



# Конечно-элементное моделирование прочности плетеных конструкций при динамическом ударе

ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Направление: 150300 «Прикладная механика»

Выполнила: КОКОВЦЕВА А. В.

Руководитель: БОРОВКОВ А. И.

Соруководитель: КЛЯВИН О. И.

Рецензент: МИХАЙЛОВ А. А.

Санкт-Петербург  
2013 г.



## Проблематика и особенности моделирования

1. По официальным данным ИКАО за период с 2001 по 2007 гг. было зарегистрировано 42508 случаев столкновений;
2. Для гражданских вертолетов, по статистике, 40 % столкновений приходится на двигатели;
3. Рассматривается предложение использовать защитные металлические плетеные конструкции для предотвращения попадания птиц в компрессоры двигателей;
4. Требуется выполнение численного моделирование с учетом высокой скорости протекания процессов.



## Цели работы

1. Изучение методов конечно-элементного моделирования динамической задачи контактного взаимодействия птицы и металлической плетеной конструкции;
2. Конечно-элементное решение прочностной задачи столкновения птицы с плетеной конструкцией на высокой скорости.



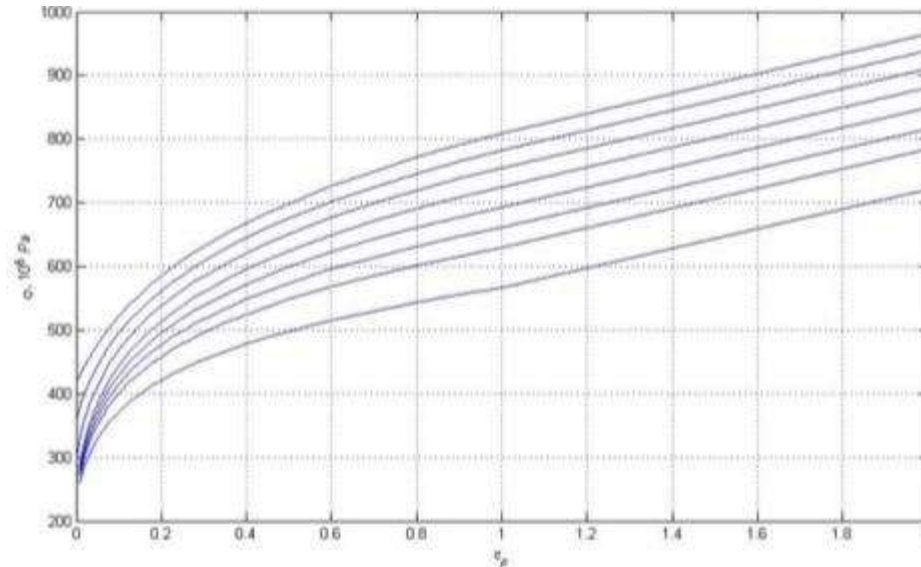
## Модельная задача

Решение задачи позволяет определить особенности свойств материала, которые необходимо учесть при численном моделировании.

1. Линейно-упругий изотропный материал:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \frac{1}{E} \left( (1 + \nu) \cdot \underline{\underline{\sigma}} - \nu \cdot 3p \underline{\underline{E}} \right); E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \nu = 0.3.$$

2. Упругопластические свойства. Упрочнение с ростом скорости деформаций:



3. Критерии разрушения:

для пластичных материалов; по механизму касательных напряжений; MSFLD.

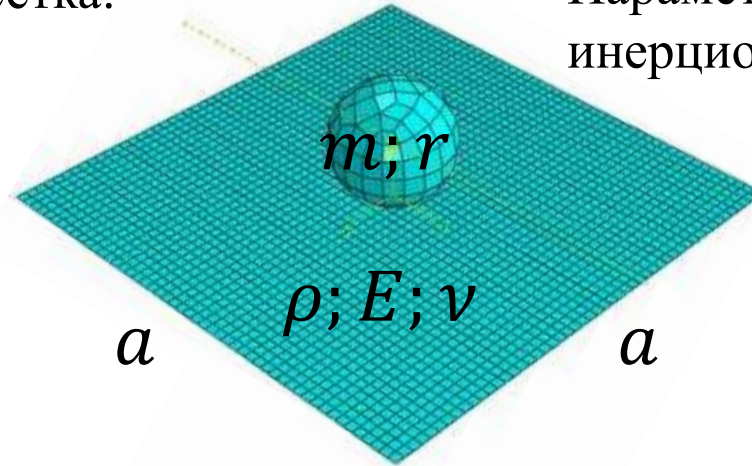


## Конечно-элементная постановка

Конечно-элементная сетка:

100 КЭ типа R3D4;

2500 КЭ типа S4R.



Параметры геометрии и инерционные свойства:

$$a = 1 \text{ м};$$

$$h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$r = 0.125 \text{ м};$$

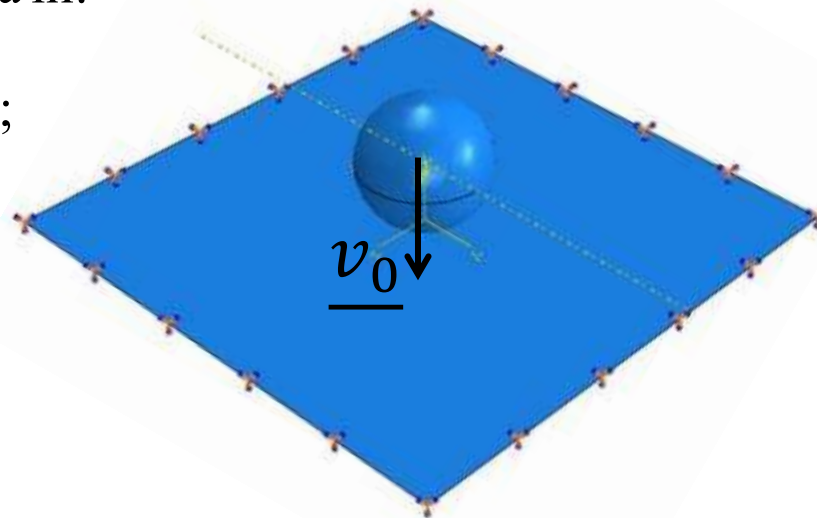
$$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3;$$

$$m = 5 \text{ кг}.$$

Краевые условия задачи:

$$v|_{t=0} = v_0 = 120 \text{ м/с};$$

$$\underline{u}|_{\Gamma} = 0; \underline{\varphi}|_{\Gamma} = 0.$$



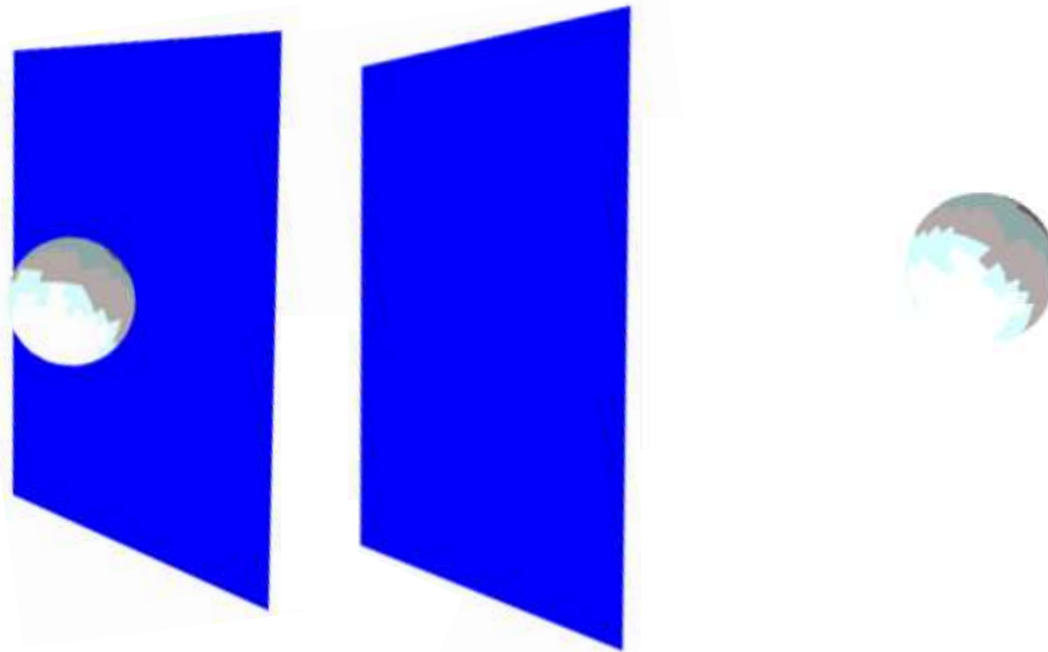
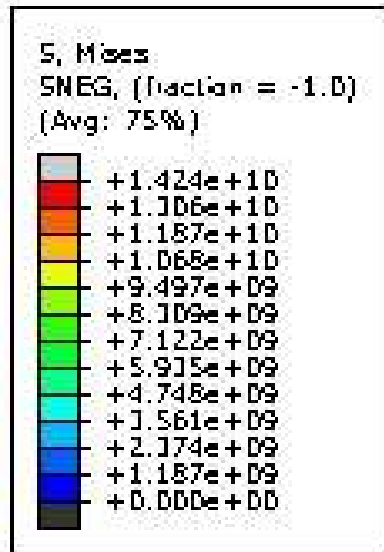


## Модель линейно-упругого материала мишени

Приближение линейно-упруго материала дает парадоксально большие напряжения:

Прямая сторона пластины:

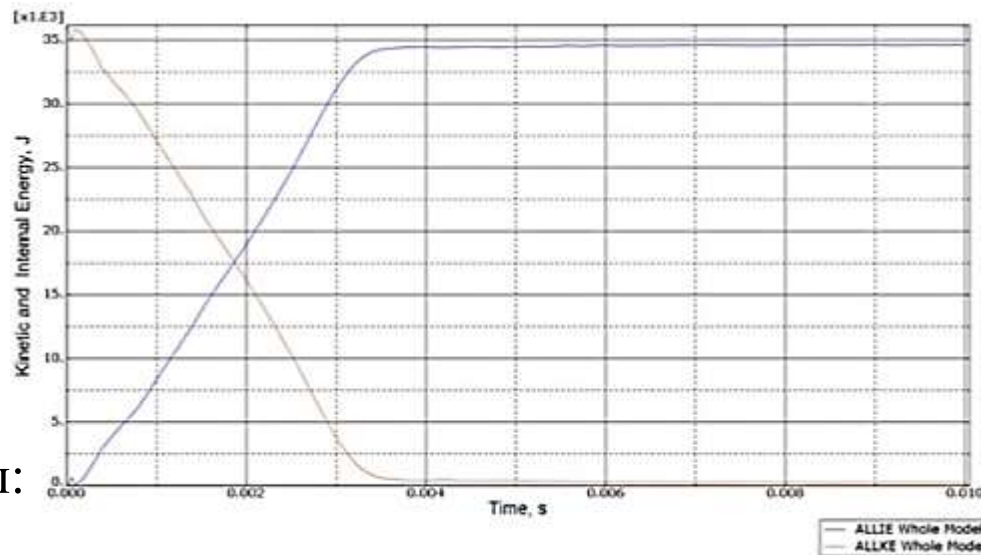
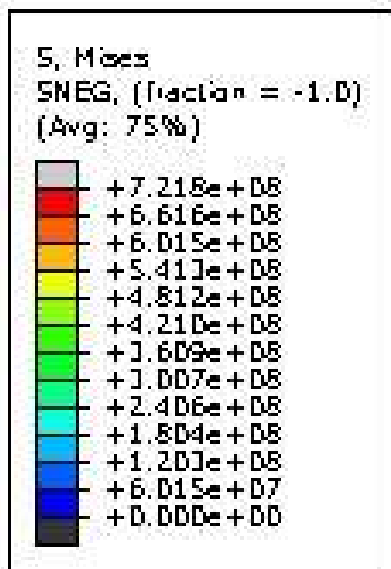
Обратная сторона:





## Модель упруго-пластического материала мишени

Учет пластических свойств материала принципиально меняет результат:



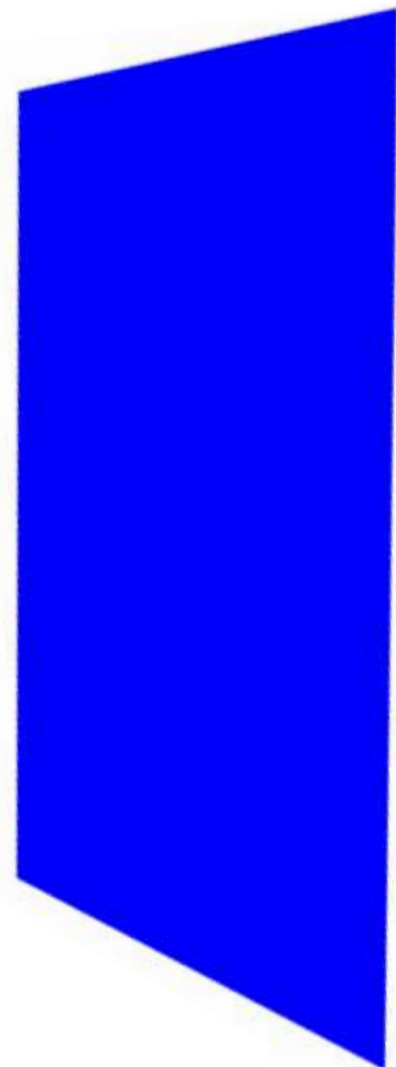
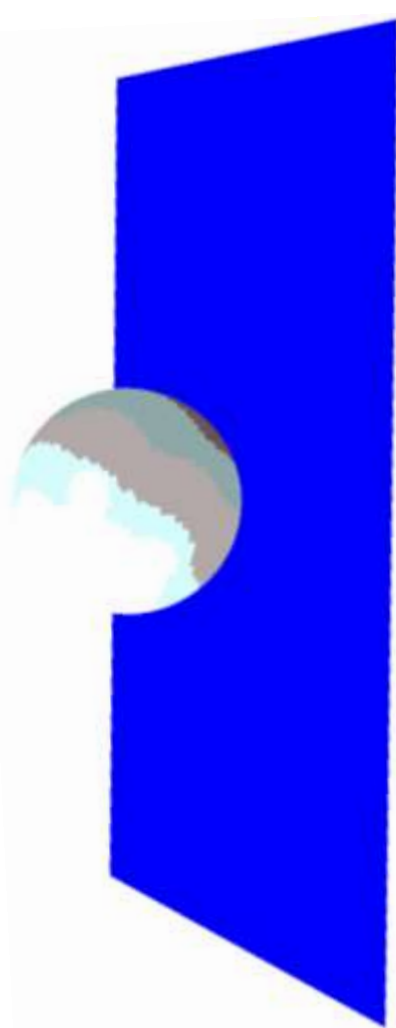
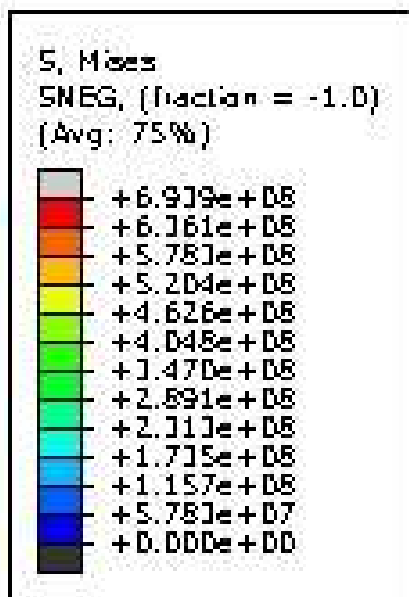
Сохранение энергии системы:



## Модель упругопластического материала с разрушением

Прямая сторона пластины:

Обратная сторона:







## Задача столкновения абсолютно твердого тела с плетеной конструкцией

Построение геометрии плетеной конструкции проводится в среде Beta-Ansa. Изобразим ее элементарный участок:

Параметры прутьев выбираются так, чтобы суммарная масса конструкции не превышала массу рассмотренной пластины:

$$R = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; H = 10 \text{ мм.}$$

$R$  — радиус прутьев,  $H$  — расстояние между ними.

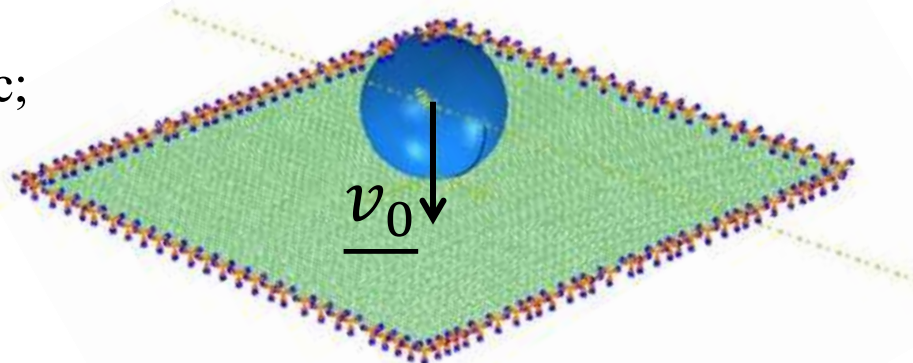
Копированием элементарного участка создается вся конструкция. Ее КЭ-сетка состоит из 4000 КЭ типа В31.



Краевые условия задачи:

$$v|_{t=0} = v_0 = 120 \text{ м/с};$$

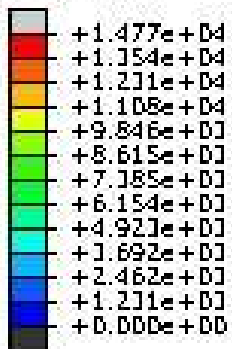
$$\underline{u}|_{\Gamma} = 0; \underline{\varphi}|_{\Gamma} = 0.$$





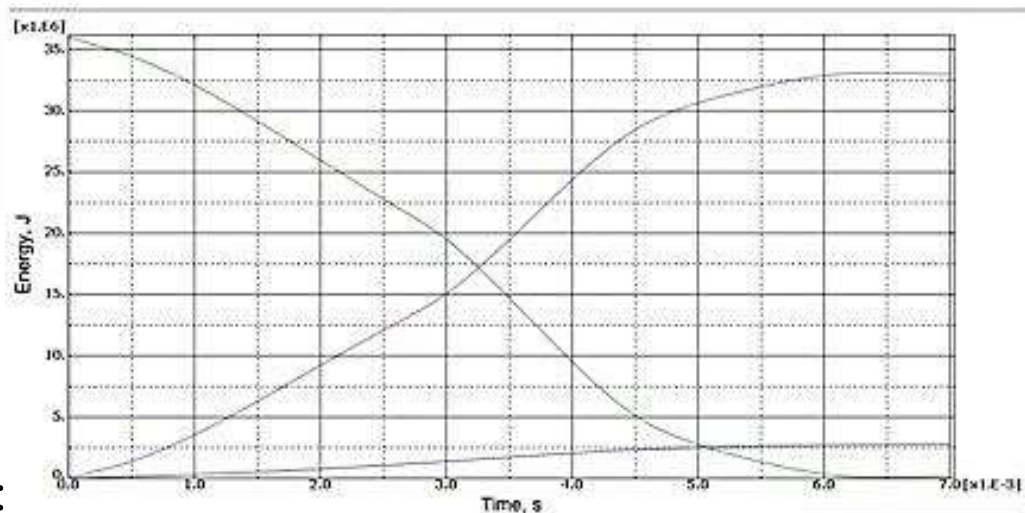
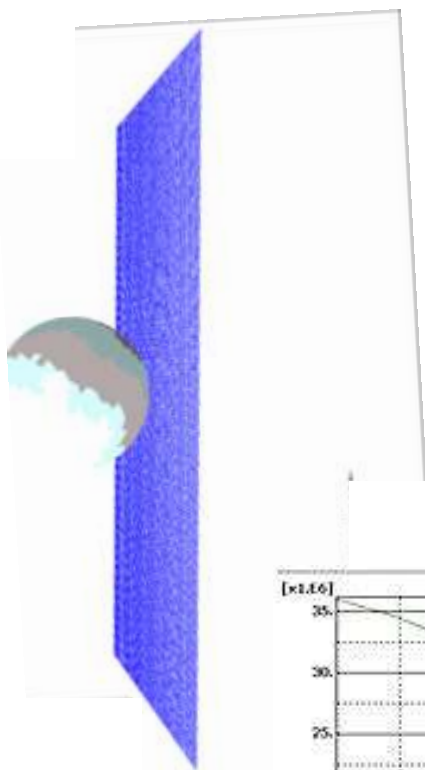
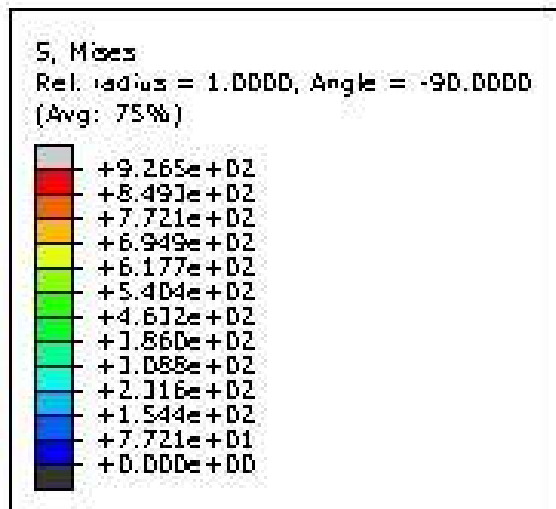
## Линейно-упругая модель материала

S, Mises  
Rel. radius = 1.0000, Angle = -90.0000  
(Avg: 75%)





## Упругопластическая модель материала



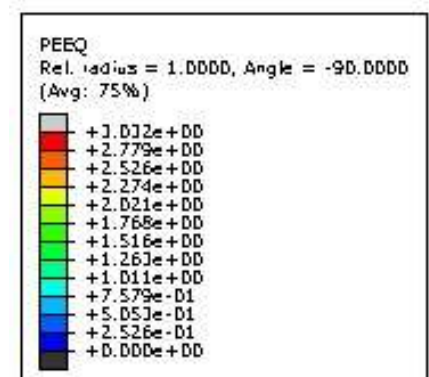
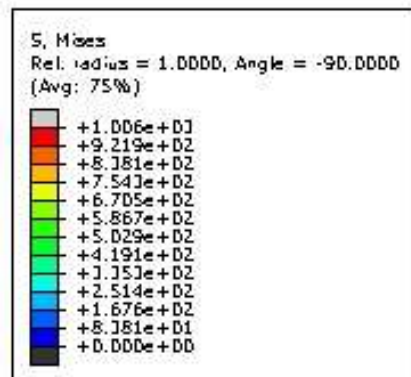
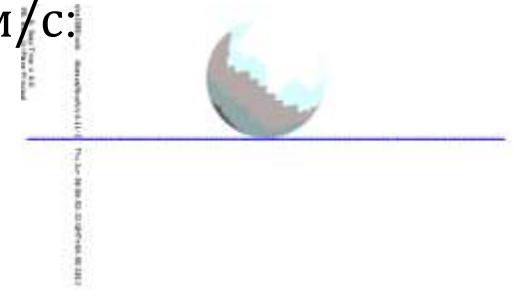
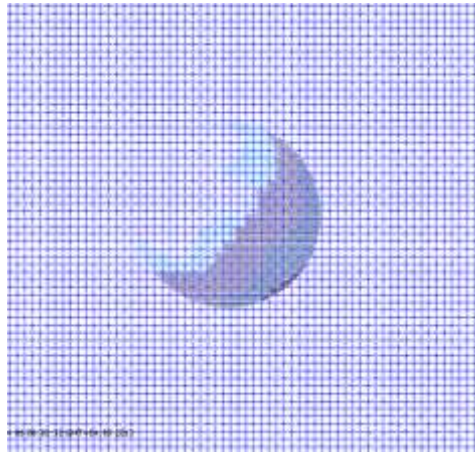
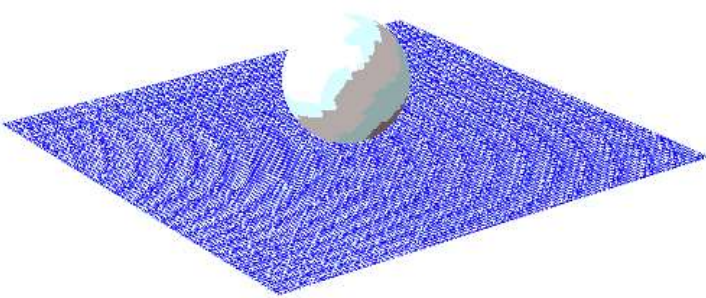
Диссипация энергии на трение:

— ALLFD Whole Model  
— ALLIE Whole Model  
— ALLKE Whole Model



## Упругопластическая модель материала, учитывающая возможность разрушения

При проведении эксперимента на разрушаемом материале установлено, что начальной скорости импактора  $v_0 = 120$  м/с недостаточно для его разрушения. С целью исследования разрушения плетеной конструкции начальная скорость импактора увеличена до  $v_0 = 200$  м/с:





## Результаты серии экспериментов

Результаты проведенных численных экспериментов представлены в таблице:

Задача		$u_{max}$ , м	$q_{max}$ , МПа	Время остановки импактора $T_0$ , мс	Поглощение кинетической энергии импактора
Материал	Конструкция				
линейно-упругий	сплошная пластина	0.090	11334	1.4	26.33 %
линейно-упругий	плетеная сетка	0.158	14670	2.1	27.75 %
упругопластический	сплошная пластина	0.245	764.0	4.0	99.52 %
упругопластический	плетеная сетка	0.458	797.0	6.5	99.65 %

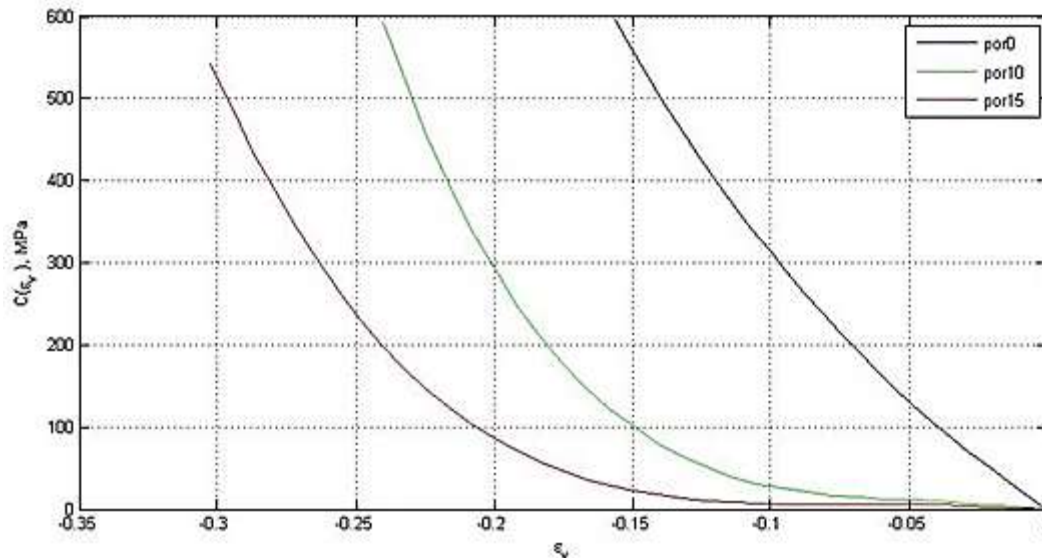
## Методика построения птицы. Модель материала

1. При высокоскоростных процессах материал птицы ведет себя как однородная жидкость;

2. Гидродинамическая модель материала задается в виде уравнения состояния — зависимости давления от объемных деформаций:

$$p = C(\varepsilon_v); \varepsilon_v = \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right); \rho_0 = 938 \text{ кг/м}^3.$$

3. На зависимость влияет пористость материала:



## Методика построения птицы. Модель материала и геометрия

4. Материал обладает свойством пластически деформироваться и имеет следующие предел текучести и модуль сдвига:

$$\sigma = 0.1 \text{ МПа}; G = 10 \text{ МПа};$$

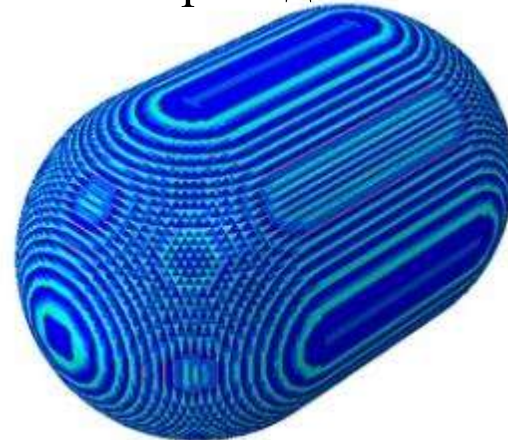
5. Для адекватного моделирования течения материала, необходимо указать гидростатическое напряжение отсечки, выше которого материал разрушается:

$$p^* = 2.75 \text{ МПа};$$

6. Геометрические размеры птицы массы 1.8 кг приведены ниже:

$L = 200$  мм — длина птицы;

$D = 125$  мм — ее диаметр.





## Связный метод Эйлера-Лагранжа (CEL)

1. Решение задачи течения жидкости может быть получено методом конечных элементов с большей точностью в постановке Эйлера;
2. Узлы эйлеровой КЭ сетки не привязаны к геометрии движущегося тела, что не деформирует конечные элементы;
3. Для решения задач контактного взаимодействия между твердыми телами и жидкостями применяется, так называемый, связный метод Эйлера-Лагранжа;
4. Метод предполагает сочетание в конечно-элементной модели элементов сетки Эйлера и классических КЭ лагранжевой механики;
5. Взаимодействие не может быть реализовано при контакте поверхности КЭ эйлеровой сетки с балочными элементами.

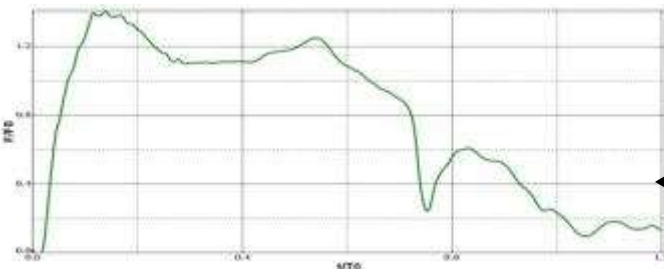




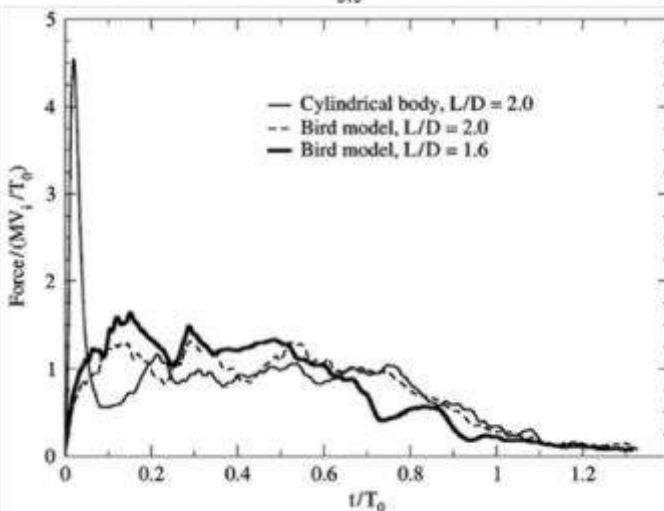
## Верификация модели материала птицы

Проведено сравнение результатов численного моделирования столкновения построенной птицы с абсолютно твердой мишенью с экспериментальными данными, а также с результатами численного эксперимента, полученного при помощи пакета ESI/Pam-crash:

Контактная сила:

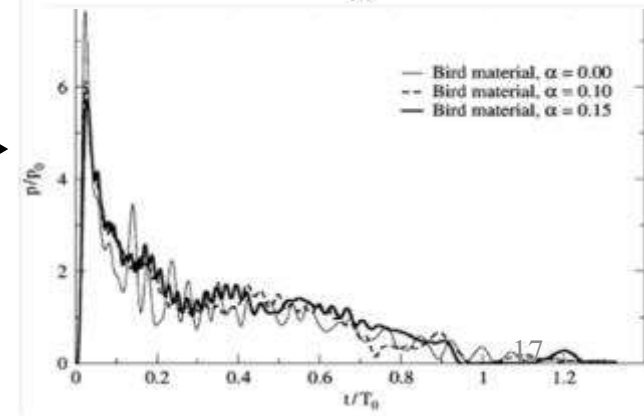
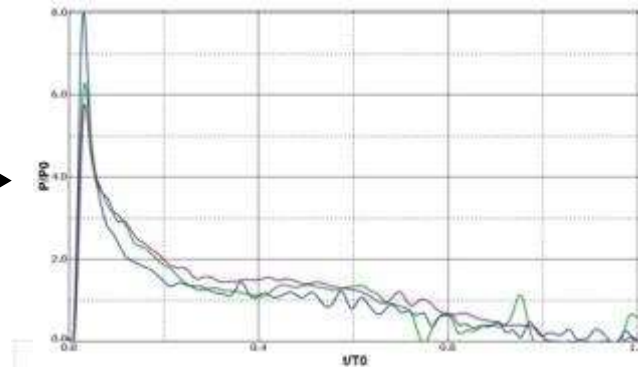


← Abaqus/Explicit →



← ESI/Pam-crash →

Контактное давление:



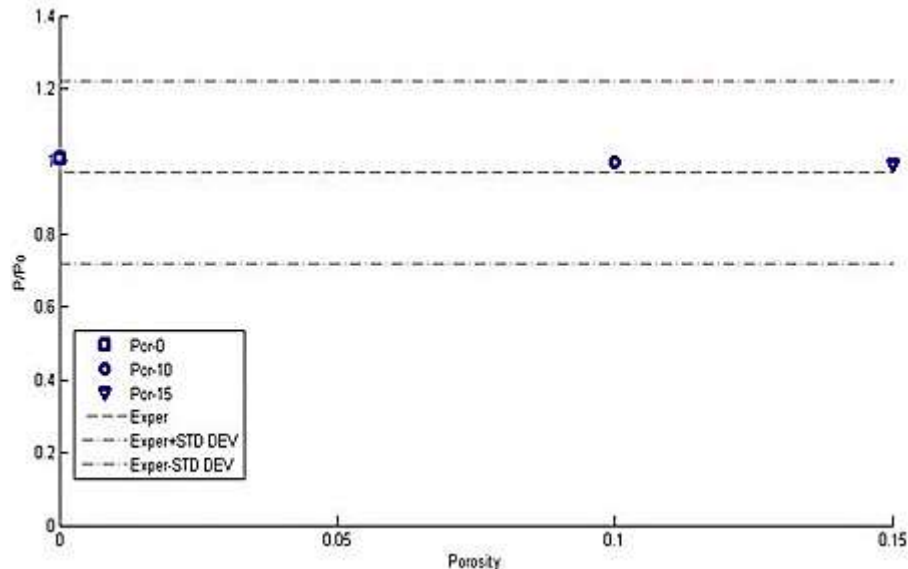


## Сравнение результатов с экспериментом

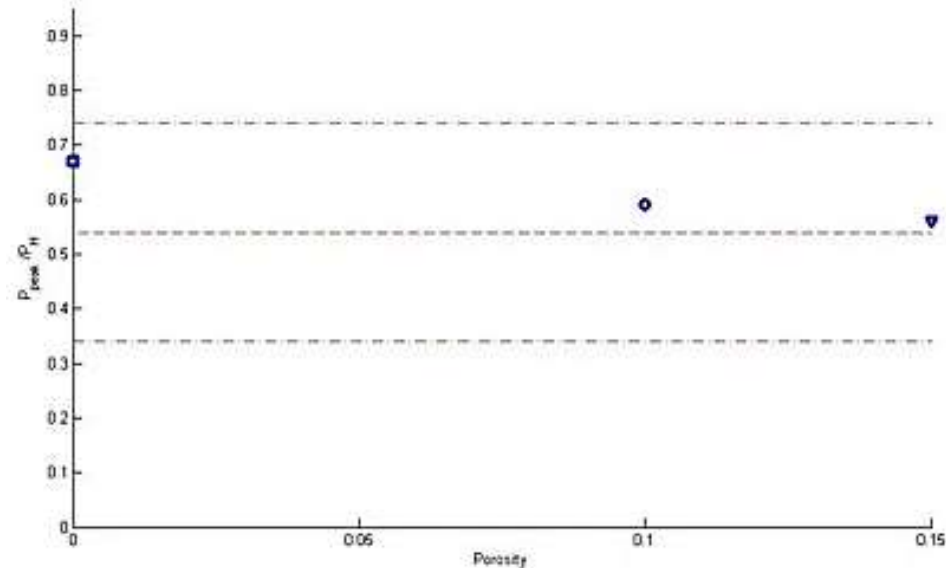
Для сравнительного анализа с экспериментальными данными о столкновении птицы с абсолютно твердой мишенью взяты средние статистические значения пиковых нормированных давлений, а также давлений в фазе стационарного течения. Результаты, полученные численно, попадают в зону стандартного среднеквадратического отклонения.

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2; P_H = \rho_0 (c_0 + 2v_0) v_0.$$

Давление стационарного течения:

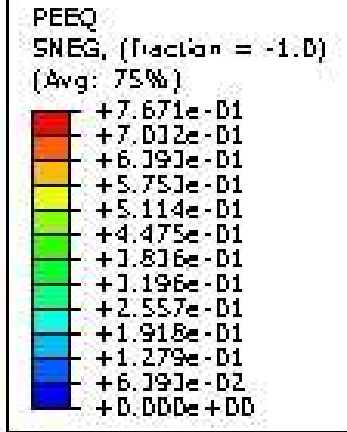
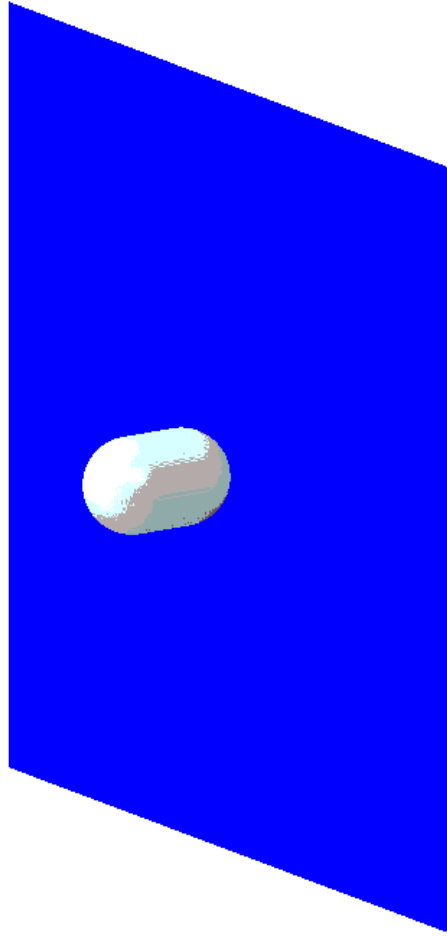
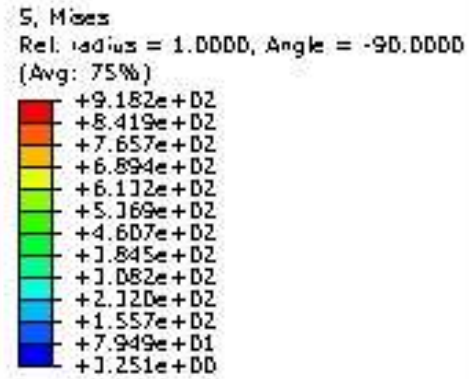


Пиковые значения давлений:





# Столкновение птицы с упругопластической с разрушением пластиной

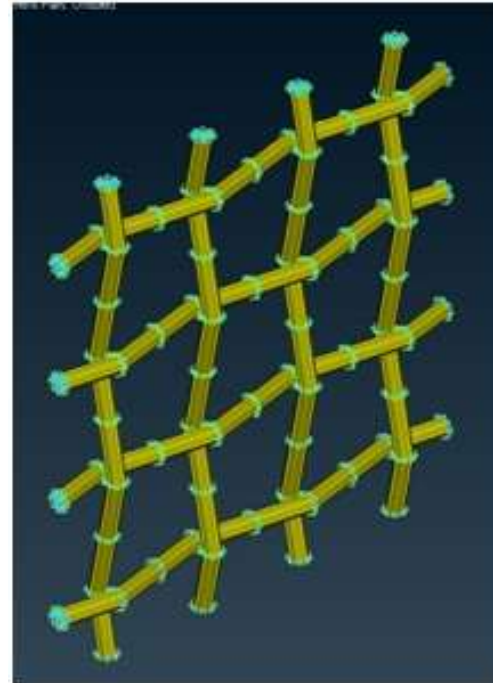




## Методика построения плетеной конструкции

Поскольку средствами вычислительного пакета Abaqus не предоставляется возможности реализовать контактное взаимодействие между моделью птицы и плетеной конструкцией, КЭ модель которой основана на балочных элементах, необходимо окружить каждый стержень, входящий в состав конструкции, оболочкой.

Данное построение выполнено в среде Beta-Ansa. Ниже изобразим элементарный участок плетеной конструкций, способной контактировать с эйлеровыми конечными элементами:

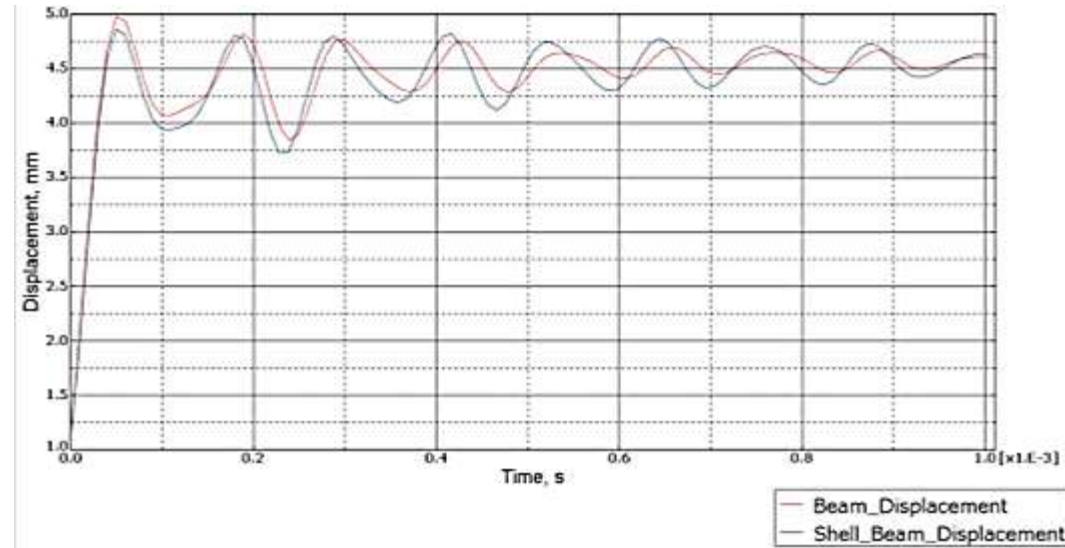
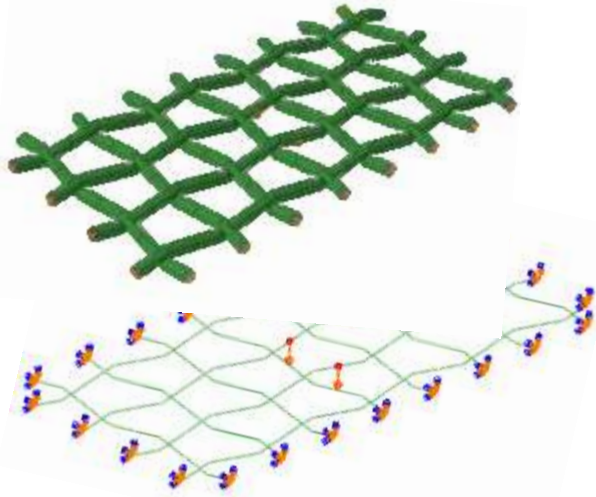




## Верификация конструкции

Добавление оболочек не должно сказываться на жесткостных и инерционных свойствах плетеной конструкции.

После завершения процедуры построения окружающих балки оболочек, проведено сравнение решений задач изгиба участков плетеных конструкций с добавлением оболочек и без:



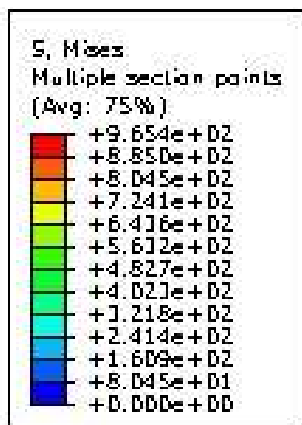
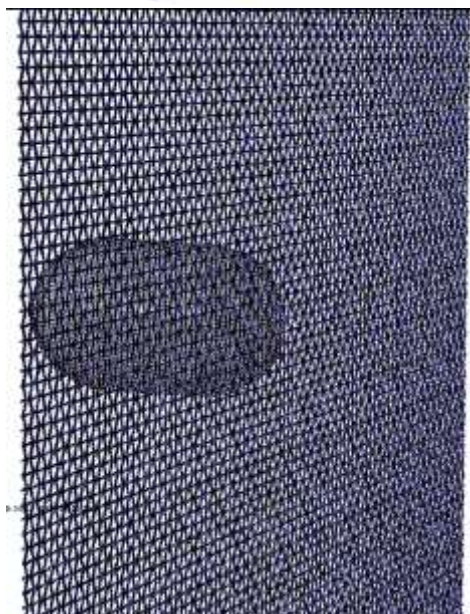
КЭ постановка	$f$ , Гц	$u_{\infty}$ , $10^{-3}$ м
Оболочечные и балочные КЭ	8403	4.5775
Балочные КЭ	8368	4.5805
Относительные различия	0.4 %	0.06 %

Сравнение  
установившегося прогиба  
и частоты колебаний.

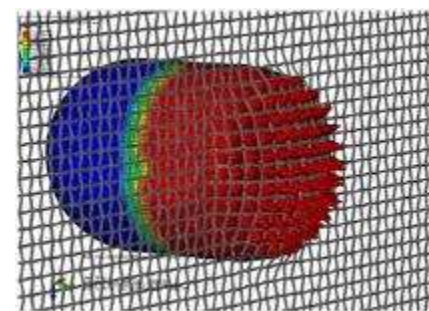
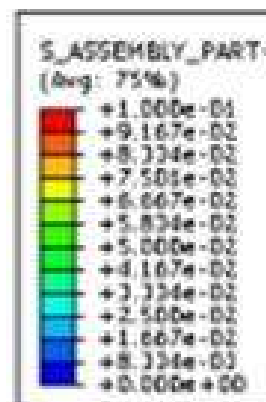


# Конечно-элементное решение задачи столкновения птицы с плетеной конструкцией

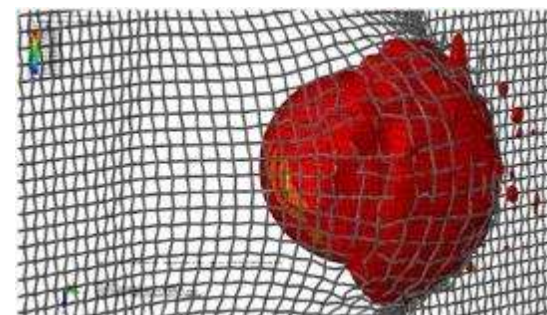
Краевые условия:



Напряжения в импакторе:



$t = 0.2$  мс



$t = 0.92$  мс



## Выводы

1. Установлено, что при моделировании высокоскоростных контактных взаимодействий для получения достоверного результата необходимо учитывать нелинейные физические свойства материалов контактирующих тел, такие как пластичность и разрушение;
2. Изучена методика построения конечно-элементных моделей жидких тел в постановке задачи механики Эйлера на примере птицы;
3. Изучена методика построения плетеной конструкции, способной контактировать с эйлеровыми конечными элементами;
4. Исследование процессов деформирования и напряженного состояния плетеной металлической конструкции подтвердило возможность ее использования в целях защиты от столкновения с массивными телами на высокой скорости.