

# Численное моделирование экспериментов по исследованию прочностных характеристик льда

Миряха В.А., Санников А.В.

кафедра информатики и  
вычислительной математики МФТИ

# Мотивация

- В полуэмпирических формулах для ледовой нагрузки используется *прочность на одноосное сжатие*  $R_{сж}$ .
- В моделях на основе МСС, способных описывать поведение объектов произвольной геометрии, необходимо задание прочности «бесконечно малого» объема материала.

# Мотивация

- В экспериментах измеряют в основном  $R_{сж}$ , что явно не выражается через «микроскопическую» прочность льда
- Нахождение параметров льда модели на основе МСС возможно путём сопоставления лабораторного эксперимента и компьютерного моделирования

# Механико-математическая модель льда

- изотропная упруго-идеально-пластическая модель
- критерий хрупкого разрушения по главным напряжениям и пластического (объемного) разрушения в случае превышения величины пластической деформации порогового значения

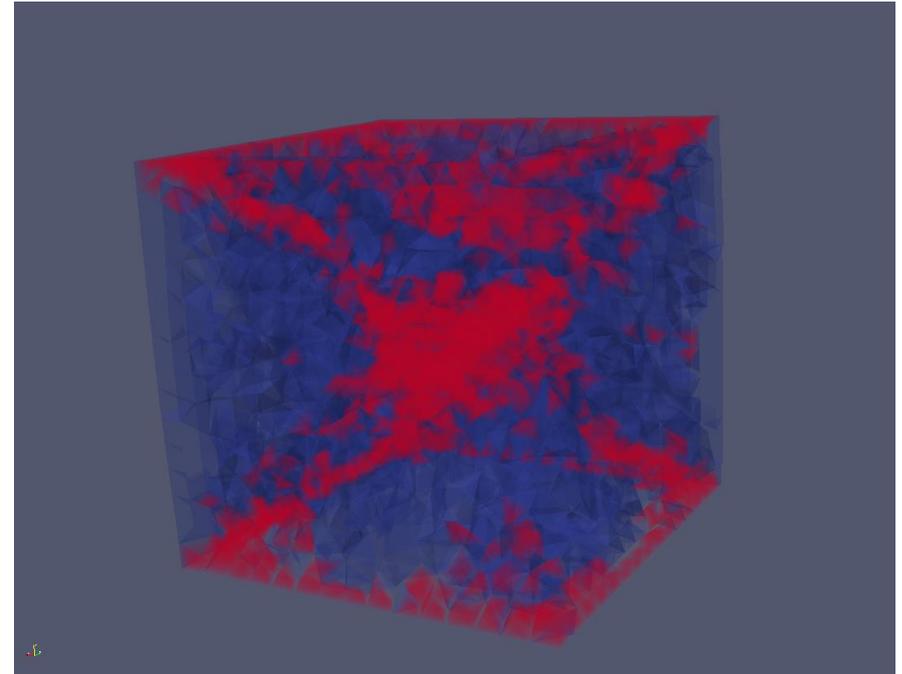
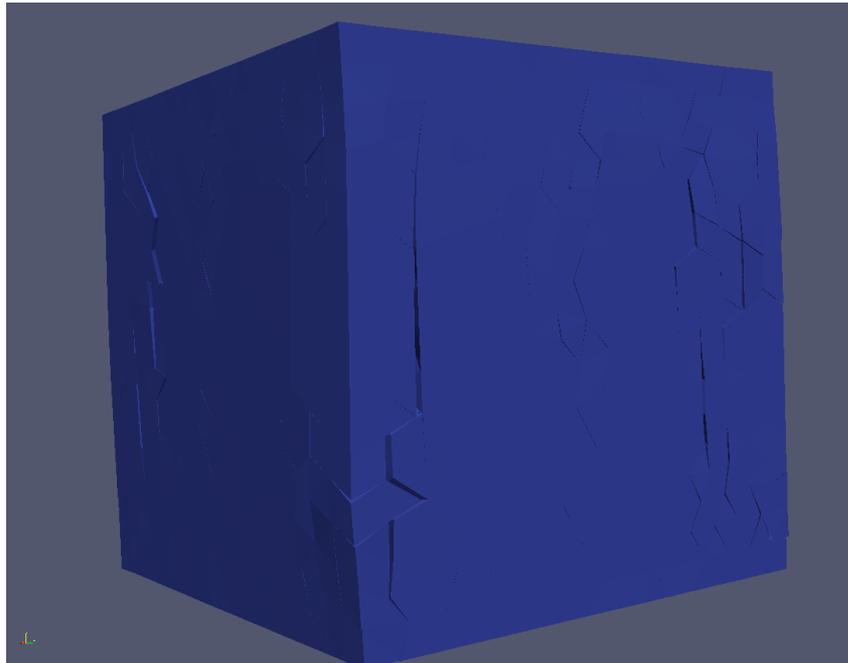
# Численный метод и его реализация

- Разрывный метод Галёркина
- 2D+3D
- Параллельная реализация на основе OpenMP + MPI

# Прочность льда на одноосное сжатие

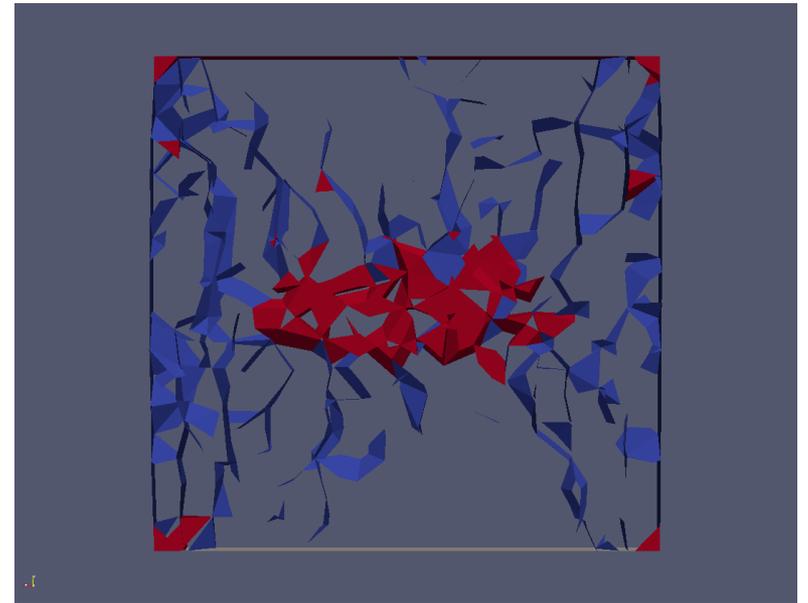
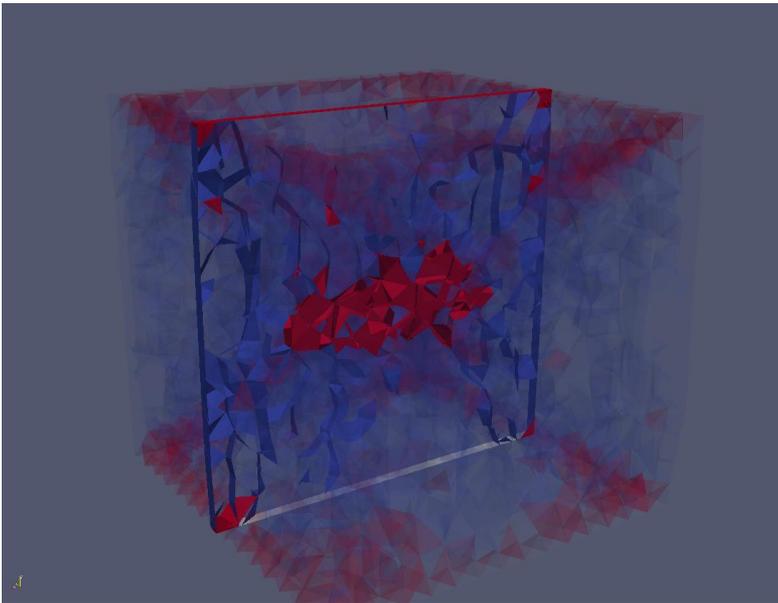
- Сдавливание ледяного куба с постоянной скоростью, где измеряется величина приложенной нагрузки от осевого смещения

# Характерный вид внешней и внутренней картины трещин на ледяном образце

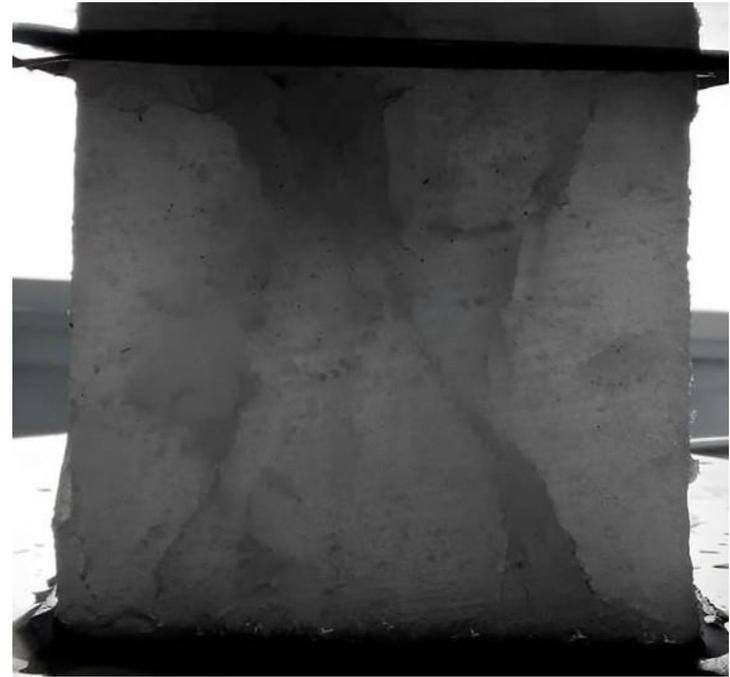


На внутренней картине разрушения синим цветом показано разрушение по критерию на растяжение, красным – объёмное разрушение ячеек

# Сечение картины разрушений ледяного образца



# Картини разрушения ледяного образца в натуральных экспериментах



# Сравнение компьютерного и натурного эксперимента

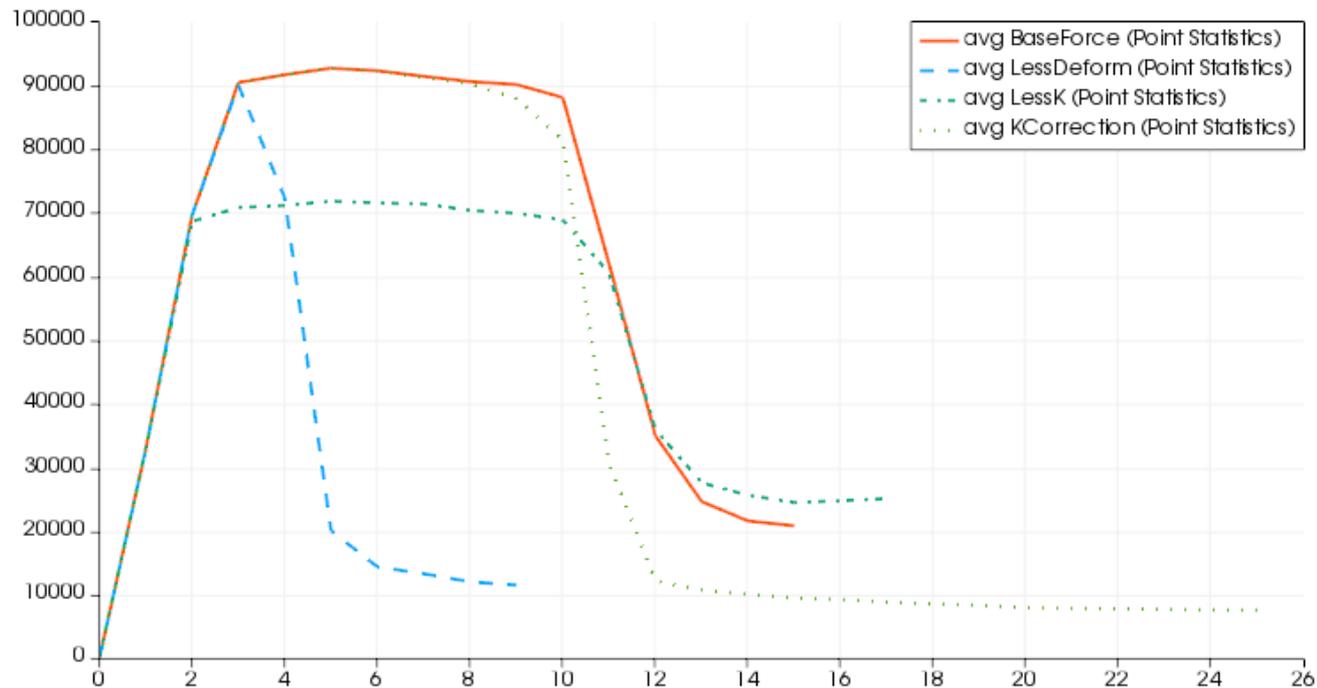
- Снаружи преобладают вертикальные трещины, образовавшиеся в результате локальных растяжений.
- Наименее подвержены разрушению конические области, находящиеся в непосредственном контакте с прессом.
- Внутри образца преобладает объёмное разрушение, в результате чего лёд крошится в мелкую крошку.

# Картины разрушения цилиндрических образцов в натурных экспериментах



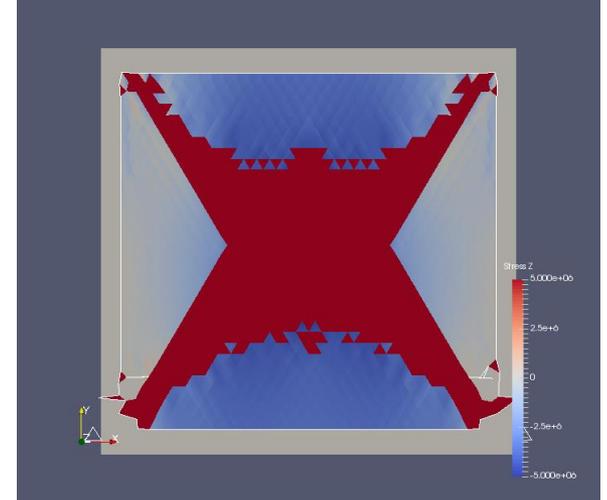
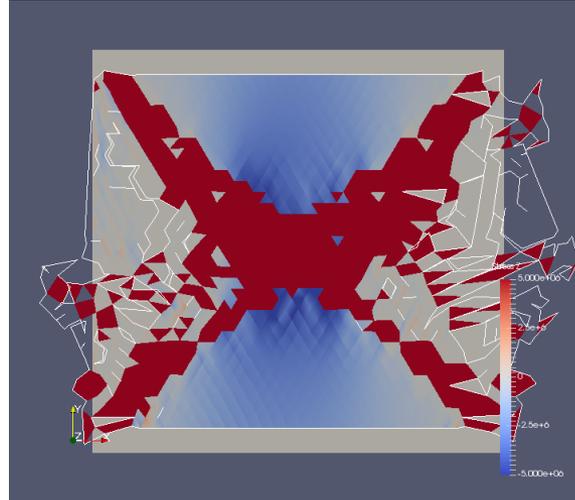
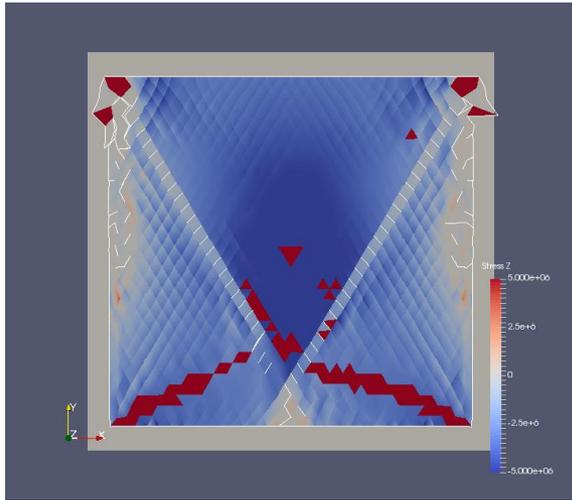
Хомуты на концах соответствуют модели закреплённой границы

# Зависимости силы сжатия образца от времени при варьировании параметров модели прочности льда.



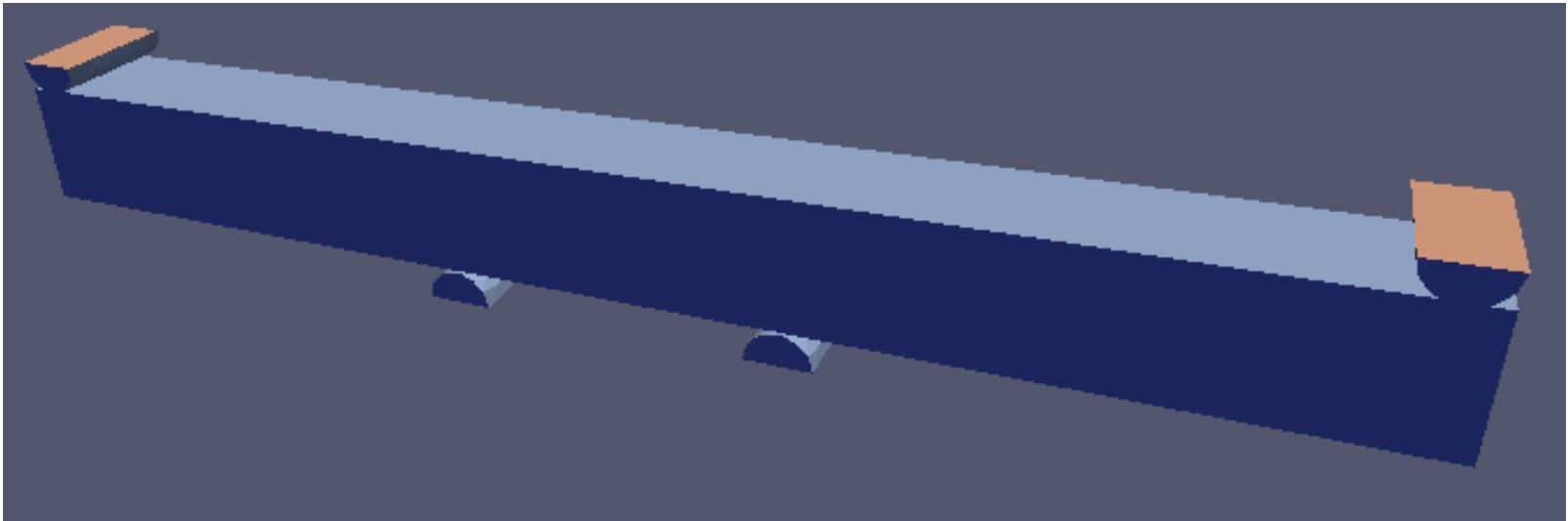
По оси X отложен номер временного отсчёта (интервал между отсчётами 0.00023с), по оси Y – сила сжатия пресса, Н.

# Изменение качественной картины разрушений при варьировании значений параметра максимальной пластической деформации

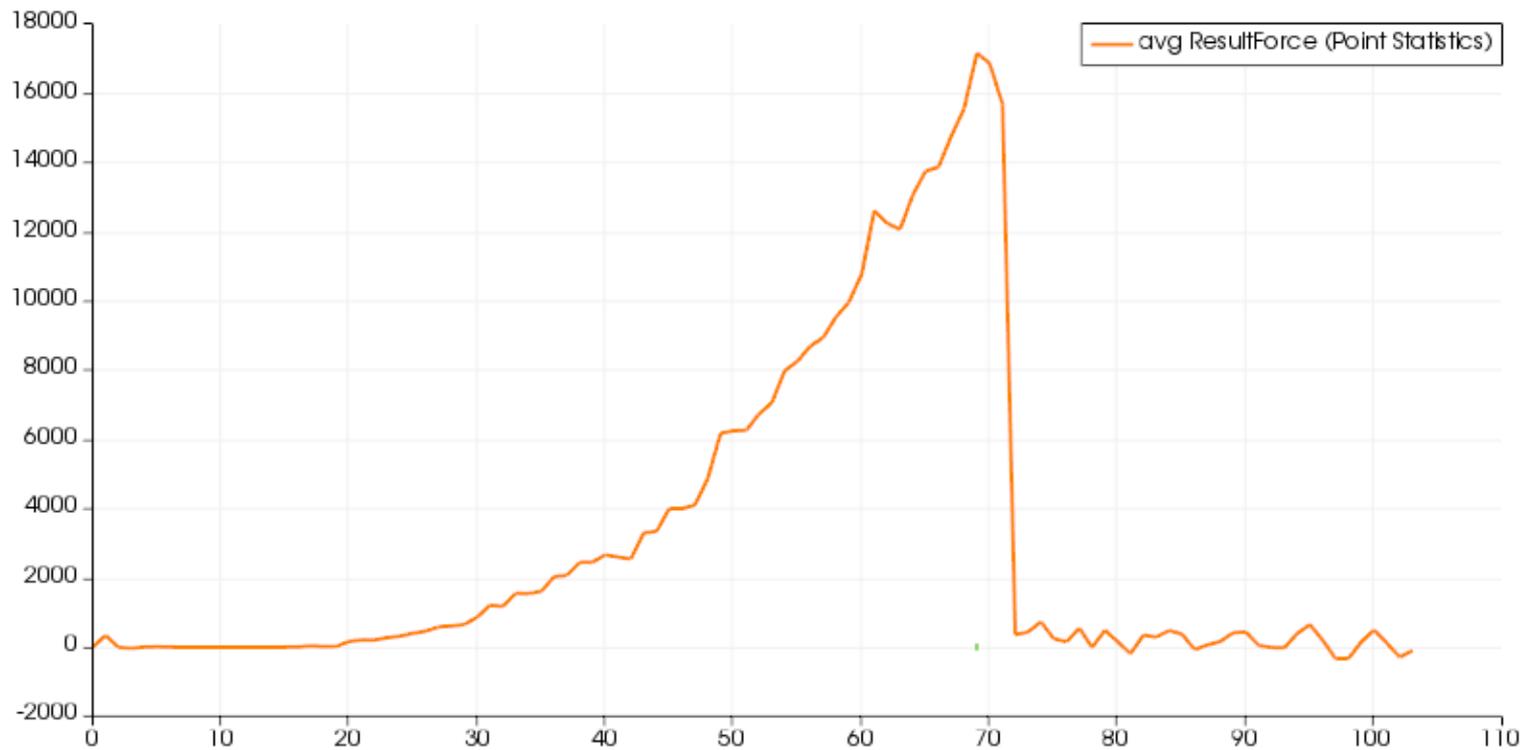


центральный расчёт соответствует типовому значению, слева предел увеличен, справа - уменьшен

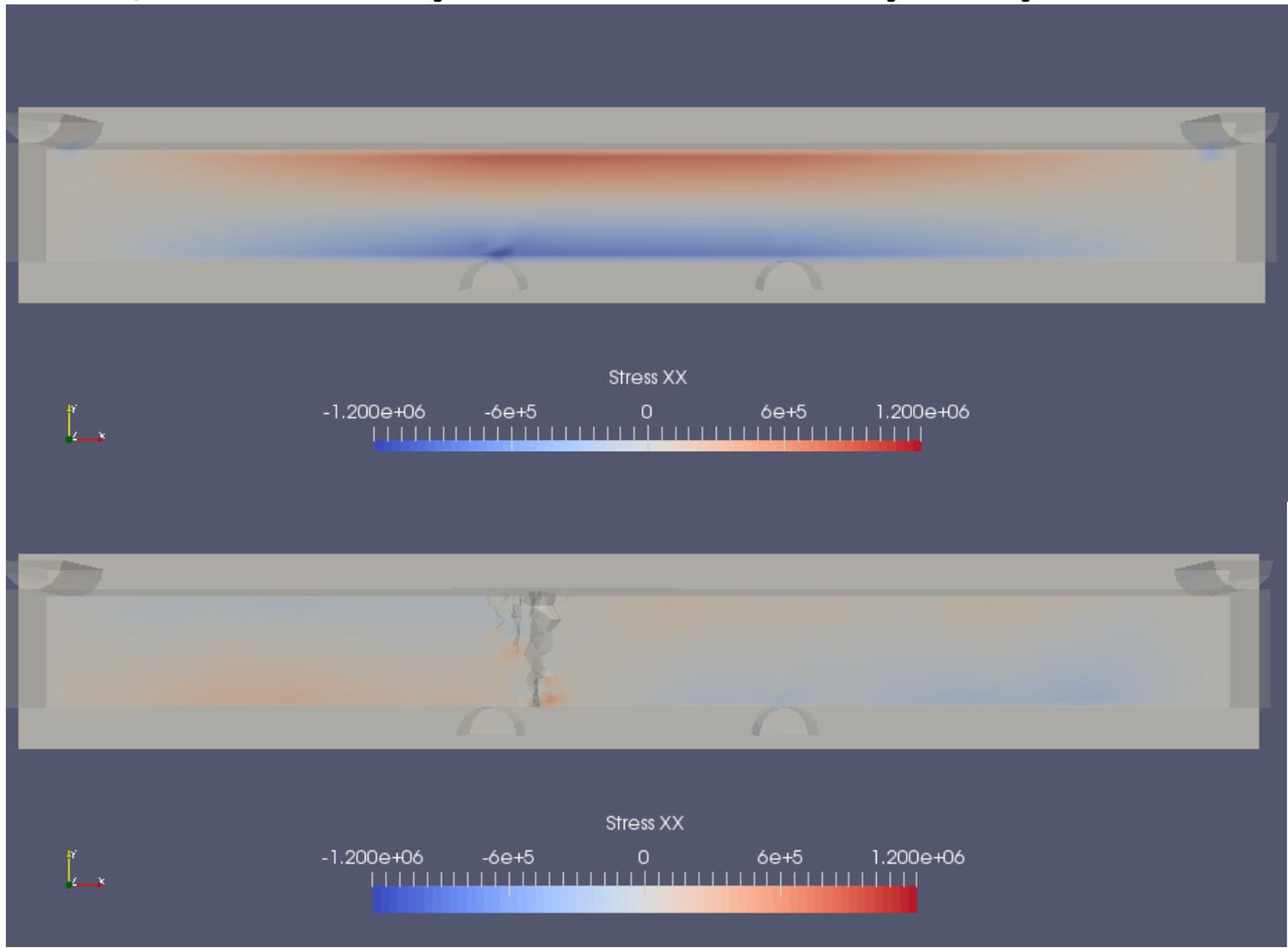
# Прочность льда на изгиб 4-х точечным методом



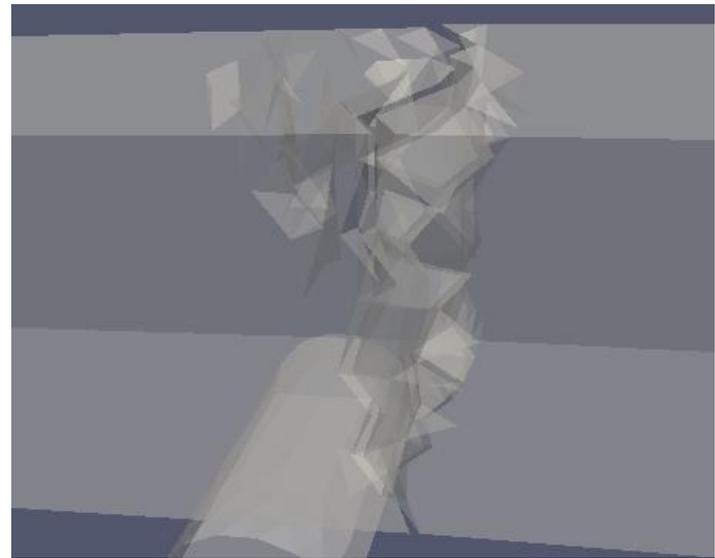
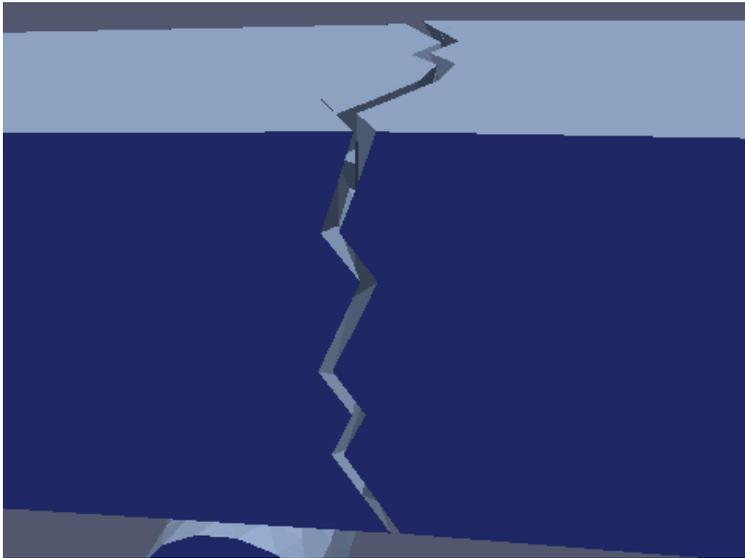
# Зависимость силы нагрузки от времени на индентер.



# Картини растягивающих напряжений перед образованием трещины нормального разрыва и



# Внешняя и внутренняя структура образовавшейся трещины



# Дальнейшая работа

- Учёт зависимости параметров льда от скорости деформации
- Анизотропия льда
- Ускорение вычислений