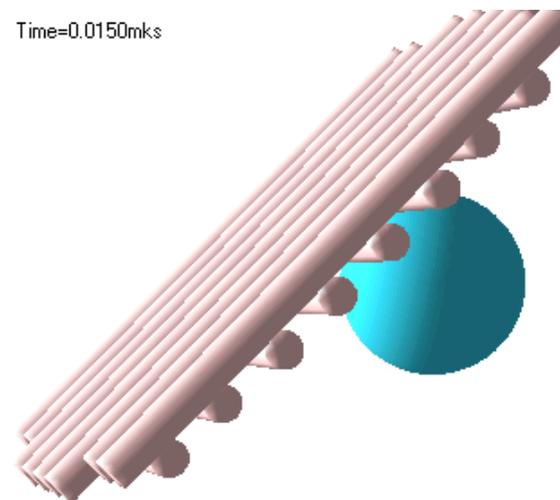
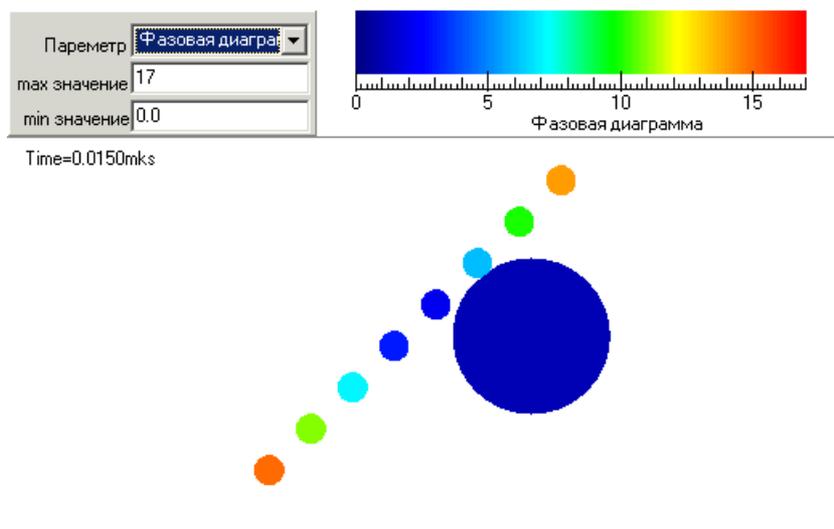


Начальная конфигурация (а) и 2-D сечение(б) первой двухслойной преграды (стальная сетка -алюминиевая пластина)

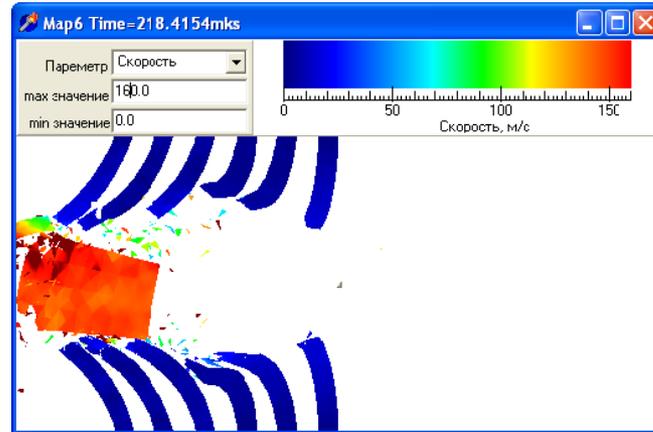
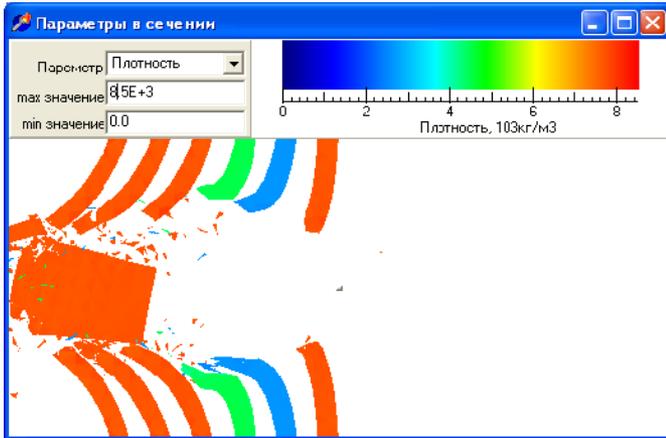
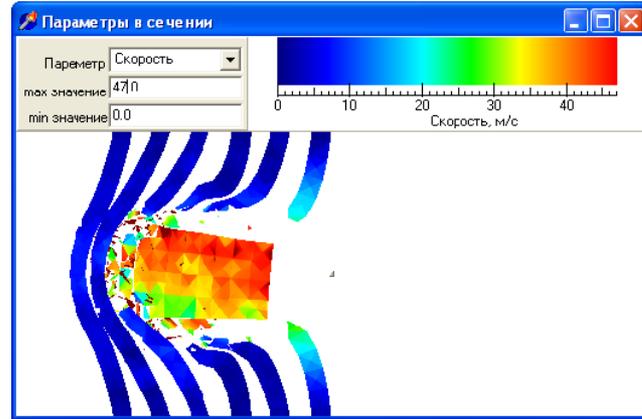
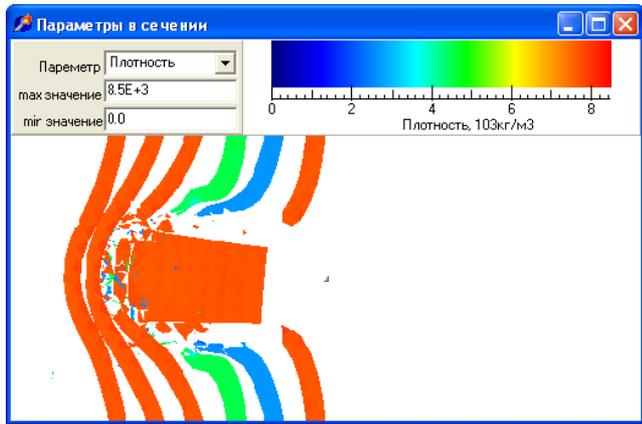


Конфигурация системы (а) и распределение скорости (б) в системе (2-D разрез) в момент времени $t=6,2842$ мкс при соударении со скоростью $V=3000$ м/сек

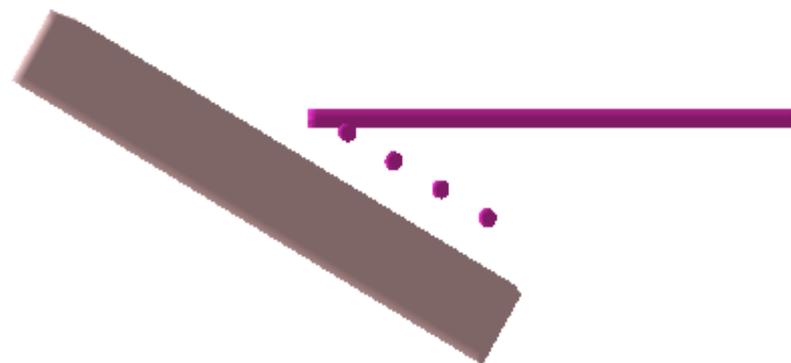
Удар частицы по наклонной сетки



Преграда: сталь-алюминий-титан - сталь-сталь-сталь. Толщина пластин – 0,5 см, радиус – 4 см, расстояние между пластинами - 0,5 см. Стальные ударники : длина - 4 см, радиус – 1 см



В работе рассматривается взаимодействие ударников с метаемыми взрывом пластинами и стержнями. При контакте стержни и ударник образуют крестообразную конфигурацию. Деформация и разрушение ударников снижает их проникающую способность и возможность поразить объект.



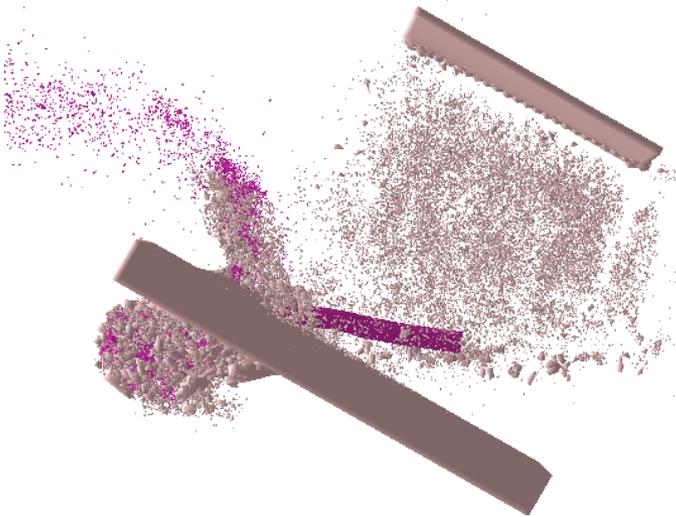
Результаты моделирования

Длина ударника 0,654 м, радиус 0,012 м, скорость $V=1500$ м/с. В первом случае навстречу ударнику метались стальные пластины различной толщины, во втором - пластины из вольфрамового сплава также разной толщины. Во всех вариантах скорость метаемых пластин равнялась 1000 м/с и была направлена по нормали к преграде.

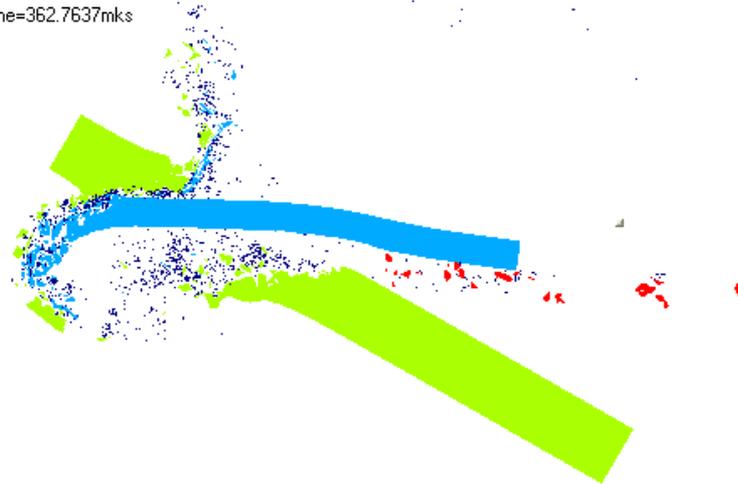
Стальная пластина

$$H = 0,5R$$

Time=362.7637mks



Time=362.7637mks

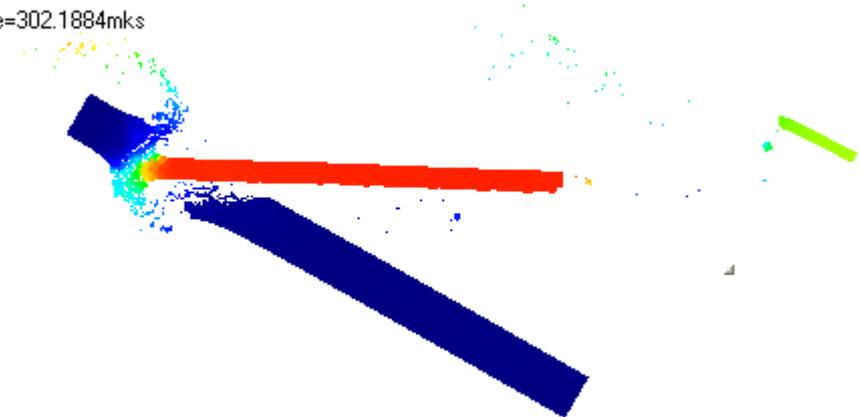


$$H = R$$

Time=302.1884mks



Time=302.1884mks

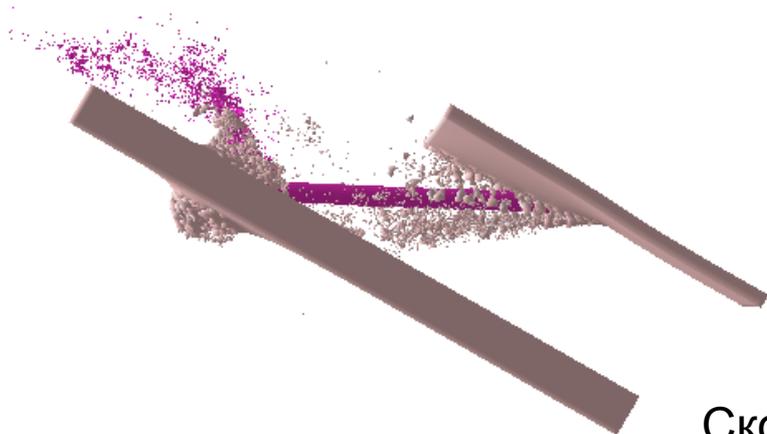


Скорость пластины 1000 м/с

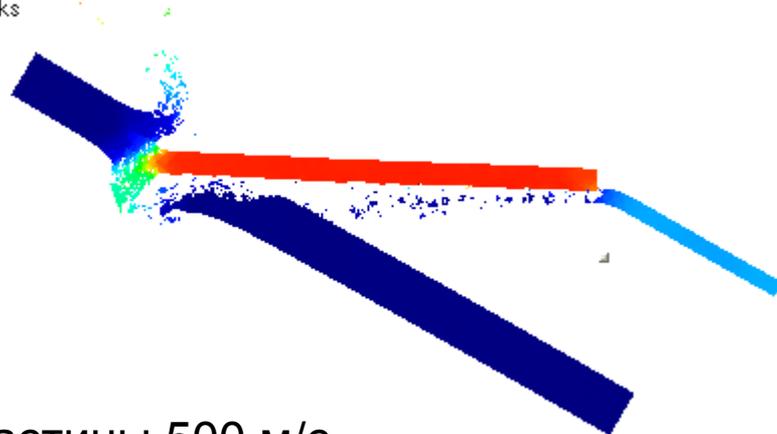
Стальная пластина

$$H = 1,4R$$

Time=279.2571mks

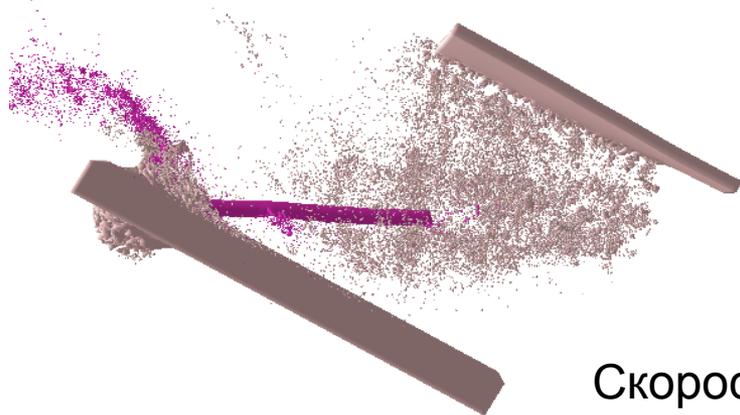


Time=279.2571mks



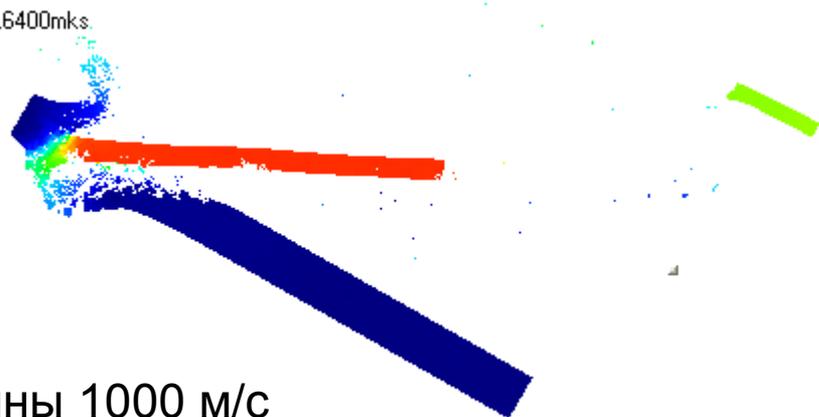
Скорость пластины 500 м/с

Time=348.6400mks



$$H = 1,4R$$

Time=348.6400mks



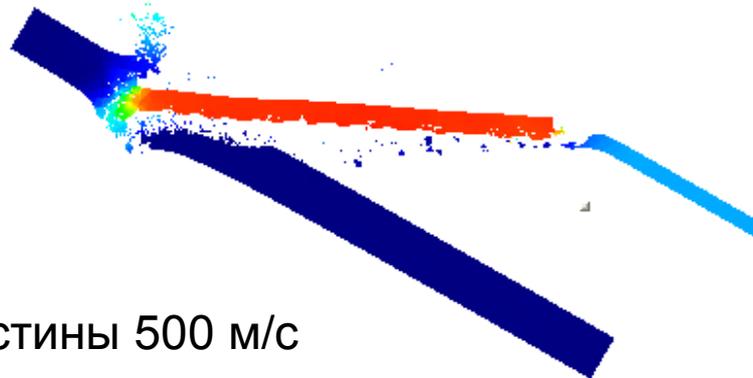
Скорость пластины 1000 м/с

ВНЖ- пластина $H = 1,4R$

Time=297.7989mks

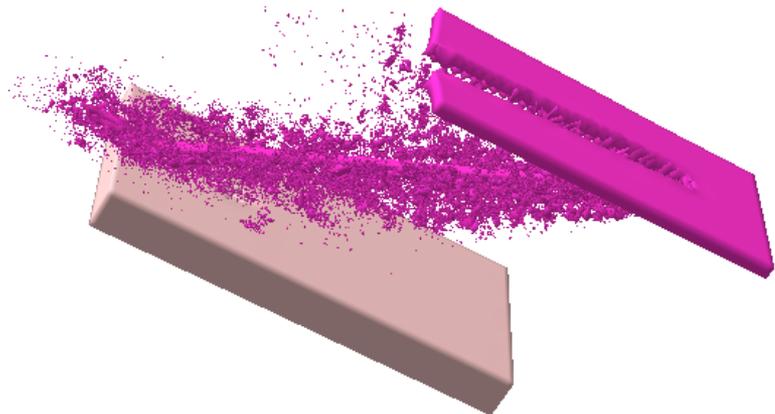


Time=297.7989mks

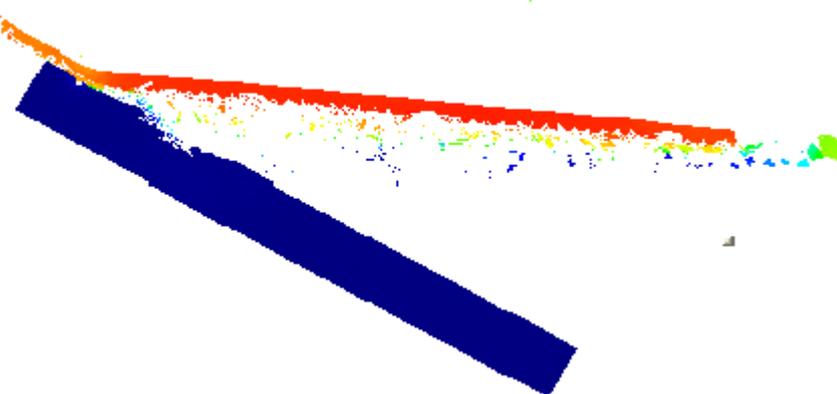


Скорость пластины 500 м/с

Time=228.1338mks



Time=228.1338mks

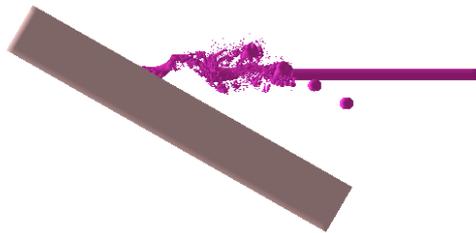


$H = 1,4R$

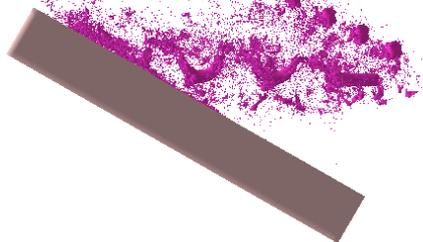
Скорость пластины 1000 м/с

$$R_{ст} = R_{уд}$$

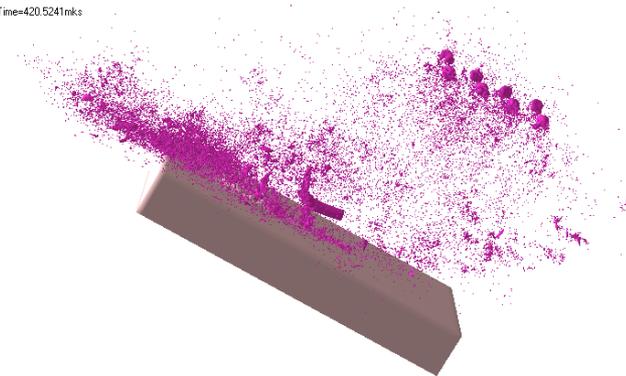
Time=80.3428mks



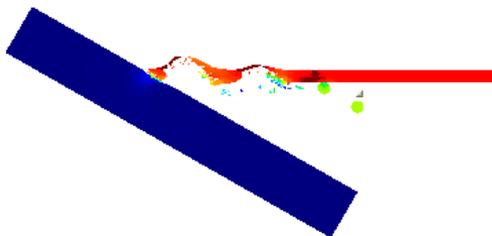
Time=223.0091mks



Time=420.5241mks

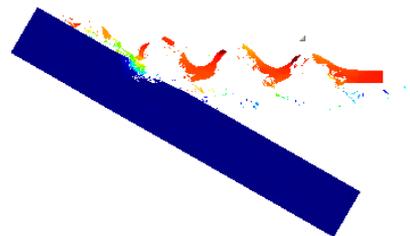


Time=80.3428mks

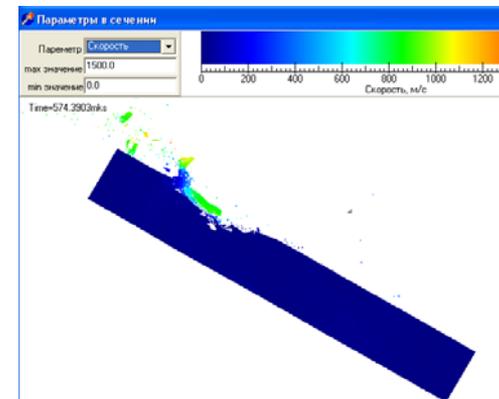


80 МКС

Time=223.0091mks

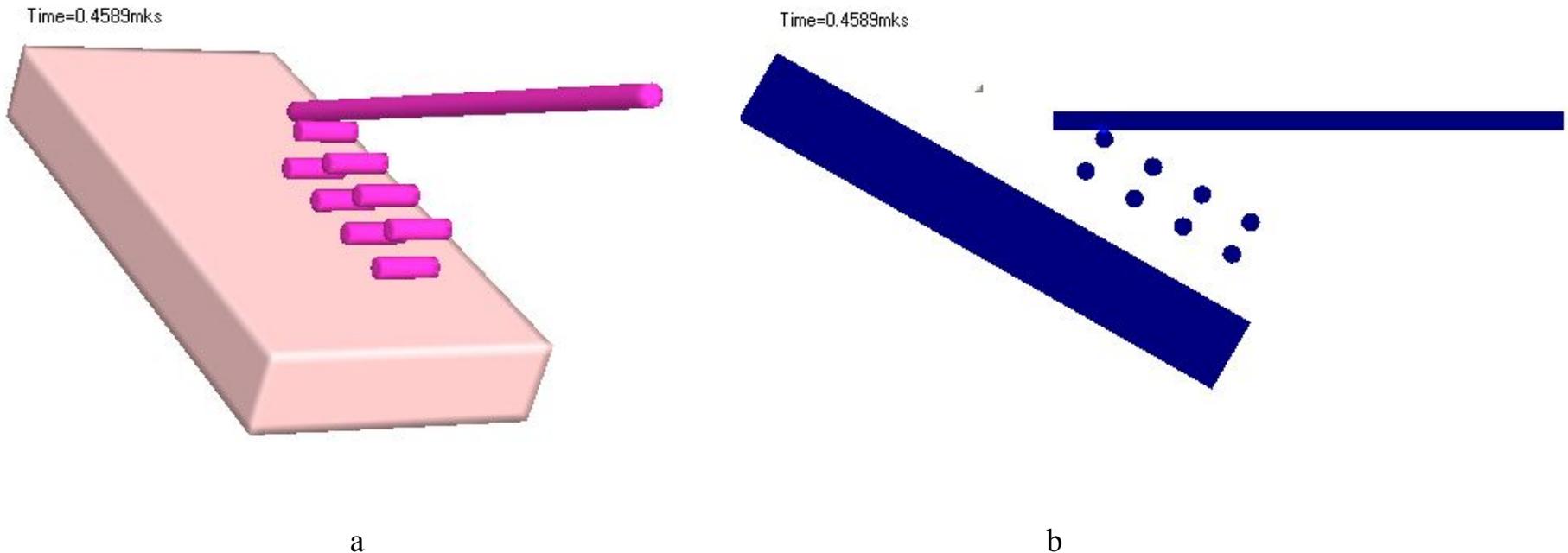


223 МКС



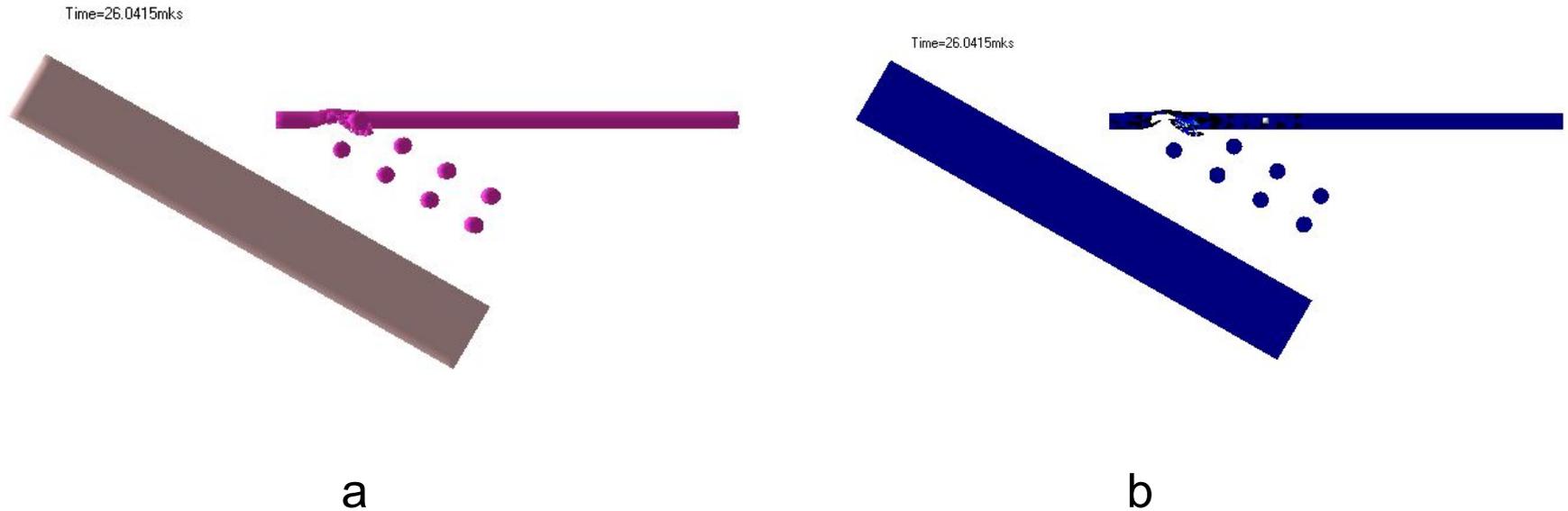
574 МКС

The next slide demonstrates the interaction of the spaced-apart rods with a high-speed projectile. In this case, we observe an intensive destruction and a sharp decrease in the destructive capability of the projectile.

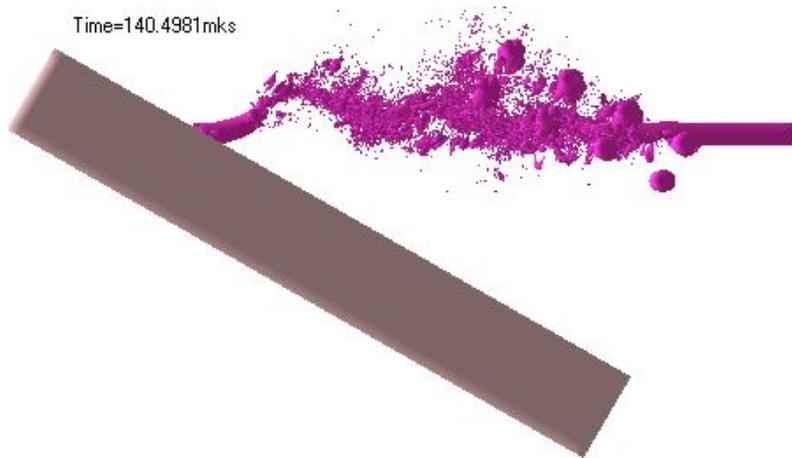


a) The initial configuration of "barrier - rods- projectile" system. Three-dimensional pattern. b) 2-D cross-section of a three-dimensional computational domain.

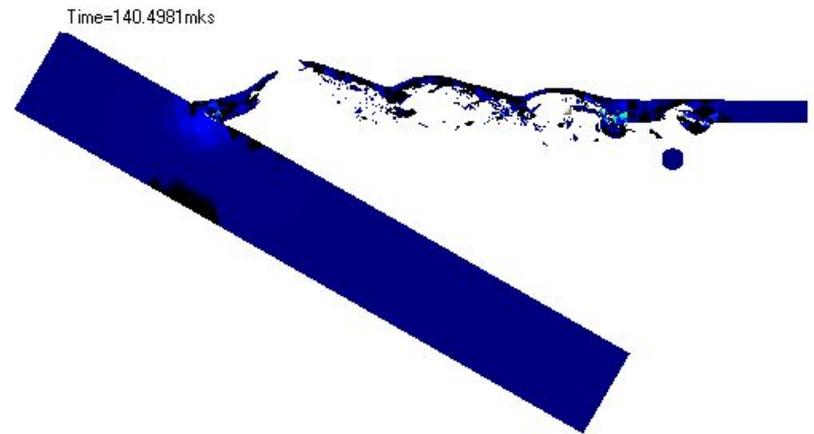
The next figures show the interaction of the projectile with the rods



a) 3-D configuration of "barrier - rods- projectile" b) 2-D cross-section of a three-dimensional computational domain, time = 26 μ sec.



a

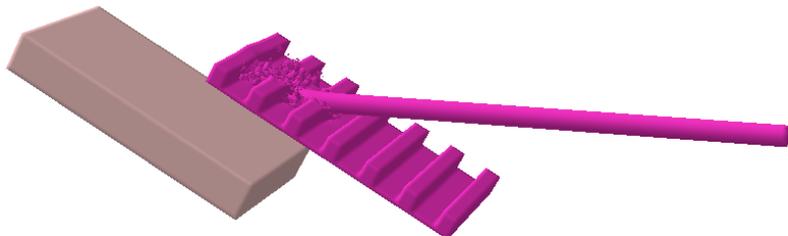


b

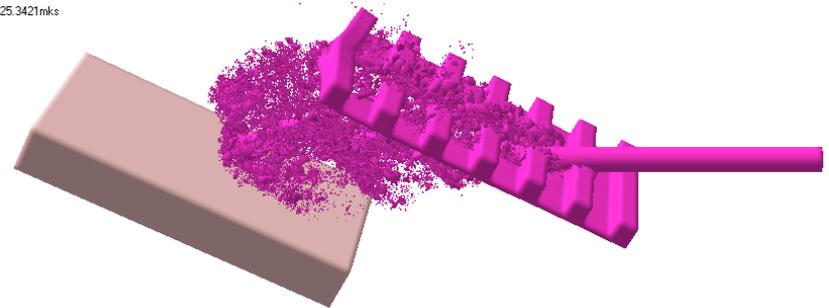
a) 3-D configuration of "barrier - rods- projectile" b) 2-D cross-section of a three-dimensional computational domain, time = 140 μ sec.

Ребристая пластина

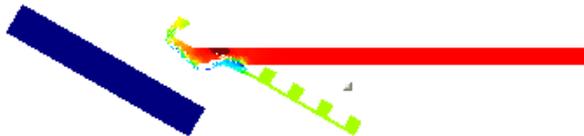
Time=46.4168mks



Time=125.3421mks



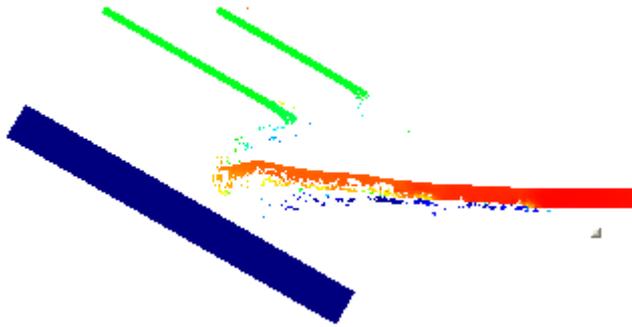
Time=46.4168mks



Time=125.3421mks



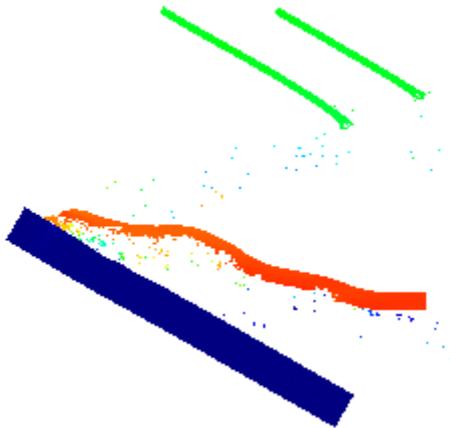
Time=150.4679mks



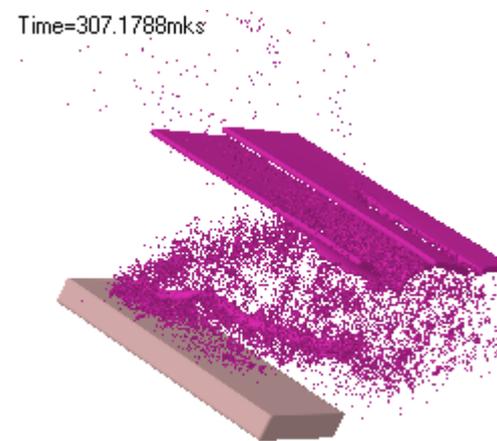
Time=150.4679mks

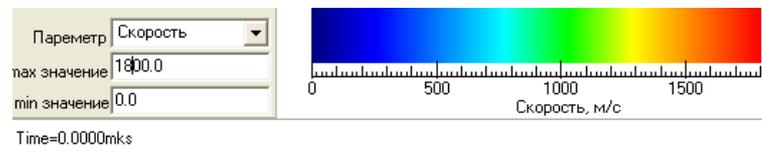


Time=307.1788mks

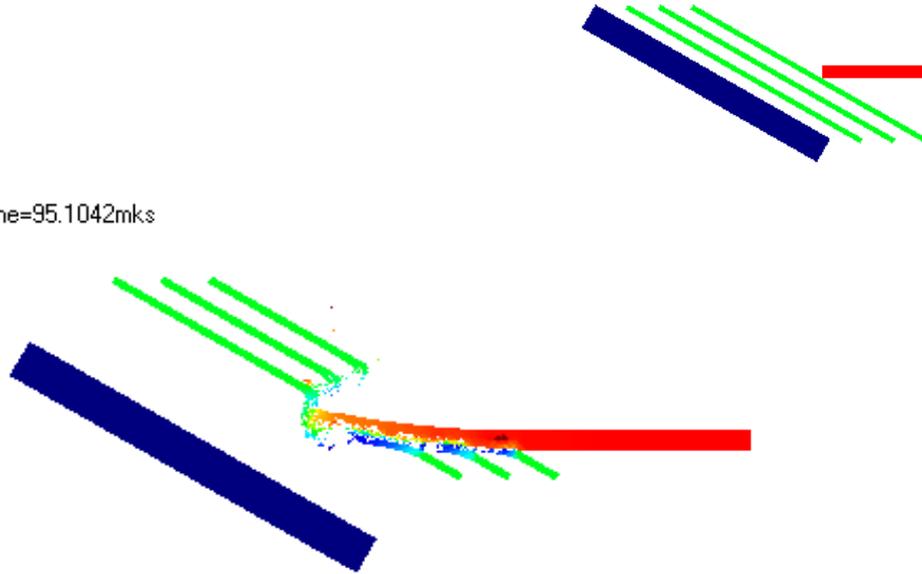


Time=307.1788mks





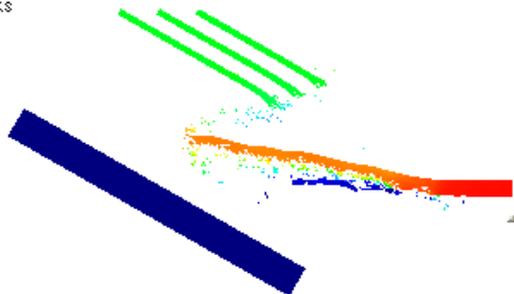
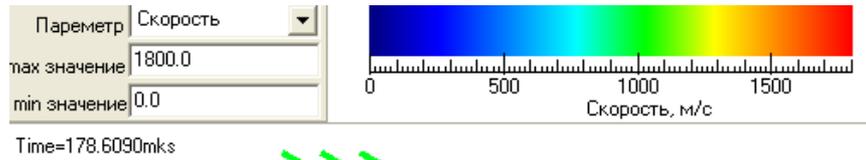
Time=95.1042mks



Time=95.1042mks



Time=178.6090mks



Спасибо за внимание!