



ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание академической степени
МАГИСТРА

РАЗРАБОТКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ
МОДЕЛИ ГРАДА. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ОПЕРЕНИЯ САМОЛЕТА НА
ГРАДОСТОЙКОСТЬ

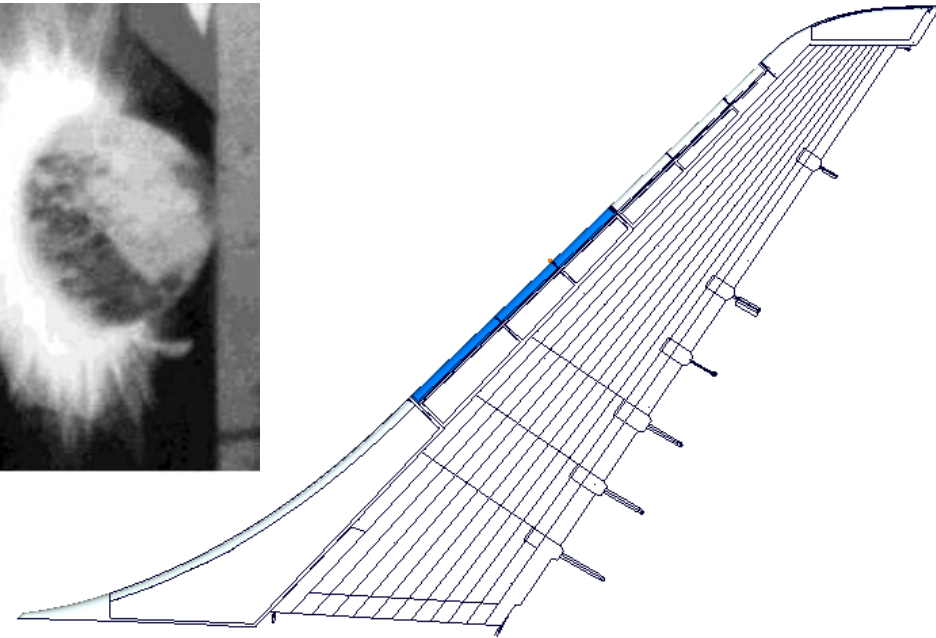
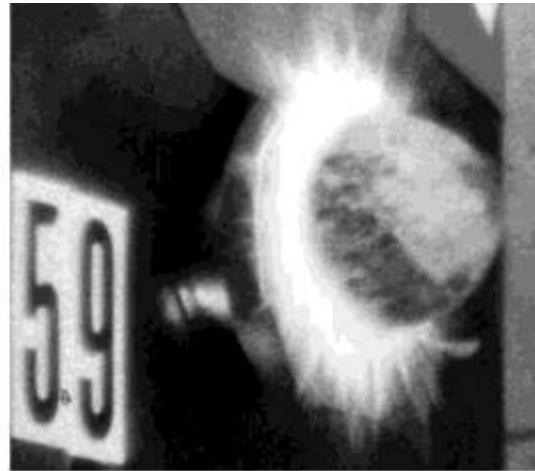
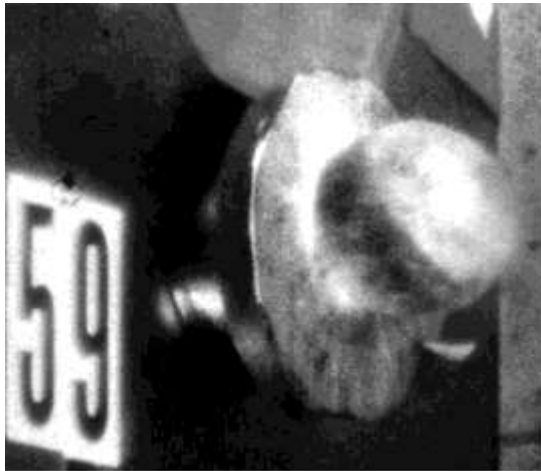
Студент : Тамм А. Ю.
гр. 6055/11
Руководитель : Боровков А. И.
Ассистент : Клявин О. И.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Теоретическое описание модели пластичности и разрушения материала. Метод гидродинамики сглаженных частиц.	5
1.1. Определение модели эластично-пластичного материала с изотропным упрочнением	5
1.2. Матрица жесткости	9
1.3. Критерий разрушения при растяжении	10
1.4. Метод гидродинамики сглаженных частиц	11
Глава 2. Разработка конечно-элементной модели градины	13
2.1. Экспериментальные исследования	13
2.2. Конечно-элементная модель градины с использованием Лагранжевых конечных элементов	17
2.2.1. Выбор вида КЭ сетки модели градины	18
2.2.2. Разработка материала КЭ модели градины с использованием Лагранжевых конечных элементов	27
2.2.3. Оценка эффективности использования метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) для создания КЭ модели градины	43
Глава 3. Оценка прочности конструкции вертикального оперения самолета при испытании на градостойкость	48
3.1. Описание вычислительного эксперимента	48
3.2. Анализ результатов вычислительного эксперимента для первой позиции	49
3.3. Анализ результатов вычислительного эксперимента для второй позиции	57
3.4. Анализ результатов вычислительного эксперимента для третьей позиции	65
Заключение	73
Приложение А. История механики. История развития летательных аппаратов	75
Приложение Б. Безопасность жизнедеятельности	96
Литература	106

Цель работы

- Разработать КЭ модель градины и модель материала льда.
- Откалибровать модель материала льда для КЭ моделирования эксперимента по столкновению на скоростях 73.5-126.0 м/с
- Оценить опасность столкновения градины диаметром 42.7 мм с вертикальным оперением самолета на скорости 95.4 м/с

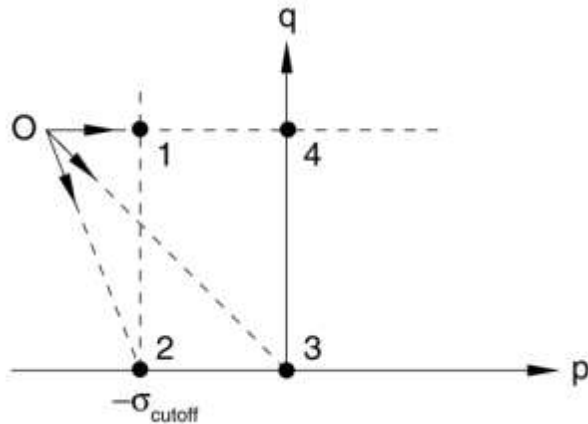




Постановка задачи для исследования в пакете численного моделирования ABAQUS

- Разработать КЭ модель градины
- Разработать модель материала льда для рассматриваемого диапазона начальной скорости градины.
- Произвести сравнение результатов моделирования физического эксперимента [1,2] с использованием КЭ модели градины разработанной в предыдущих двух пунктах с результатами физического эксперимента и на его основе откалибровать модель материала.
- Произвести оценку опасности столкновения градины с вертикальным оперением самолета.

Критерий разрушения при растяжении, модель материала

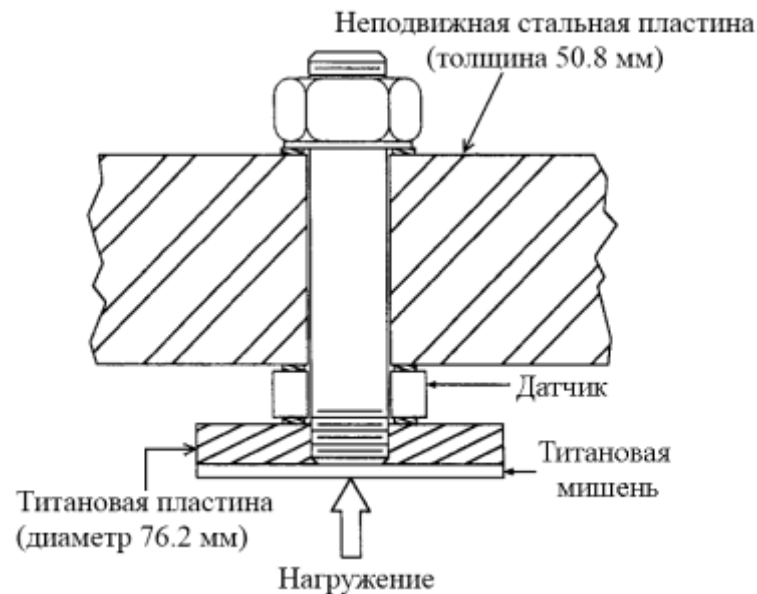
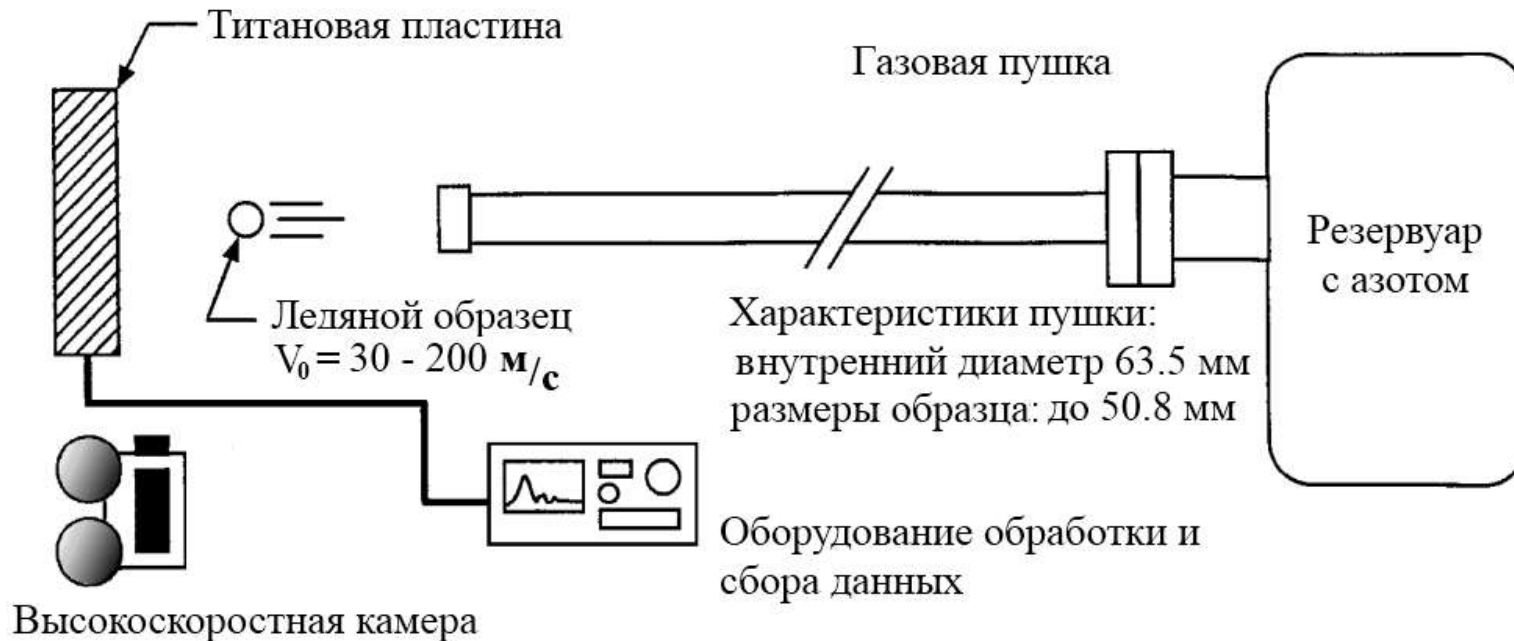


- Эластично-пластичный материал с изотропным упрочнением
- Зависимость предела текучести от скорости деформации.

$$p = \max(-\sigma_{cutoff}, p),$$

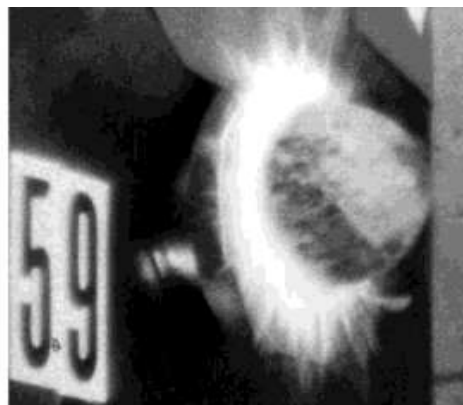
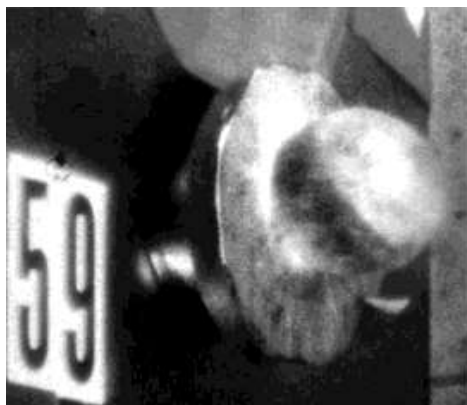
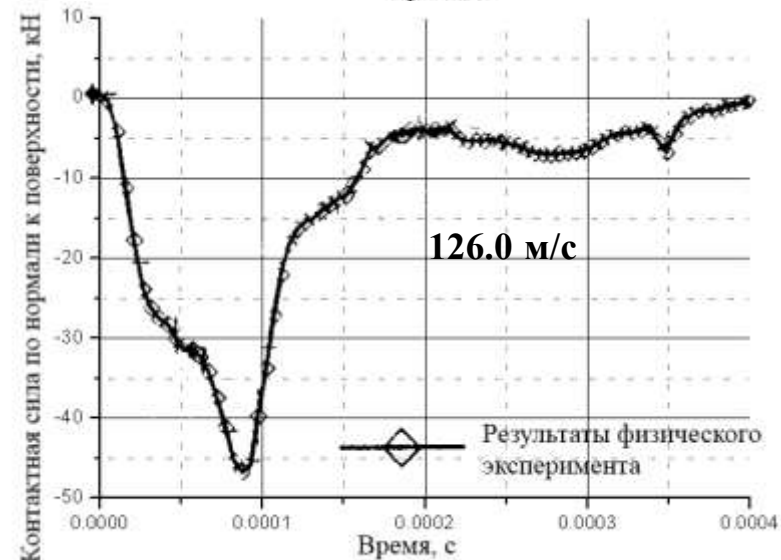
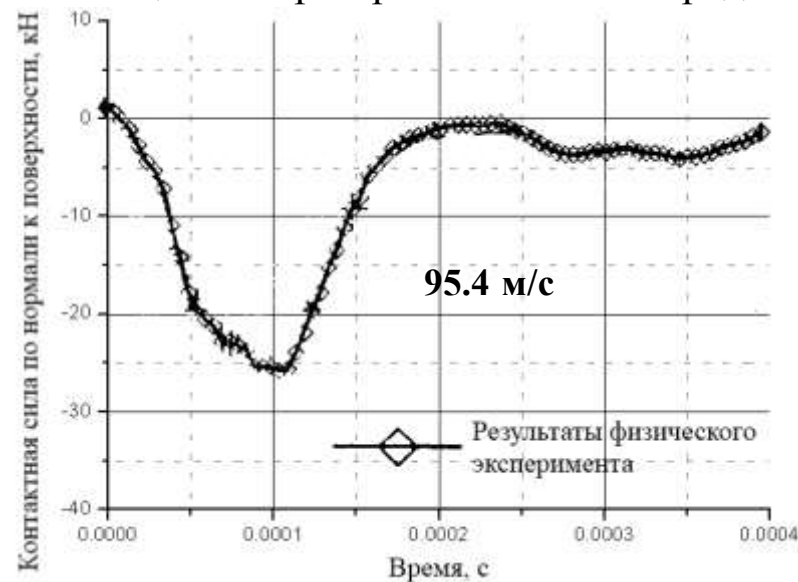
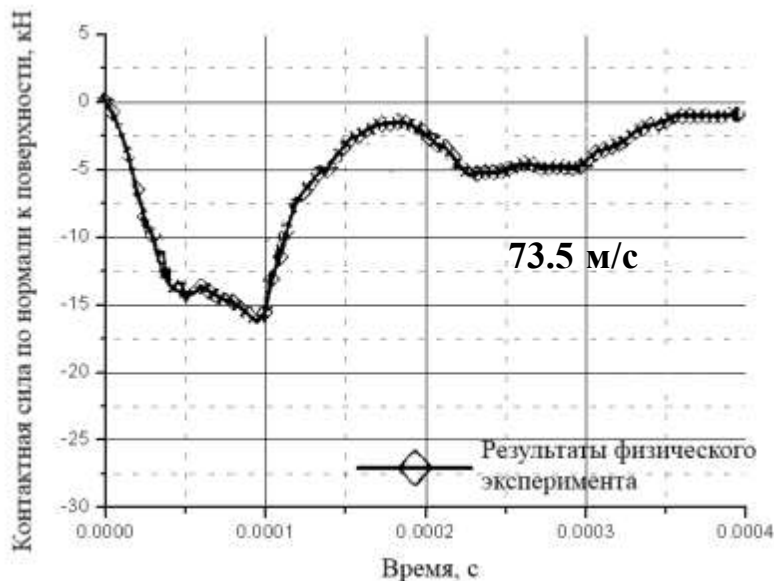
- В момент достижения определенного значения гидростатического давления в элементе не происходит удаление элемента, а происходит деградация его свойств.
- Компоненты тензора напряжений связанные с давлением, по достижению σ_{cutoff} им ограничиваются, а девиаторная часть тензора напряжений устанавливается нулем до конца анализа для элемента (точка 2)

Описание физического эксперимента

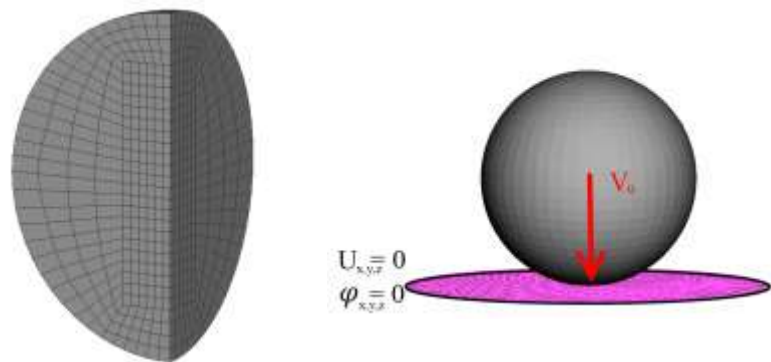


Используемые результаты физического эксперимента

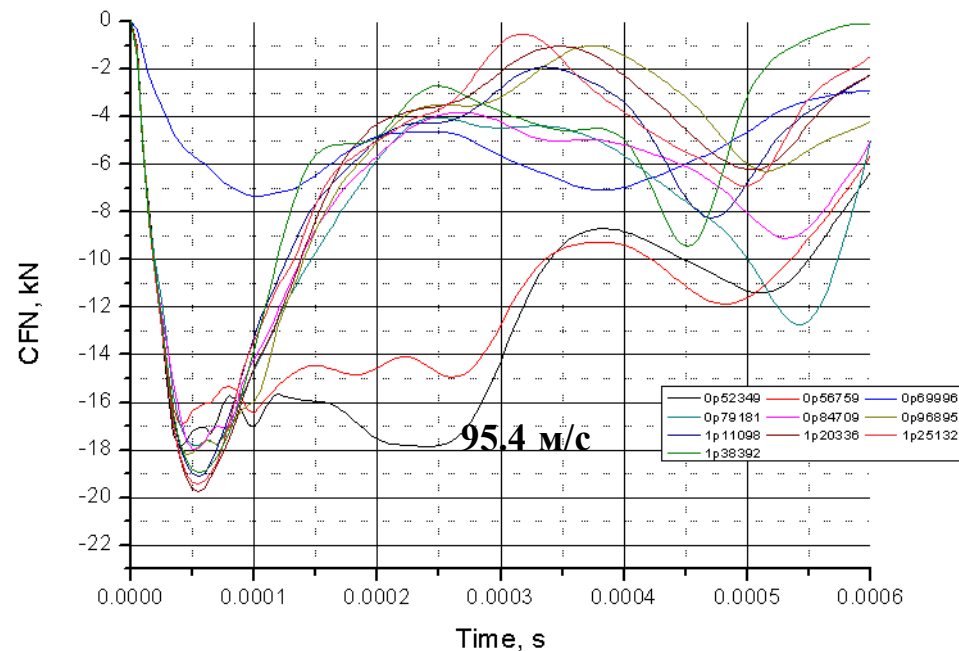
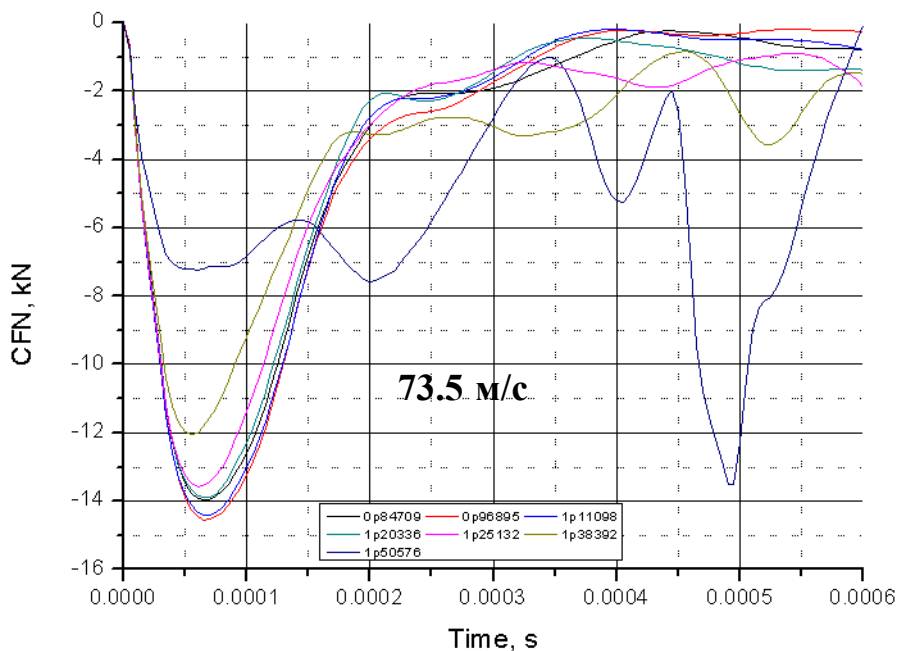
- Зависимость контактной силы по нормали к поверхности от времени,
- Кадры скоростной съемки сделанной при помощи камеры расположенной рядом с

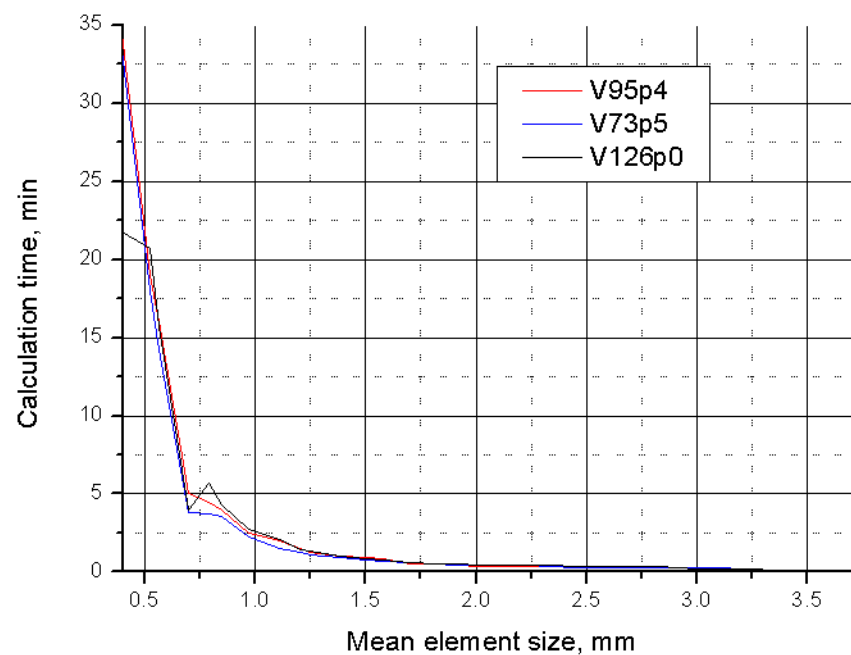
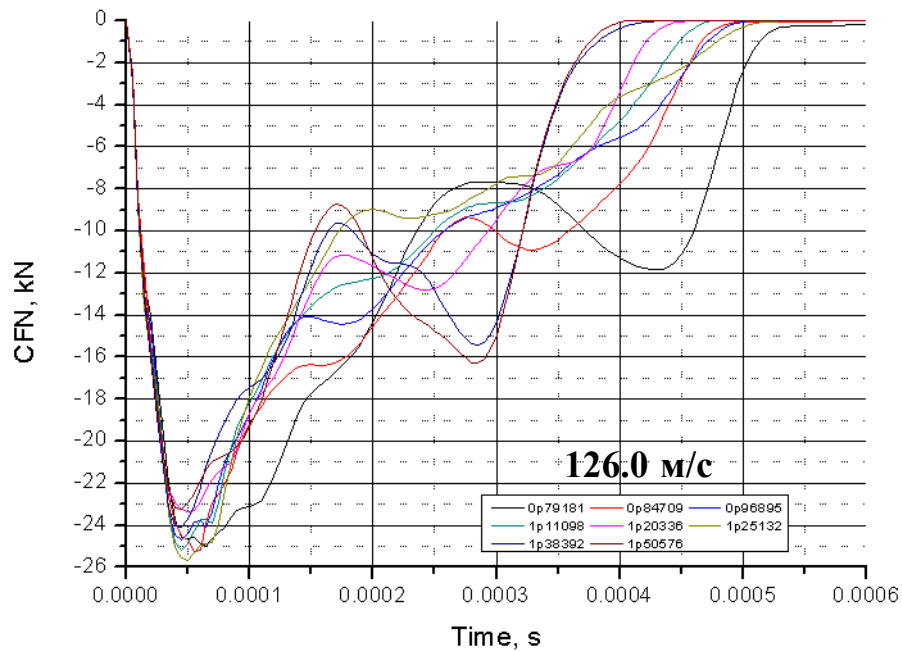


Разработка конечно-элементной модели градины. Чувствительность к размеру элемента



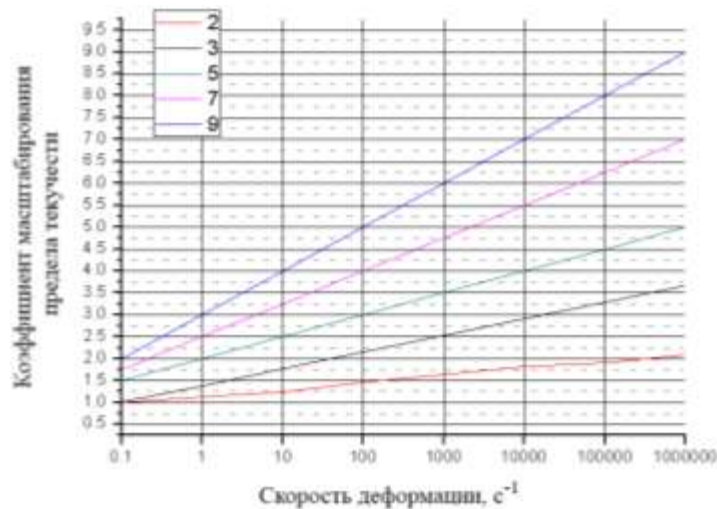
- Тип сетки – структурированный (MAP).
- Тип элемента – C3D (линейный трехмерный объемный элемент).



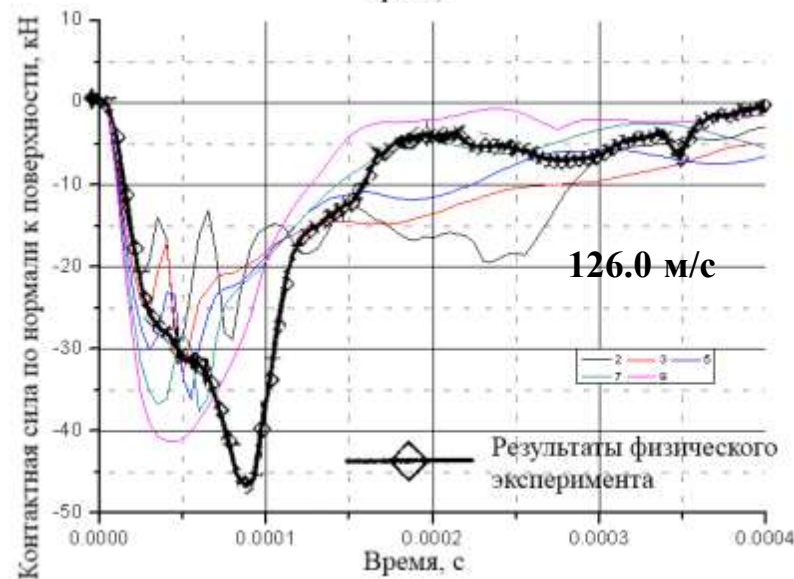
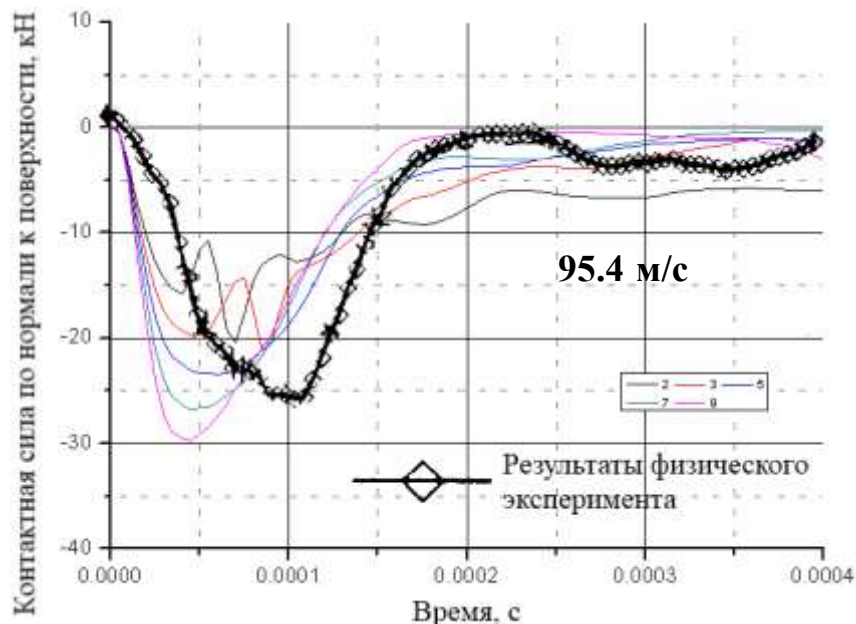
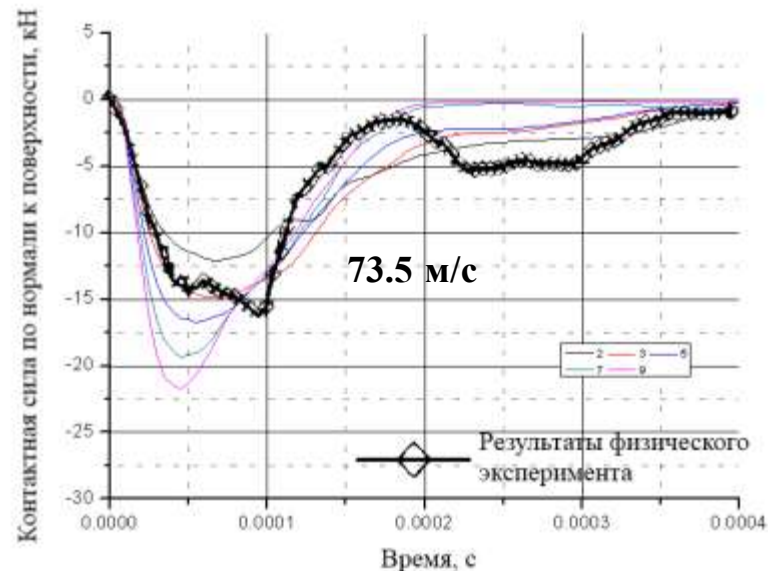


характерный размер элемента для дальнейших исследований 0.97 мм.

Разработка модели материала льда. Линейная зависимость коэффициента масштабирования предела текучести

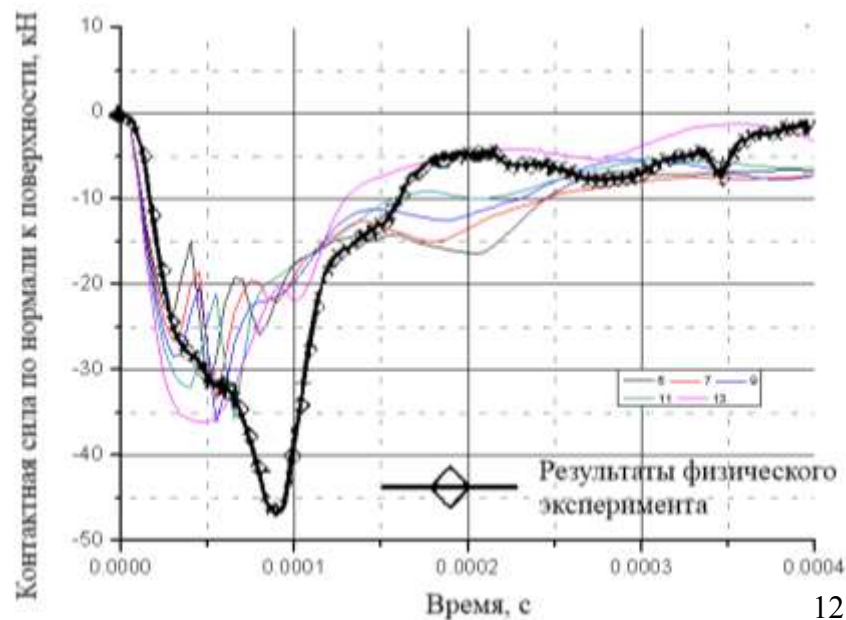
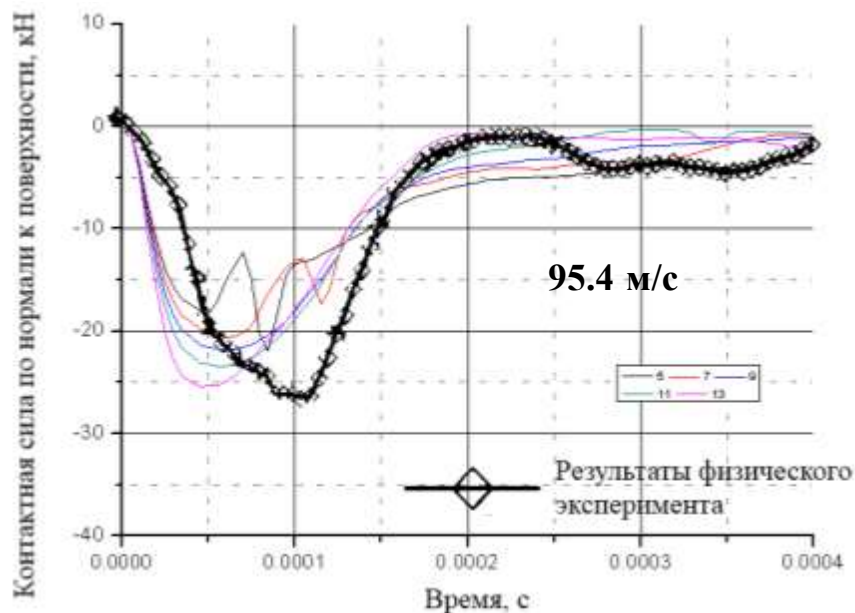
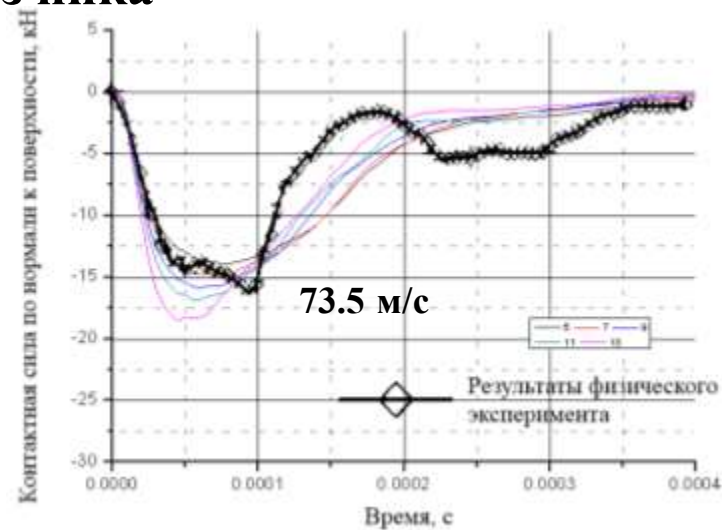
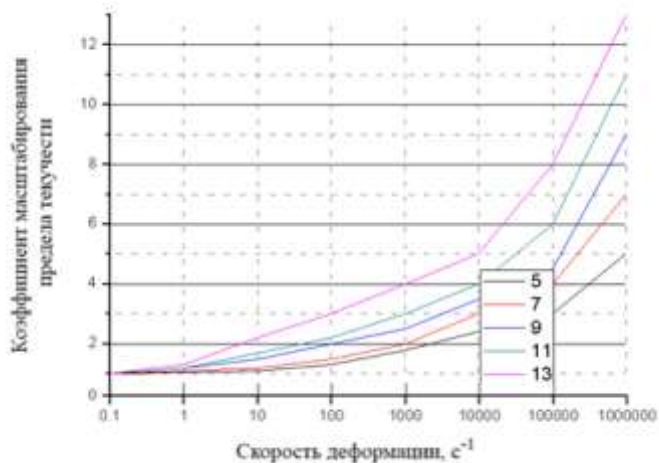


$k=9$



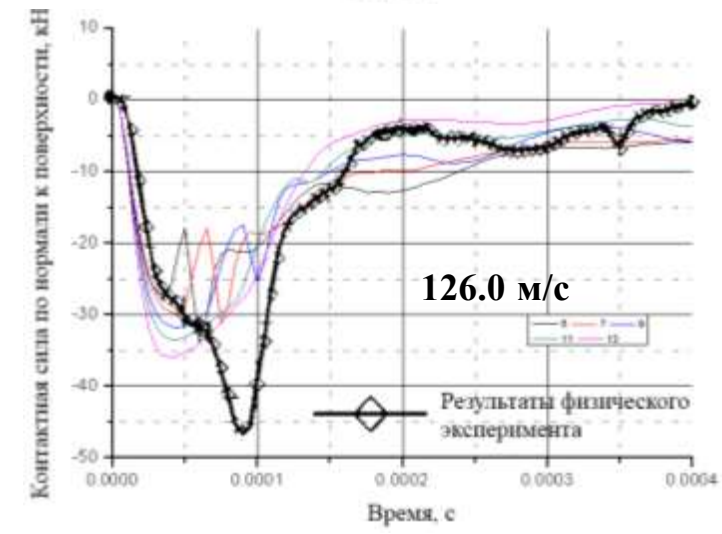
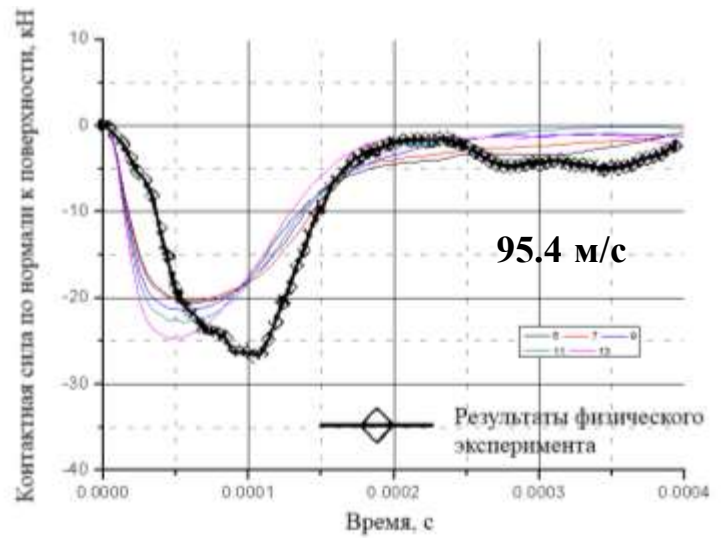
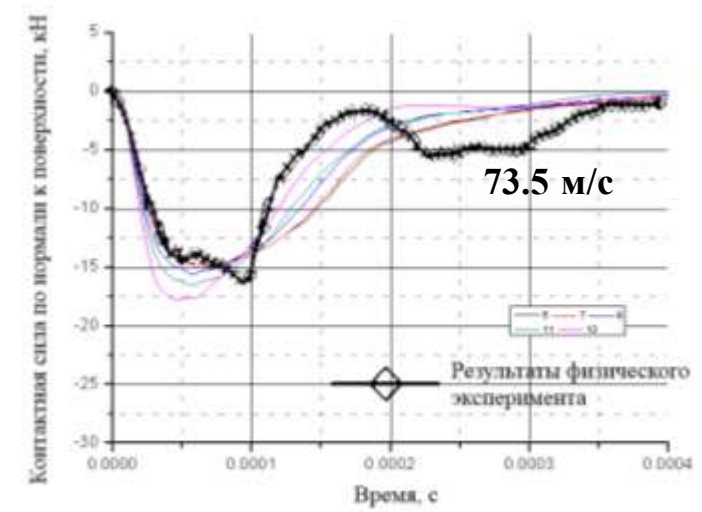
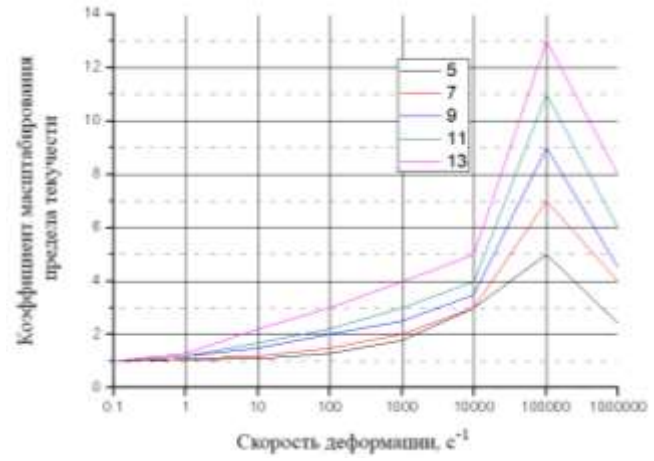
Нелинейная зависимость коэффициента масштабирования предела текучести без пика

$k=13$



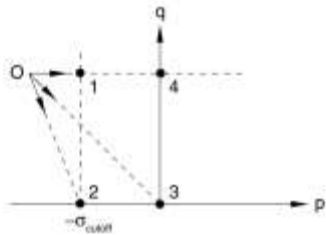
Нелинейная зависимость коэффициента масштабирования предела текучести с пиком

$k=13$



Для дальнейших исследований была выбрана линейная аппроксимация с наибольшим коэффициентом масштабирования равным 9

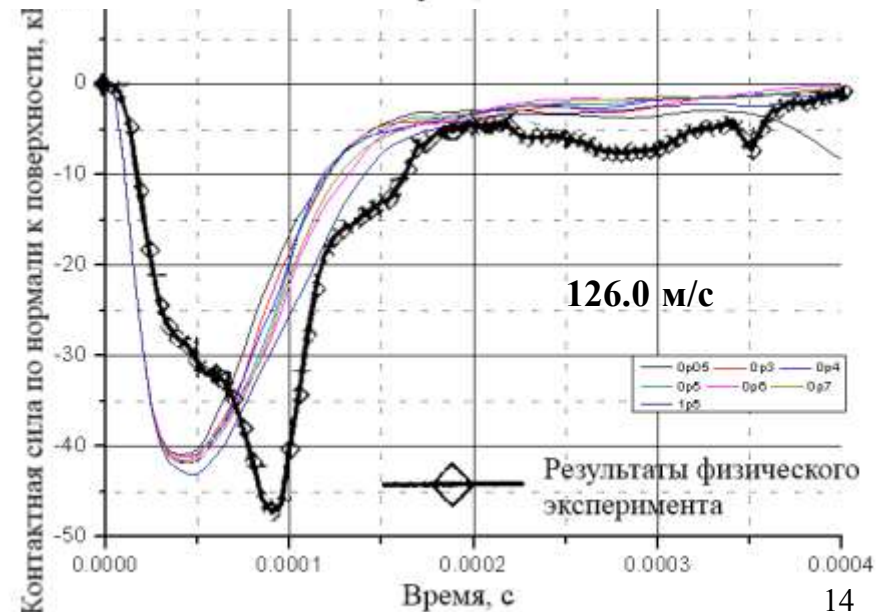
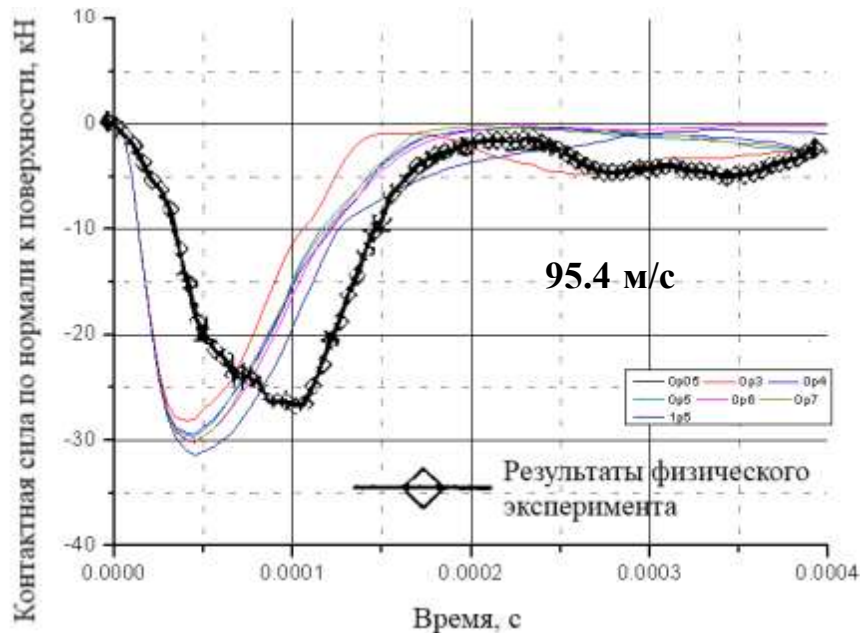
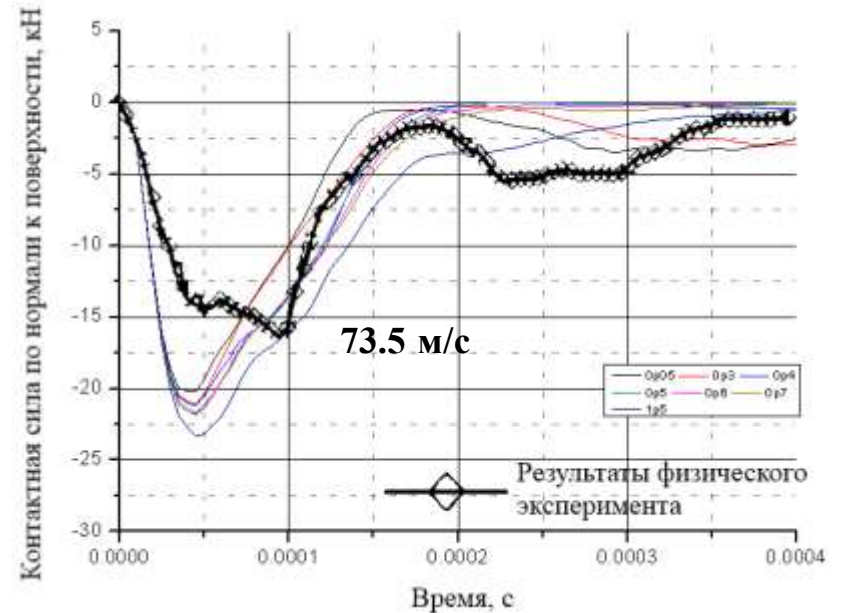
Разработка модели материала льда. Параметры критерия разрушения



$$p = \max(-\sigma_{cutoff}, p),$$

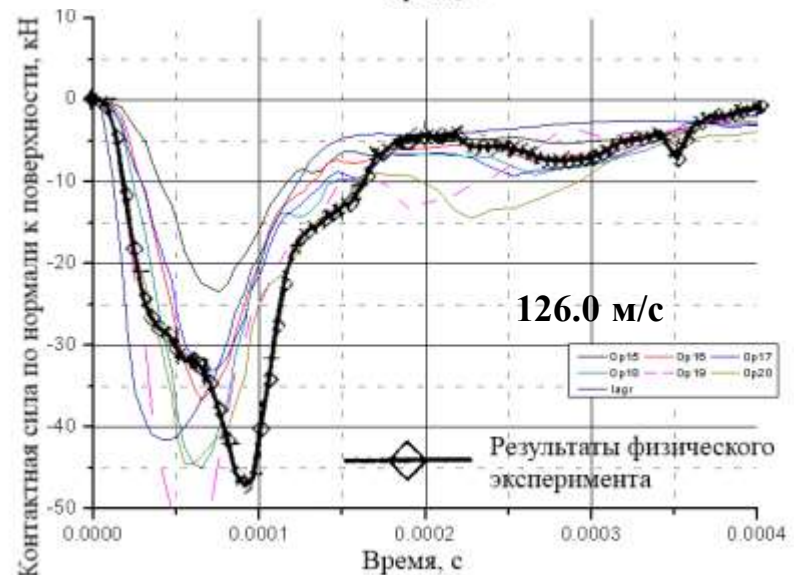
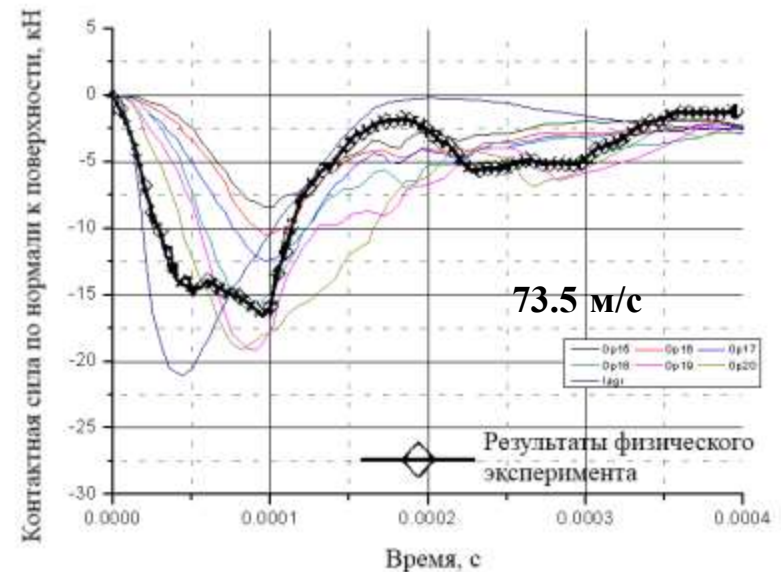
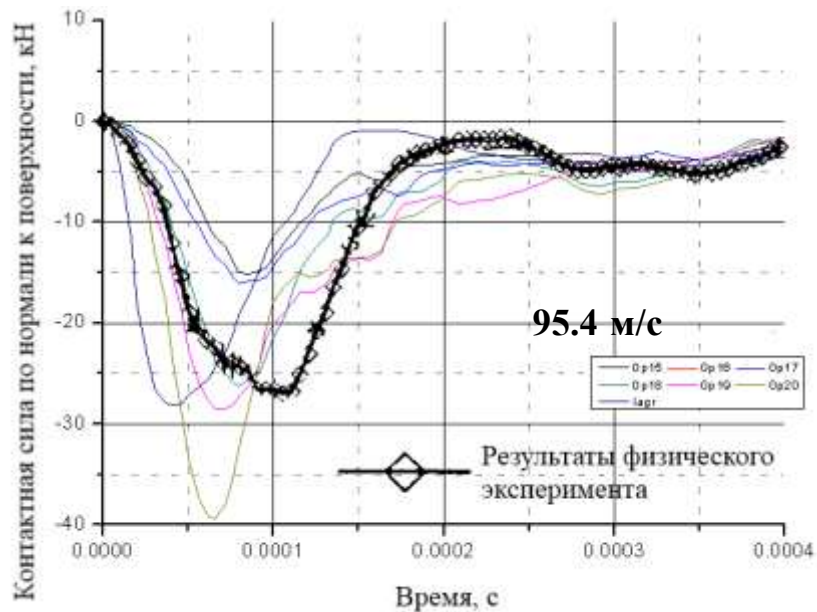
$$\sigma_{cutoff} = 0.3 \text{ МПа}$$

- Средняя точность по пиковой нагрузке – 16%
- Наилучшая точность (95.4 м/с) – 3%.



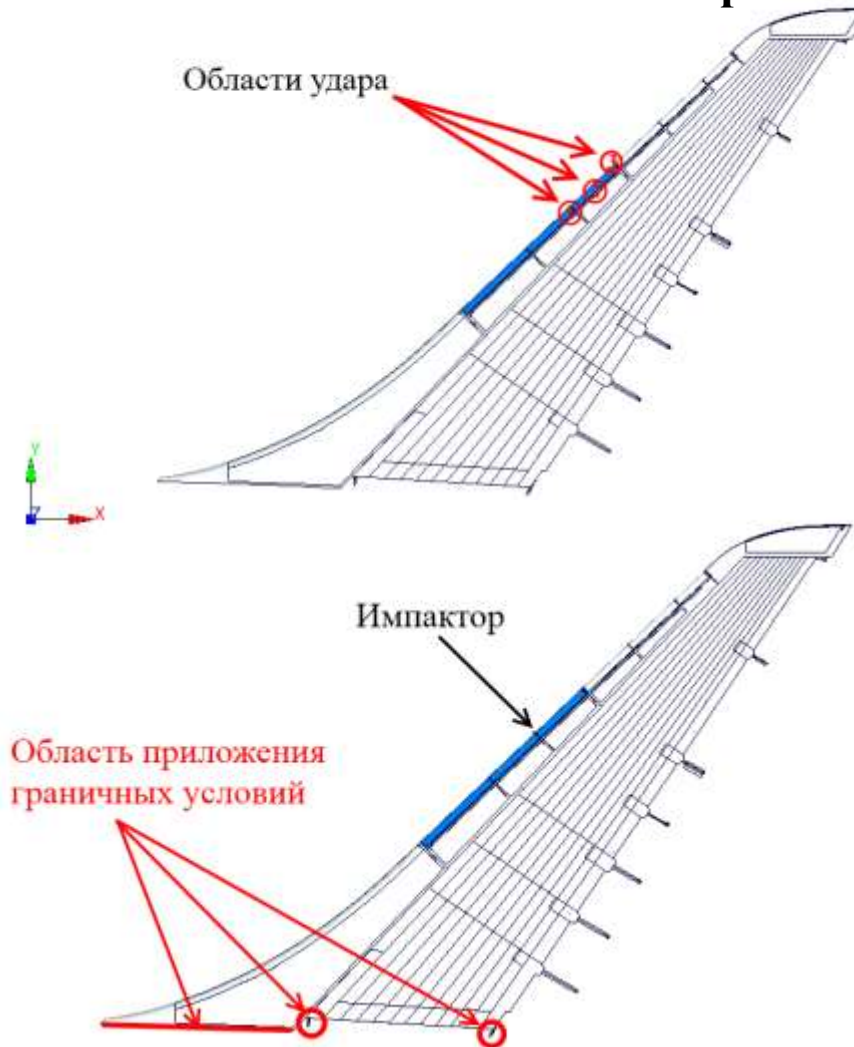
КЭ модель градины с использованием гидродинамики сглаженных частиц

- Большая точность по пиковой нагрузке (126.0 м/с) – 6%, $l = 0.18$ мм
- Большая точность по моменту времени для пиковой нагрузки по сравнению с использованием лагранжевых элементов
- Возможность оценить второй пик на диаграмме зависимости суммарного контактного давления от времени.
- Требует больших аппаратных ресурсов и показывает большее время счета.
- Сложнее калибровка параметров материала



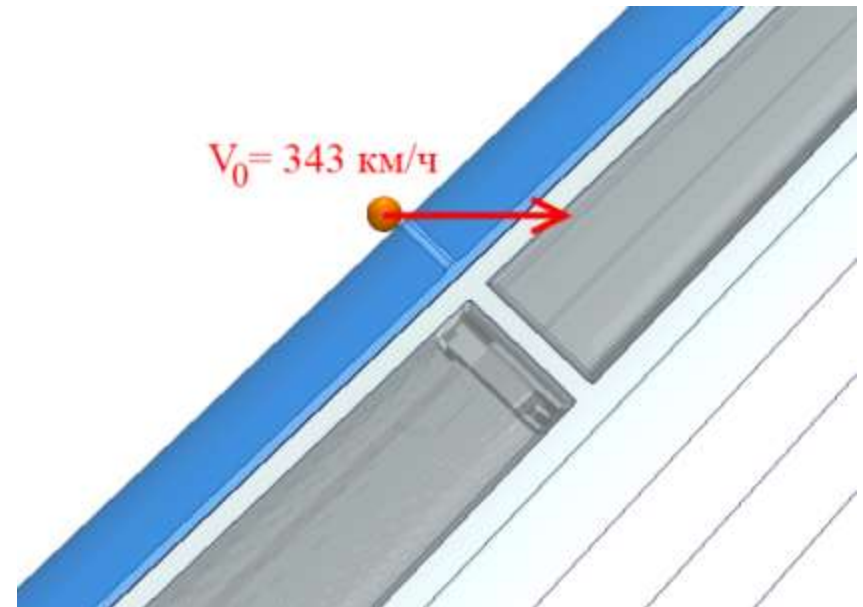
Оценка прочности конструкции вертикального оперения самолета при испытании на градостойкость

Описание вычислительного эксперимента

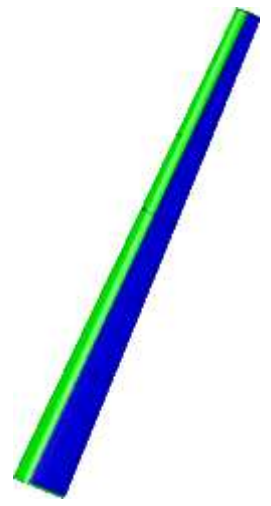


$$v_0 = 343 \frac{\text{км}}{\text{ч}}, \left(95.4 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$$

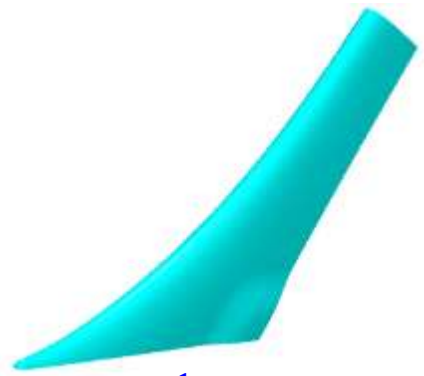
$$d = 42.7 \text{ мм}$$



Составляющие части вертикального оперения



НОСОК КИЛЯ
(сотовый композитный материал, алюминиевый сплав)



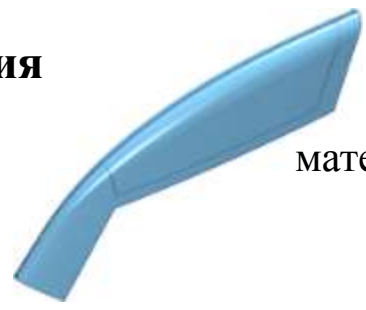
форкиль
(сотовый композитный материал, алюминиевый сплав)



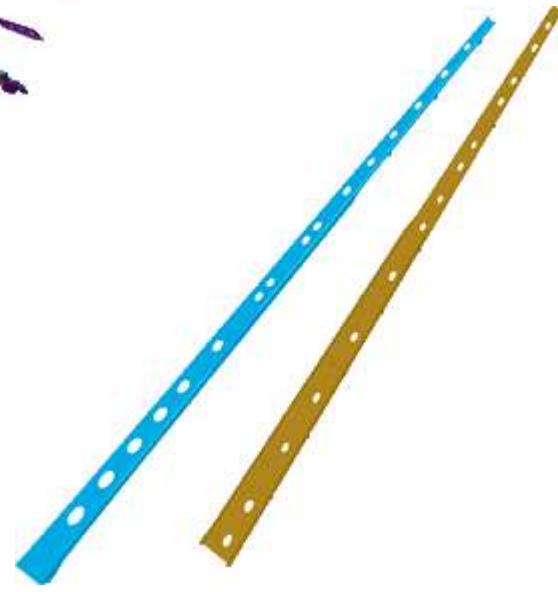
кесонная часть
(углеткань)



нервюры
(углеткань)

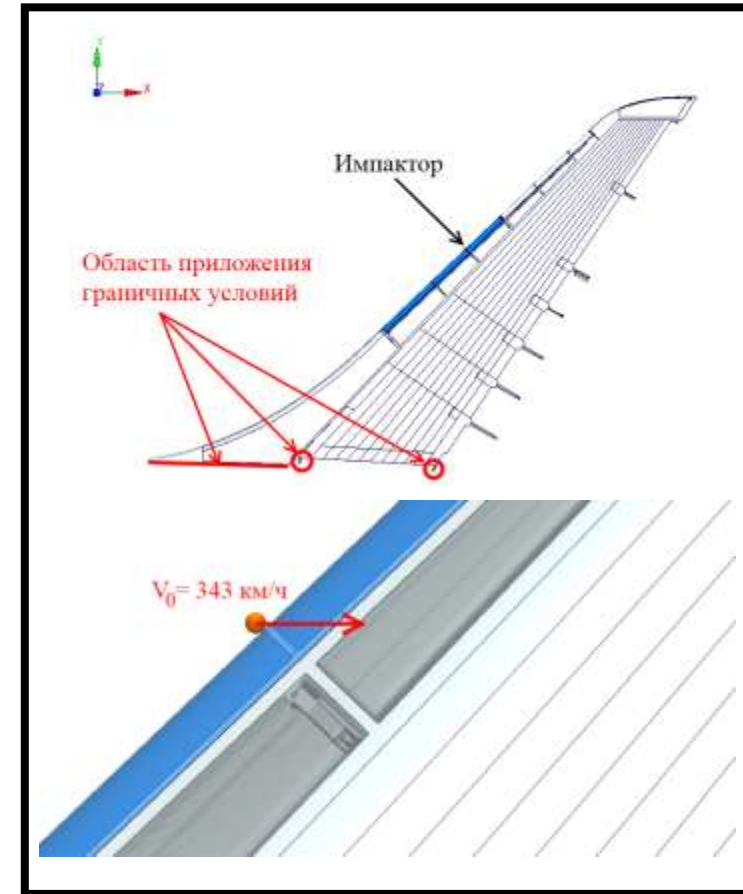
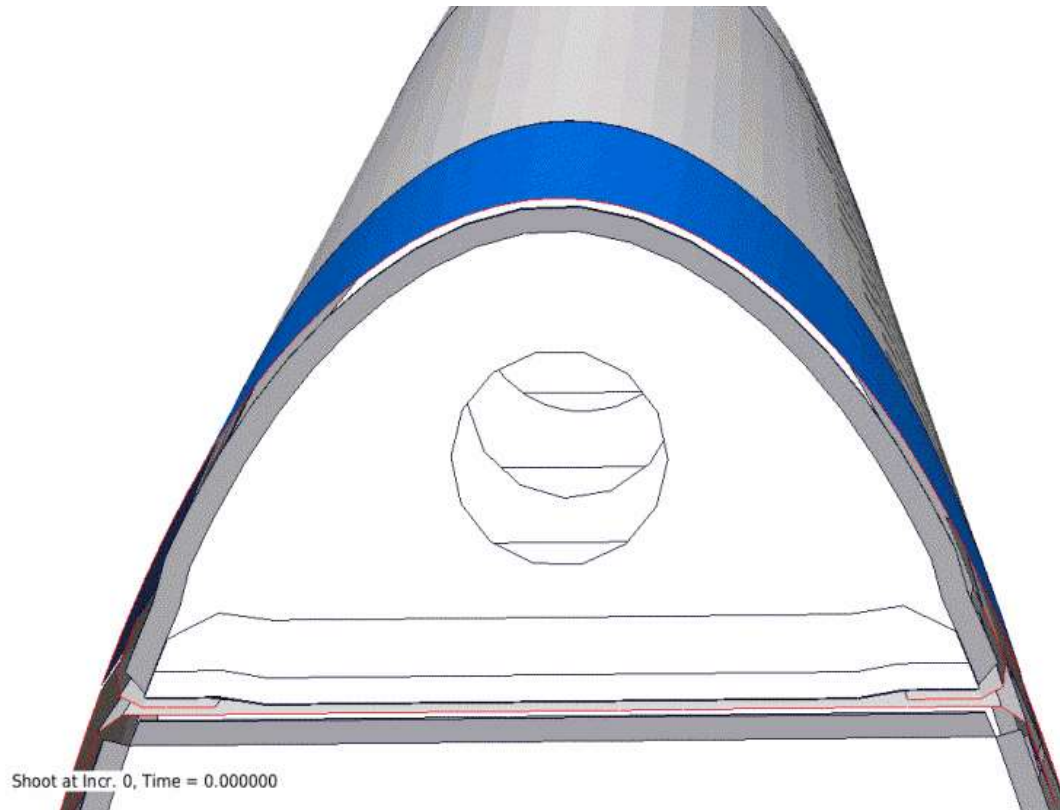


законцовка
(сотовый композитный материал, алюминиевый сплав)



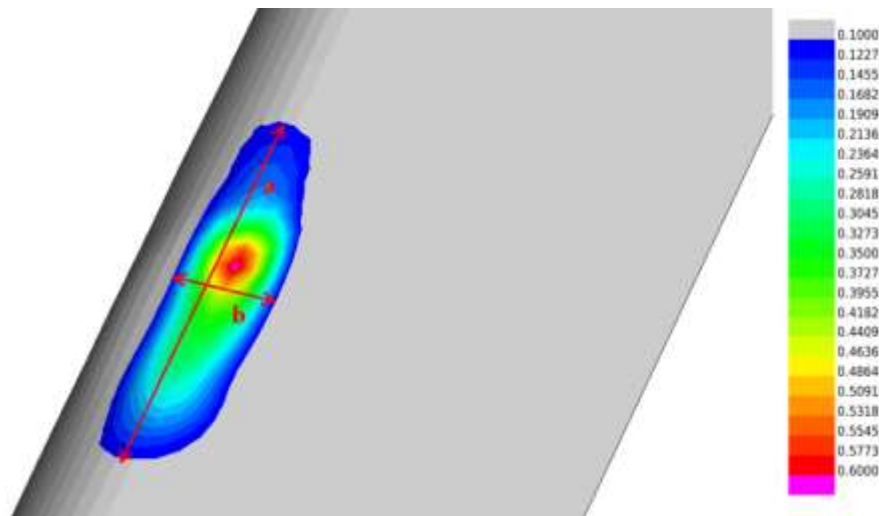
лонжероны
(углеткань)

Анализ результатов вычислительного эксперимента для первой позиции

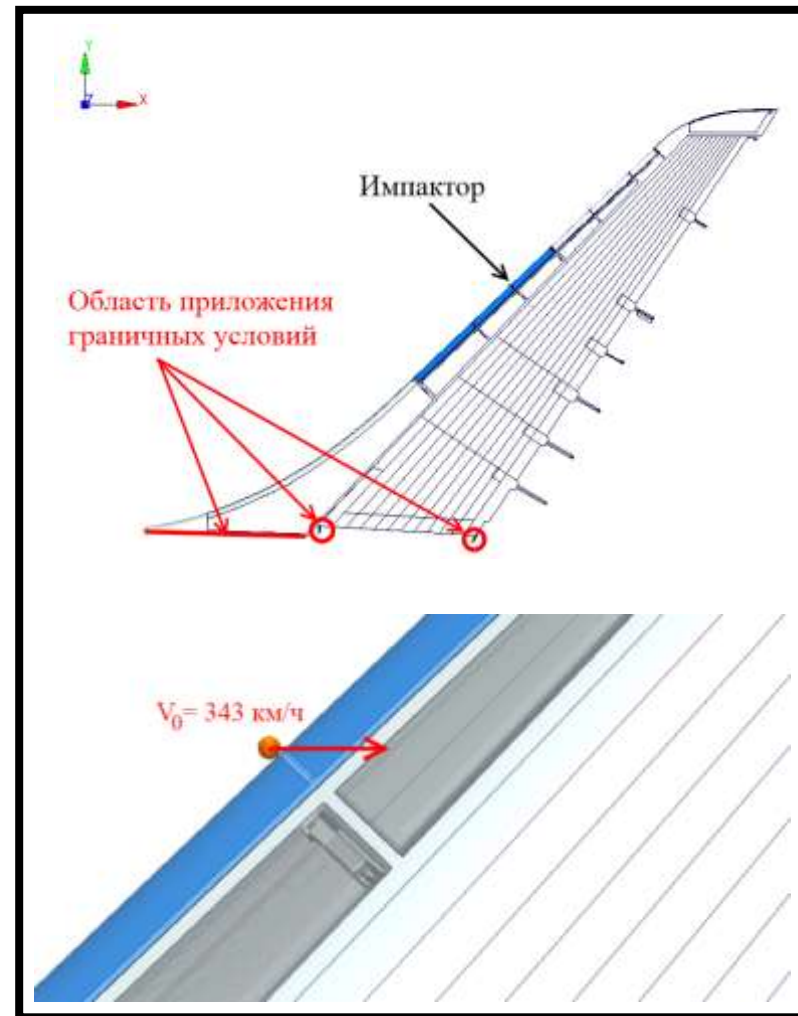
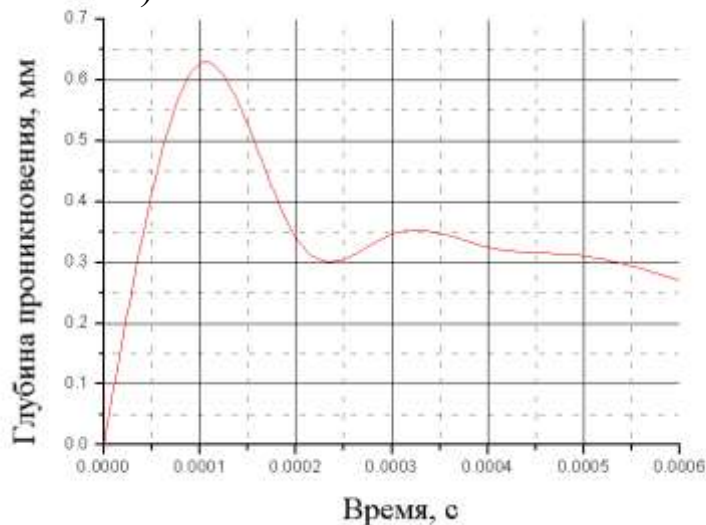


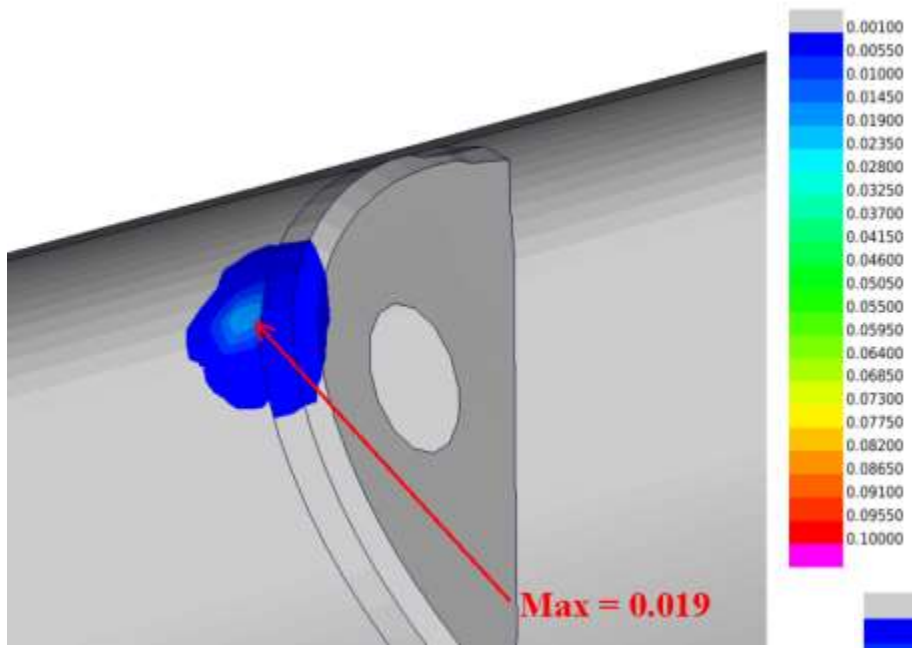
Процесс деформации элемента оперения, сечение по нижней кромке нервюры (Масштаб перемещений равен 5)

Анализ результатов вычислительного эксперимента для первой позиции



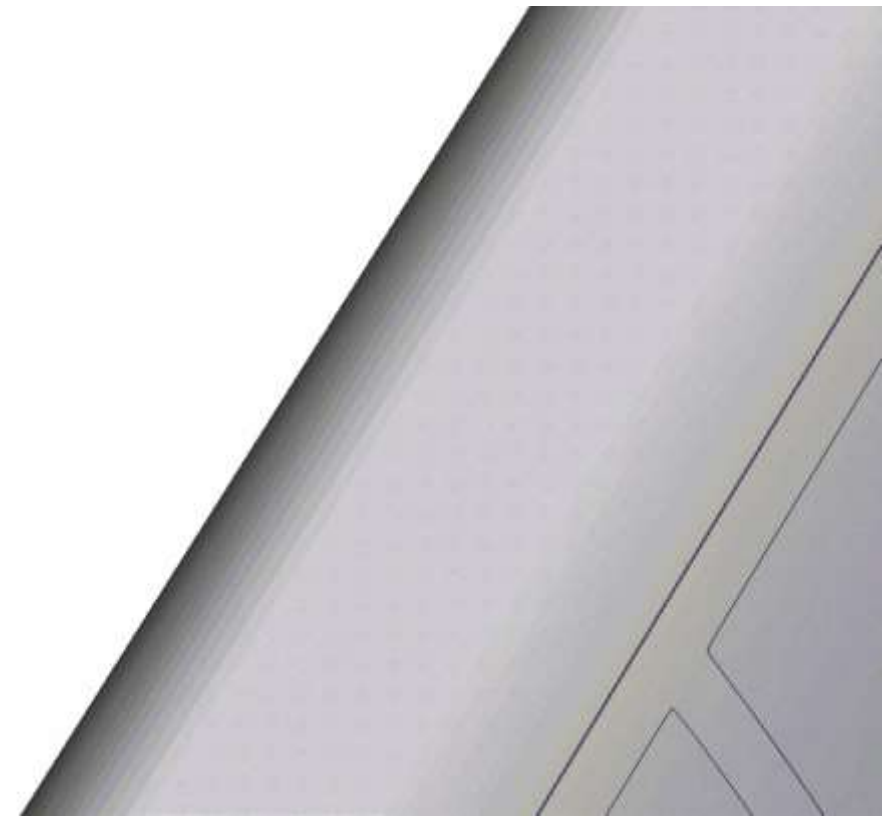
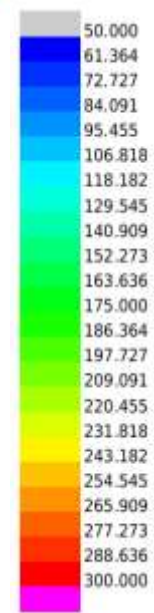
Поле нормальных перемещений элемента оперения в области контакта с образцом, $t = 0.1$ мс, мм
(Max = 0.63 мм)

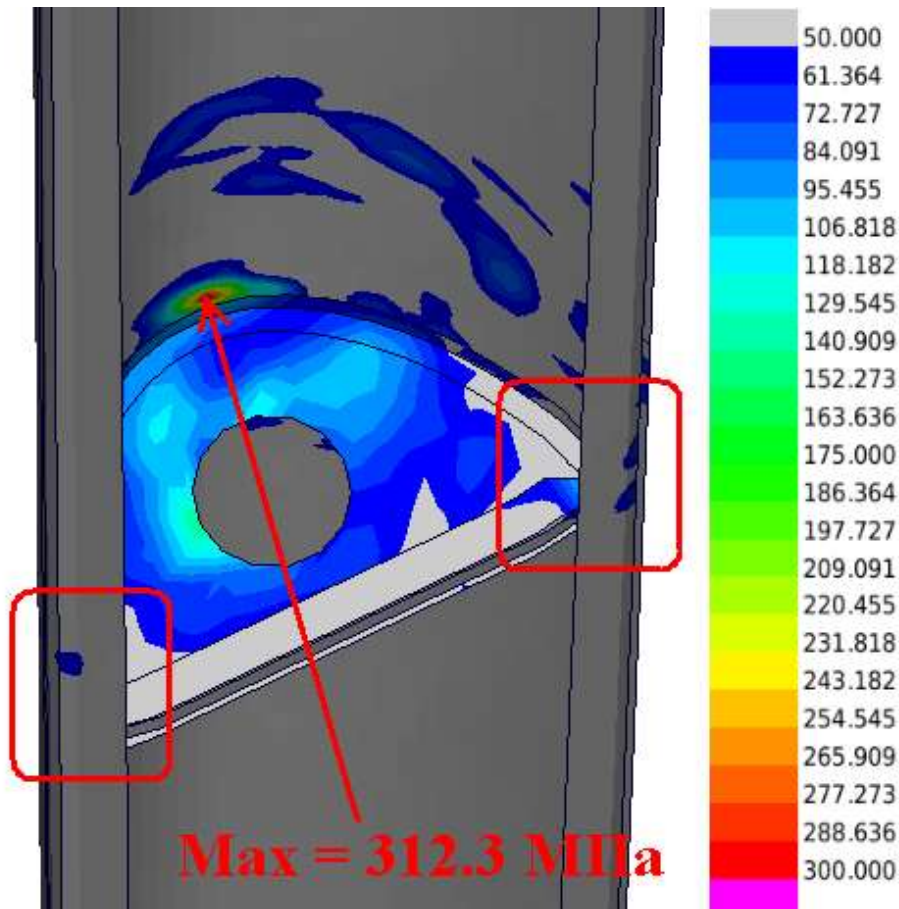




Поле эквивалентных пластических деформаций в области контакта, $t = 0.8$ мс

Поле интенсивности напряжений по Мизесу в обшивке в области контакта, МПа

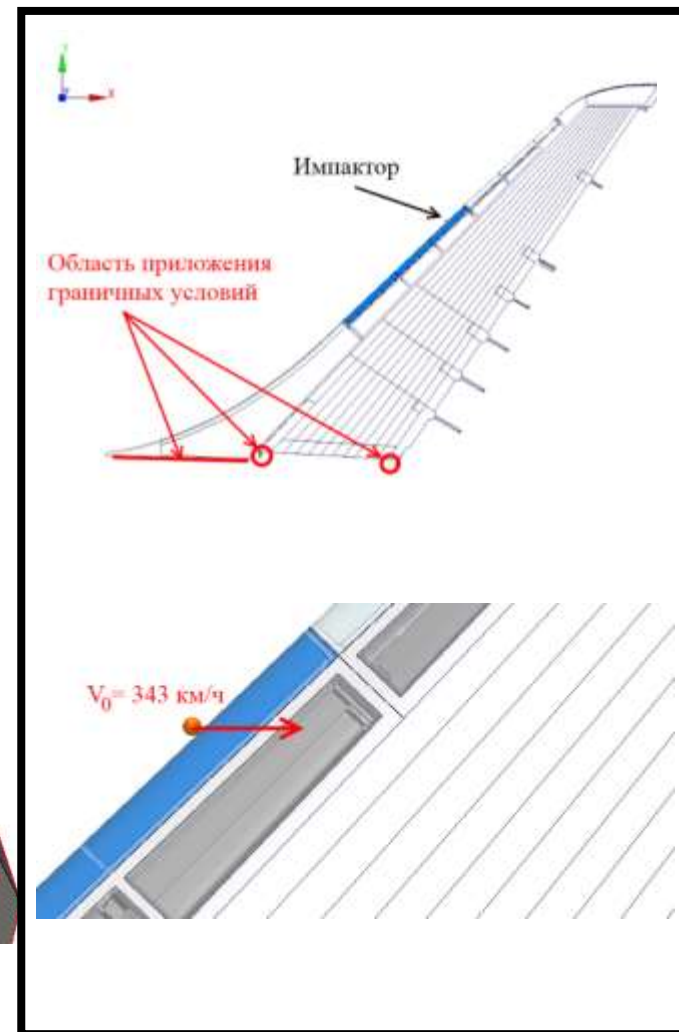




- Максимальная ширина области проникновения ($t = 0.1$ мс) $b = 35.7$ мм, длина $a = 114.5$ мм.
- Остаточная ширина области проникновения ($t = 0.6$ мс) $b = 12.8$ мм, а длина $a = 96.7$ мм
- Наибольшая интенсивность напряжений ($t = 0.3$ мс) 312.3 МПа
- Наибольшие эквивалентные пластические деформации ($t = 0.8$ мс) 0.019

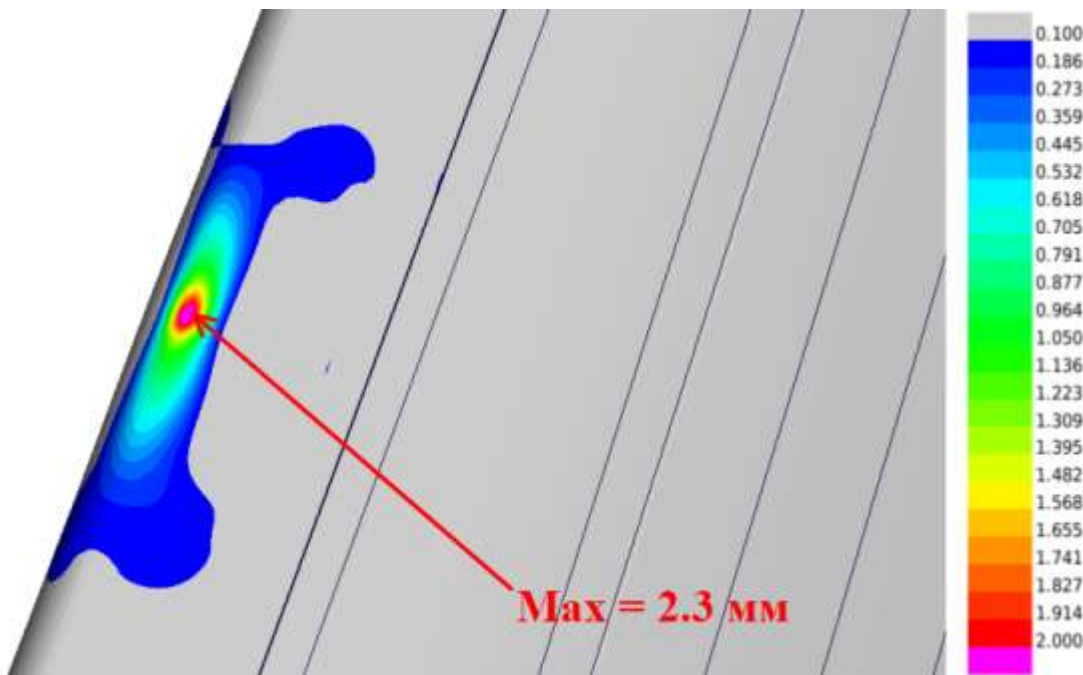
Поле интенсивности напряжений по Мизесу в нервюре в области контакта, $t = 0.3$ мс, МПа

Анализ результатов вычислительного эксперимента для второй позиции

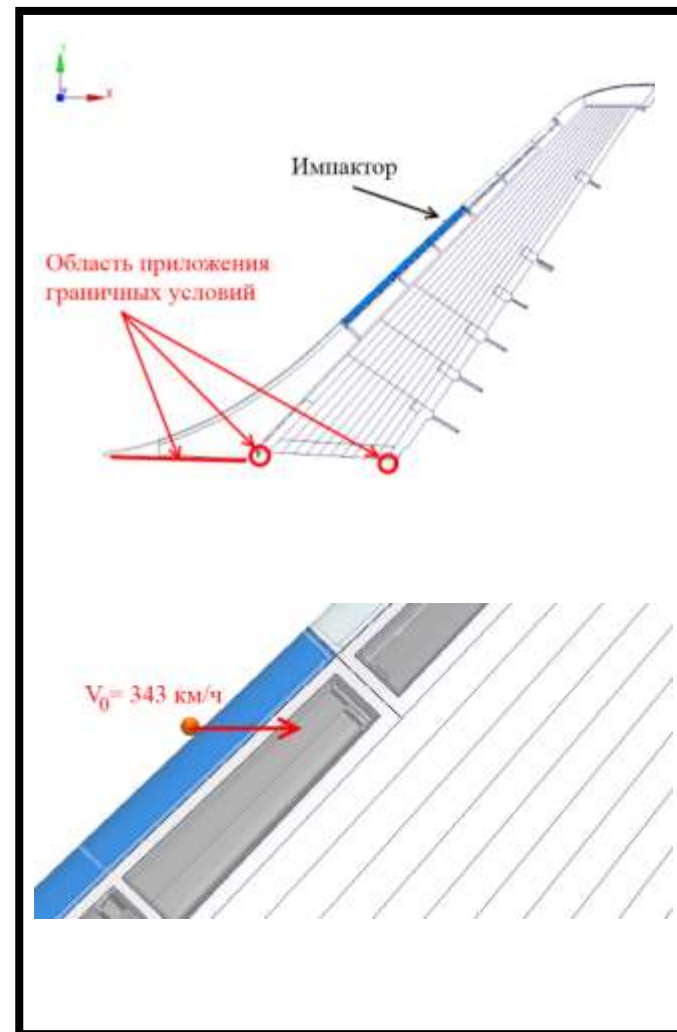


Процесс деформации элемента оперения, сечение в области контакта

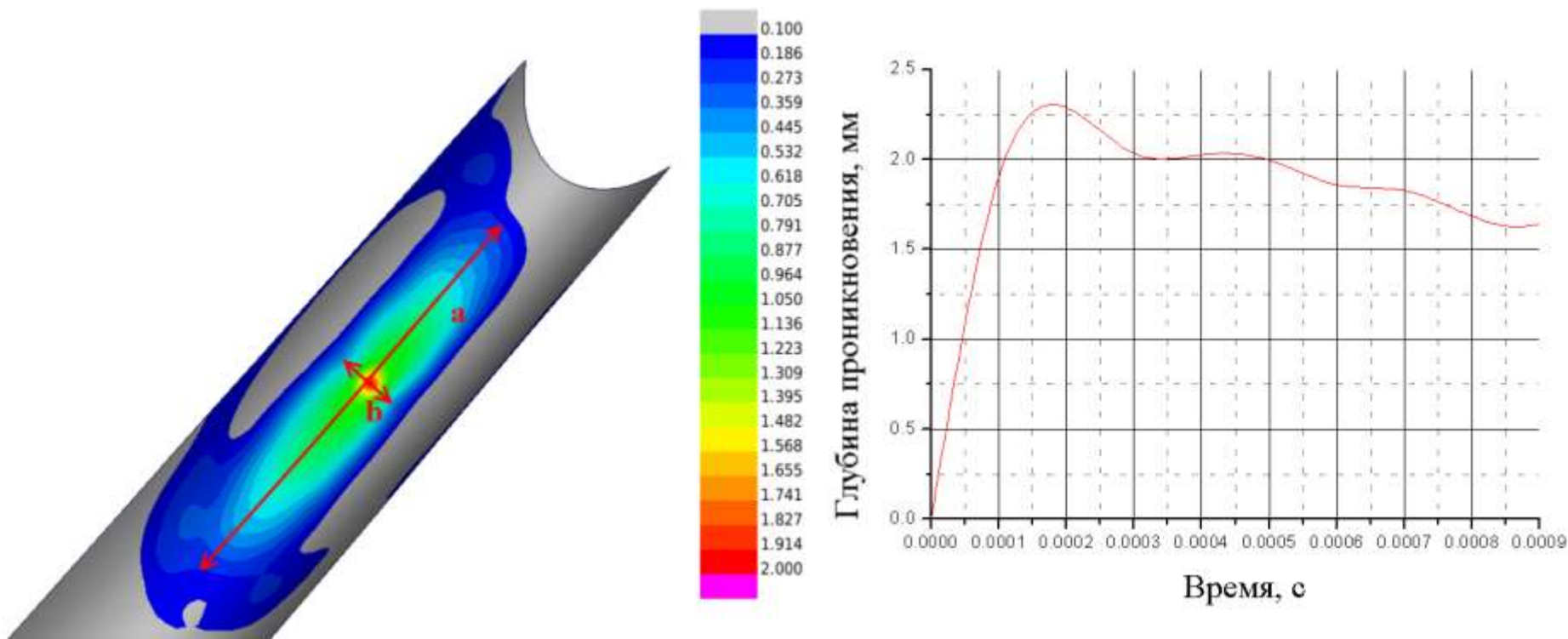
Анализ результатов вычислительного эксперимента для второй позиции



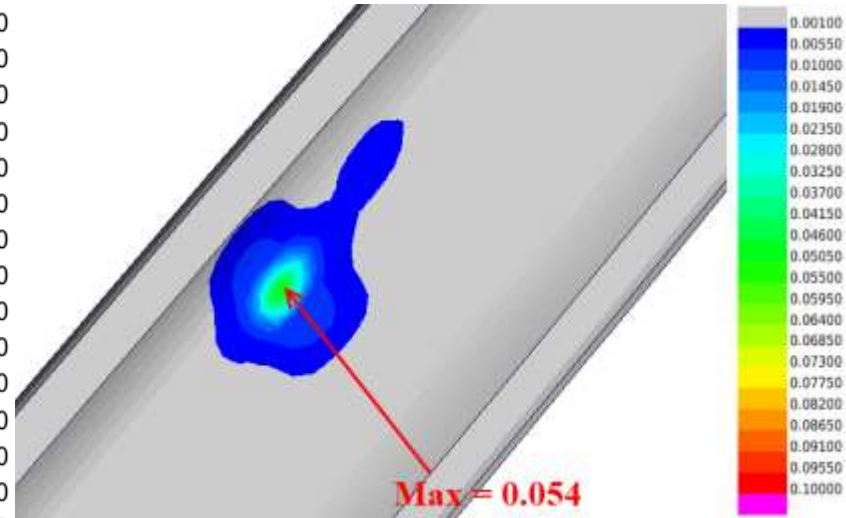
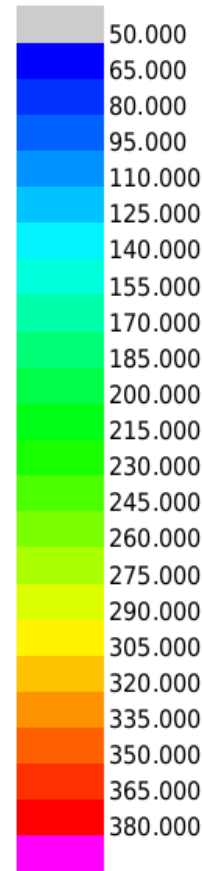
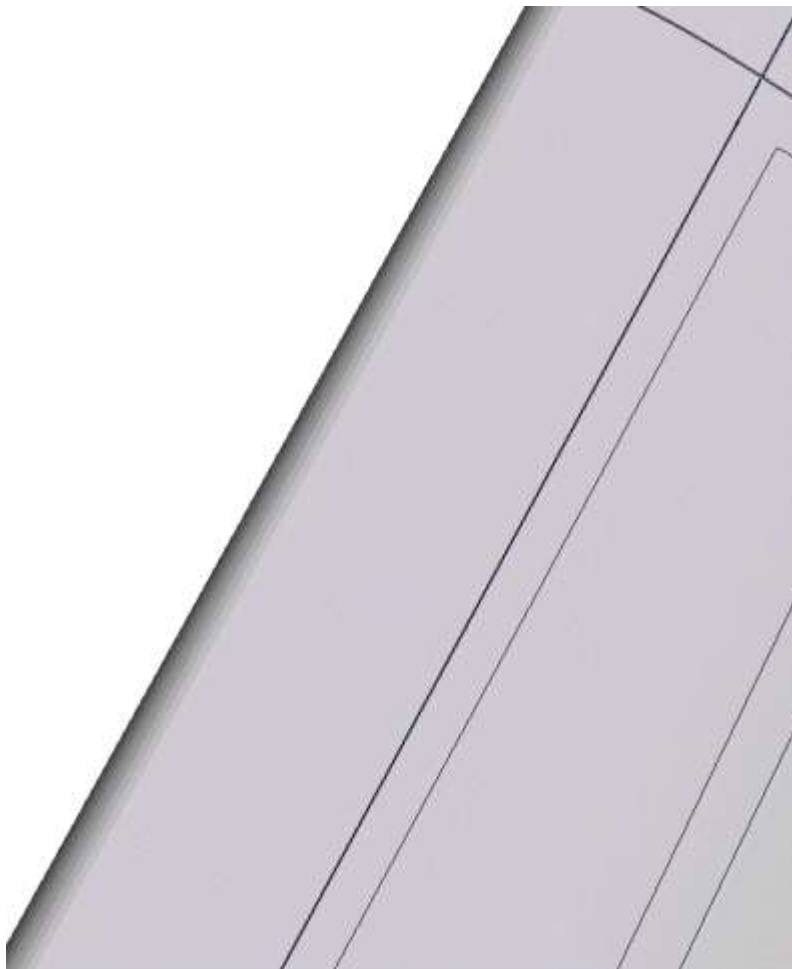
Поле нормальных перемещений обшивки элемента оперения в области контакта с образцом, $t = 0.2$ мс, мм



Анализ результатов вычислительного эксперимента для второй позиции

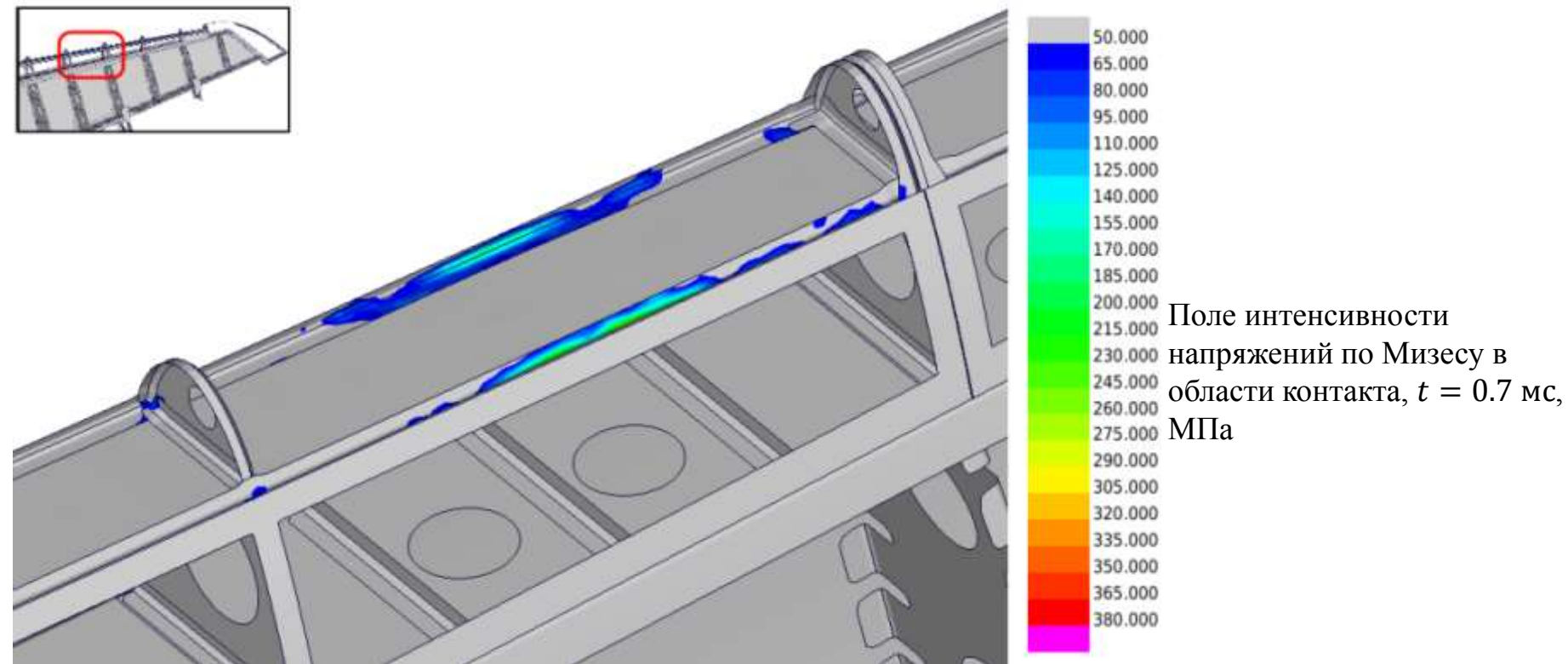


Поле нормальных перемещений обшивки элемента оперения в области контакта с образцом, $t = 0.5$ мс



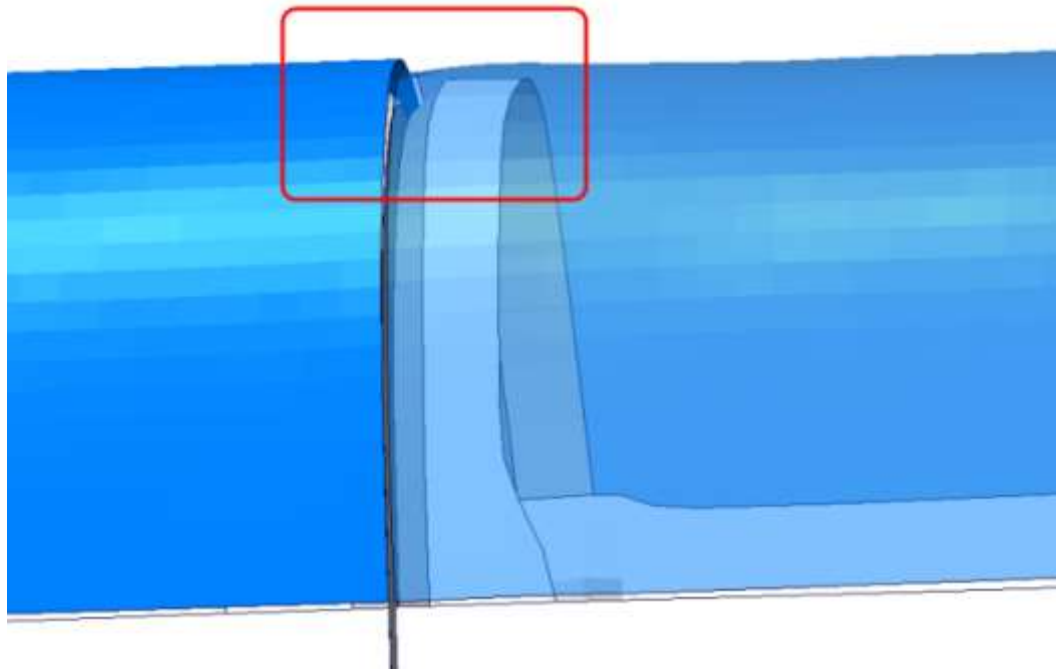
Поле эквивалентных
пластических деформаций
в области контакта с
образцом $t = 1.0$ мс

Поле интенсивности напряжений по
Мизесу в обшивке в области контакта,
МПа

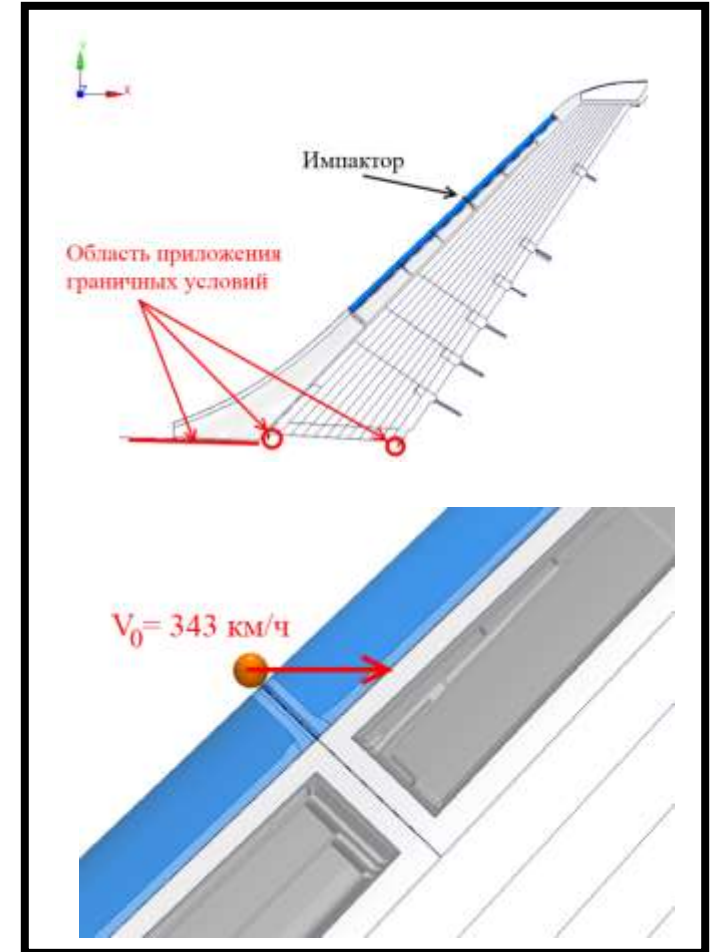


- Максимальная ширина области проникновения ($t = 0.5$ мс) $b = 62.8$ мм, длина $a = 725.9$ мм.
- Остаточная ширина области проникновения ($t = 0.6$ мс) $b = 30.5$ мм, а длина $a = 540.0$ мм
- Наибольшая интенсивность напряжений ($t = 0.1$ мс) 387.5 МПа
- Наибольшие эквивалентные пластические деформации ($t = 1.0$ мс) 0.054

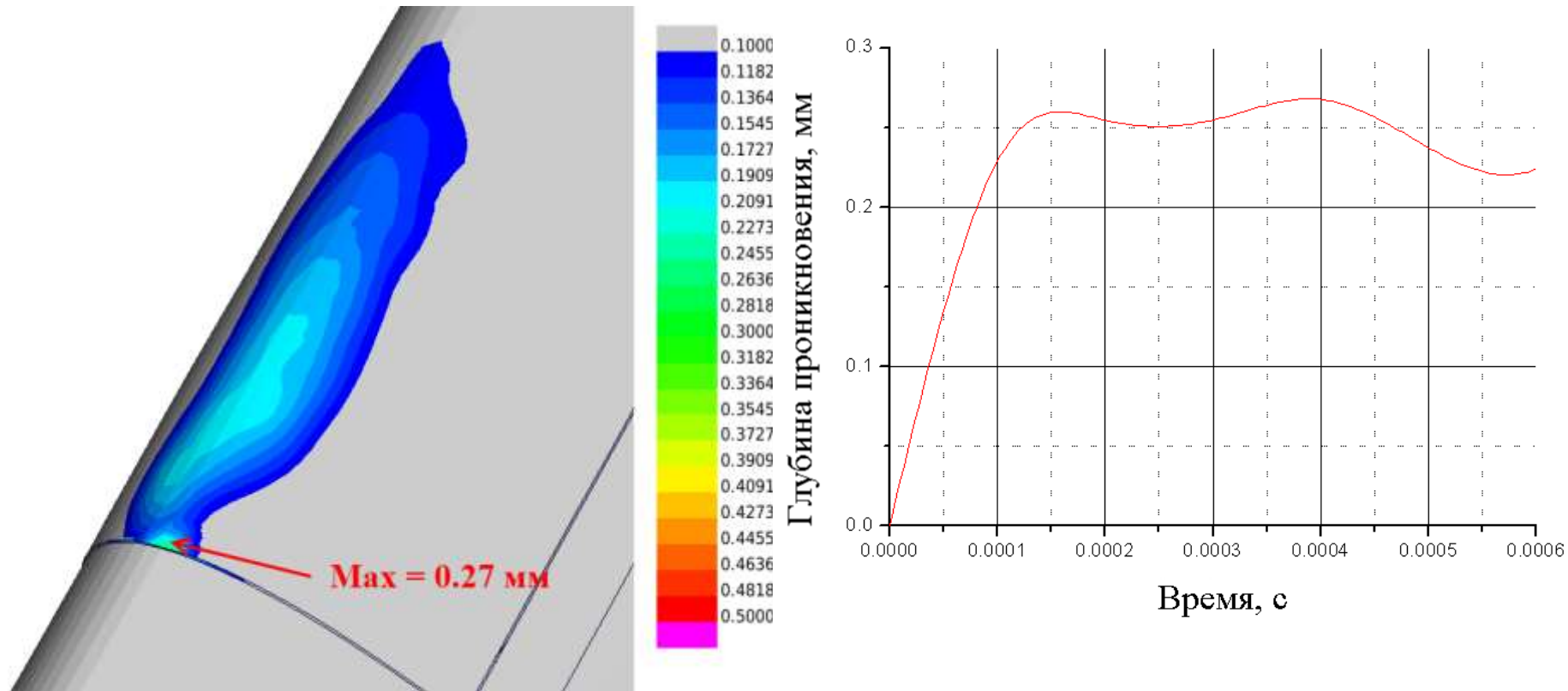
Анализ результатов вычислительного эксперимента для третьей позиции



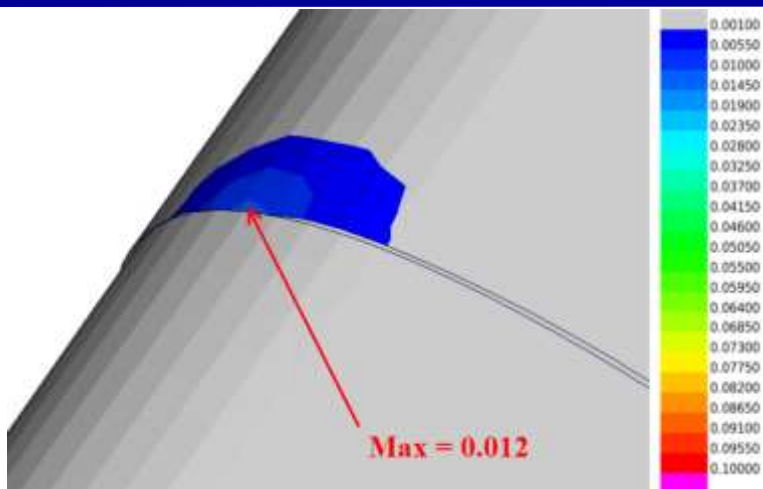
Деформированное состояние элемента оперения, $t = 1.0$ мс.
Масштаб перемещений равен 10



Анализ результатов вычислительного эксперимента для третьей позиции

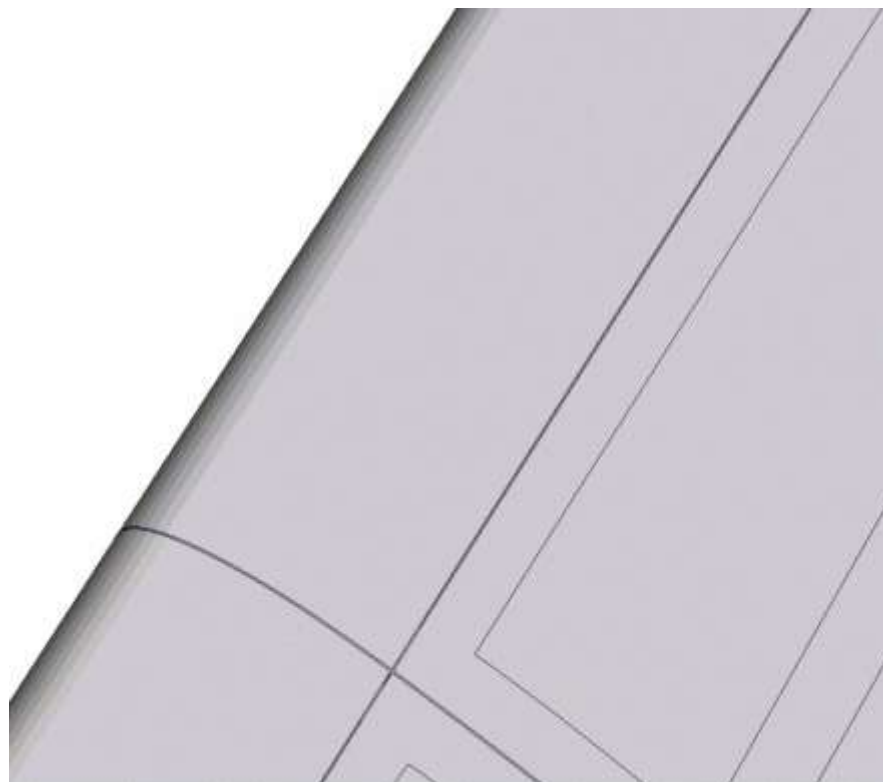
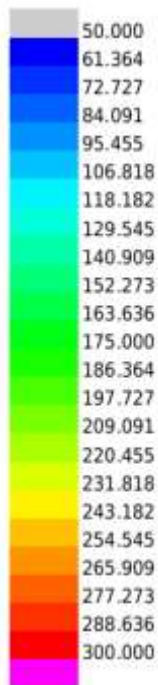


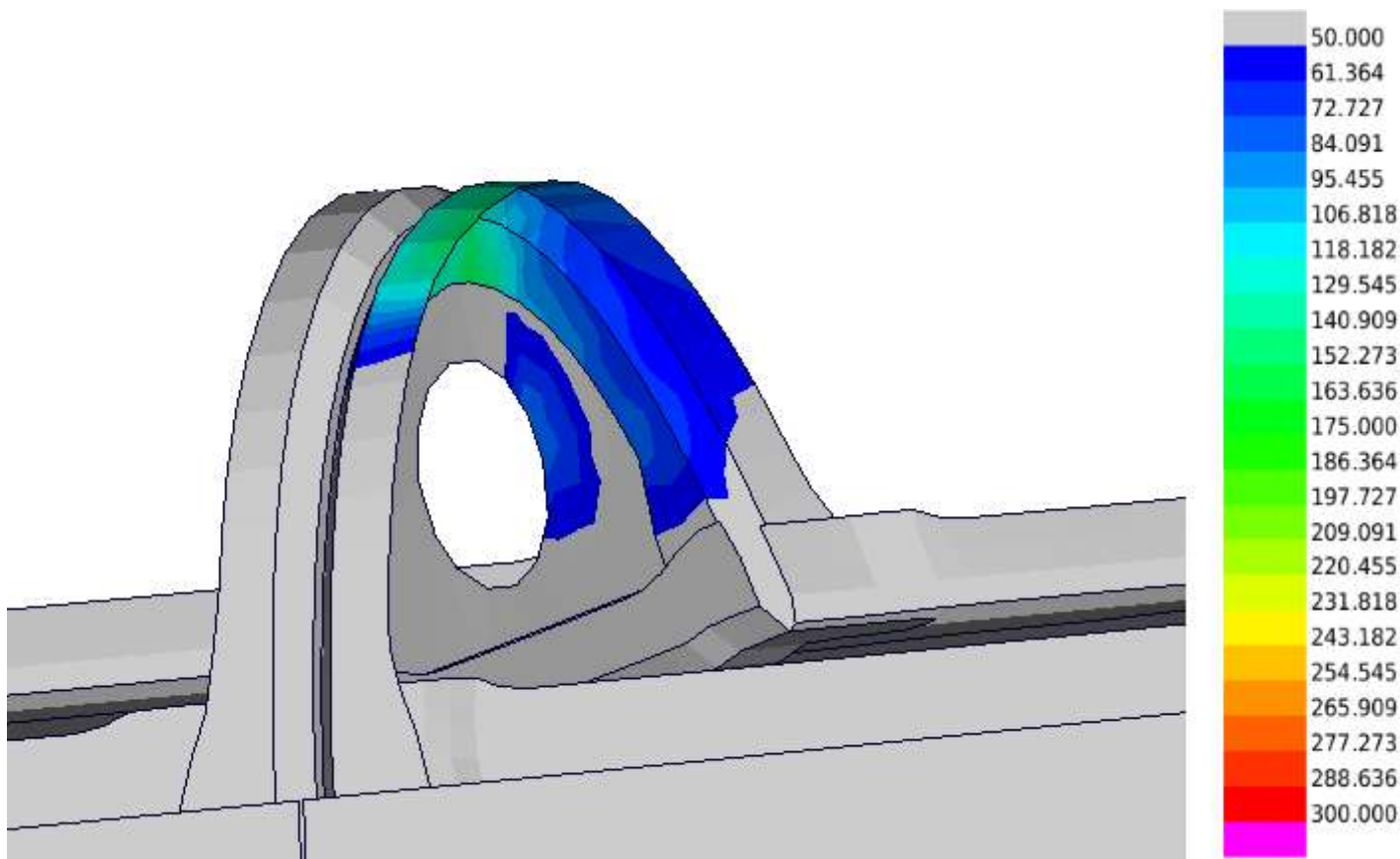
Поле нормальных перемещений элемента оперения
в области контакта с образцом, $t = 0.4$ мс, мм



Поле эквивалентных
пластических деформаций в
области контакта с образцом
 $t = 0.3$ мс

Поле интенсивности напряжений по Мизесу в
обшивке в области контакта, $t = 0.2$ мс, МПа

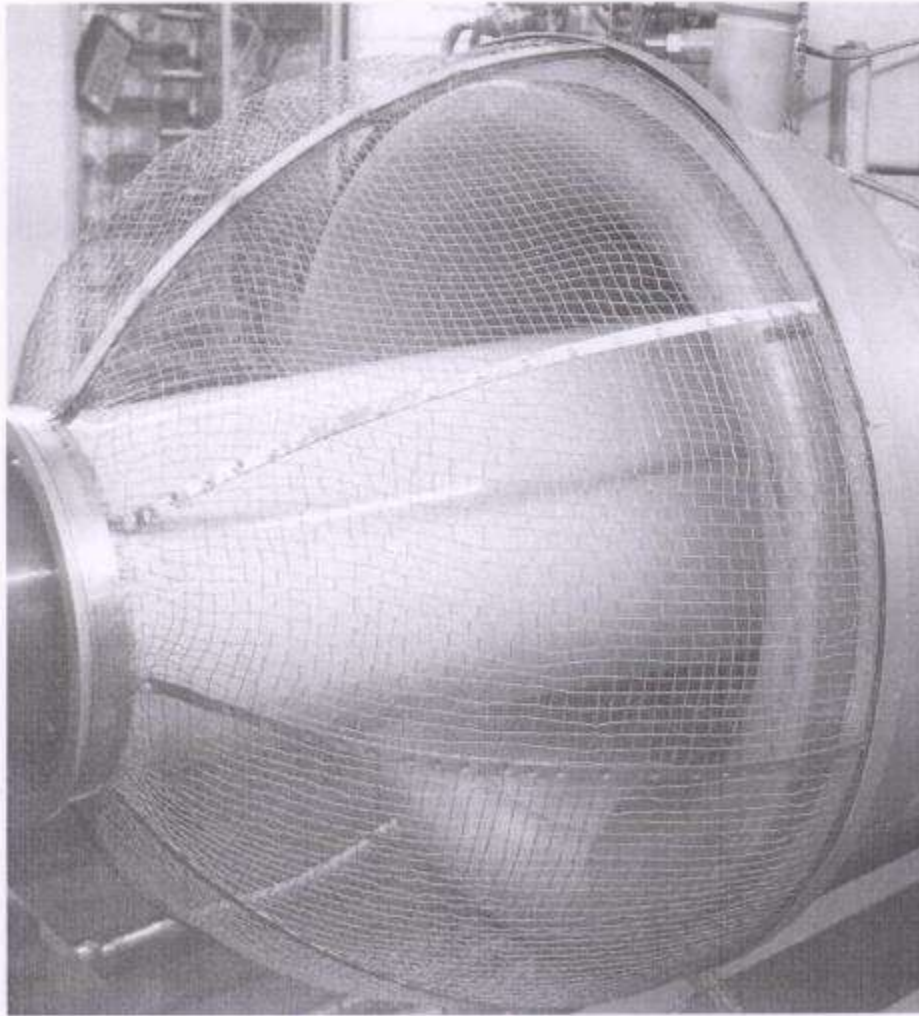




Поле интенсивности
напряжений по Мизесу в
области контакта,
 $t = 0.2$ мс, МПа

- Наибольшее проникновение обшивки не превышает 0.5 мм ($t = 0.4$ мс)
- Наибольшая интенсивность напряжений ($t = 0.2$ мс) 309.7 МПа
- Наибольшие эквивалентные пластические деформации ($t = 0.3$ мс) 0.012

Дальнейшее применение результатов исследования



КЭ моделирование одиночного столкновения градины диаметром 25 мм и 50 мм (максимальная скорость 290 км/ч) с сеткой двигателя вертолета.

Возможное развитие модели:

- Разработка КЭ модели градины с использованием совмещенного метода Лагранжа-Эйлера.
- Разработка КЭ модели градины с использованием преобразования лагранжевых элементов в домен сглаженных частиц в процессе расчета.
- Разработка КЭ модели градины с учетом неоднородности структуры



Заключение:

1. В ходе выполнения работы была разработана конечно-элементная модель градины, как сферического образца с однородным материалом. Для этого была подробно рассмотрена серия экспериментов по столкновению ледяных сфер с титановой пластиной на высоких скоростях (73.5-126 м/с). Было произведено исследование чувствительности решения к размеру элемента в случае использования объемных лагранжевых элементов. В результате моделирования физического эксперимента была разработана упруго-пластичная модель материала льда с пределом текучести, зависящим от деформации и специфическим критерием разрушения. Также была произведена калибровка этого материала для начальных скоростей образца в диапазоне от 73.5 м/с до 126.0 м/с.
2. В ходе работы были проведены вычислительные эксперименты с целью определения возможных повреждений со стороны града размером 42.7 мм, имеющего начальную скорость 343 км/ч (95.4 м/с) для конструктивных элементов вертикального оперения самолета. По результатам данных вычислительных экспериментов был сделан вывод о том, что для данной конструкции вертикального оперения столкновение с градом на рассматриваемой скорости не представляет серьезной опасности.
3. Далее планируется развитие работы с целью увеличения точности расчета пиковой нагрузки, а также приближения вида ее зависимости к виду полученному в результате эксперимента по следующим направлениям :
 - Разработка КЭ модели градины с использованием совмещенного метода Лагранжа-Эйлера.
 - Разработка КЭ модели градины с использованием преобразования лагранжевых элементов в домен сглаженных частиц в процессе расчета.
 - Разработка КЭ модели градины с учетом неоднородности структуры



СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Shazly, M., V. Prakash, and B. Lerch. "High Strain-rate Behavior of Ice under Uniaxial Compression." – International Journal of Solids and Structures 46 (2009): 1499-515.
2. Kim, H., and J. N. Kuene. "Compressive Strength of Ice and Impact Strain Rates." – Journal of Material Science 42 (2007): 2802-806.
3. Kim, H., and K. T. Kedward "Modeling Hail Ice Impacts and Predicting Impact Damage Initiation in Composite Structure"– AIAA Journal Vol. 38, No. 7, July 2000.
4. Weinberg B., "Mechanical properties of ice" – 1938
5. Simulia Abaqus 6.12 documentation.
6. Monaghan, J., "Smoothed Particle Hydrodynamics," – Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1992.
7. Johnson, J., R. Stryk, and S. Beissel, "SPH for High Velocity Impact Calculations," – Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996.
8. Libersky, L. D., and A. G. Petschek, "High Strain Lagrangian Hydrodynamics," – Journal of Computational Physics, vol. 109, pp. 67–75, 1993.
9. T. Sain, R. Narasimhan "Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime" – International Journal of Solids and Structures vol. 48, 2011
10. K. S. Carney, D. J. Benson, P. DuBois, R. Lee "A phenomenological high strain rate model with failure for ice", – International Journal of Solids and Structures vol 43, 2006
11. "Авиационные правила" Части 21, 25, 39, 145, 183, Межгосударственный авиационный комитет, –1999
12. "Hail threat standardisation", EASA, research project EASA.2008/5



Спасибо за внимание.