Моделирование разрушения материалов с помощью метода гладких частиц (SPH)

Представлено на конференцию пяти лабораторий 2005 г.
Вена, Австрия

Дж. Майкл Оуэн (J. Michael Owen)

Отделение “Эй-Экс” (AX)

Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса

Июнь 2005 г.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства энергетики США Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса Университета штата Калифорния по контракту № W-7405-Eng-48.

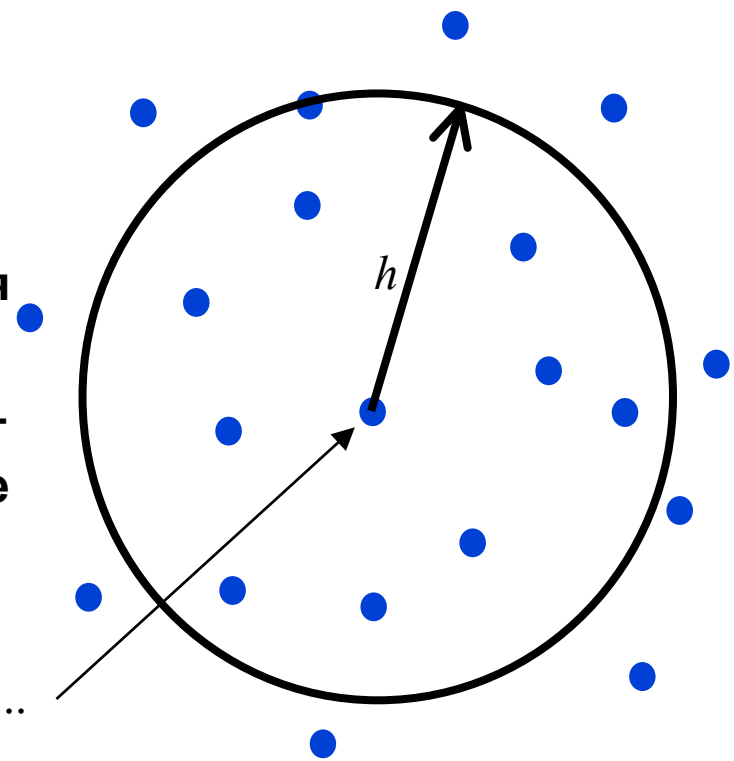
Адрес: Lawrence Livermore National Laboratory, P.O. Box 808, Livermore, CA 94551-0808

Чем это интересно?

- Метод гладких частиц (SPH) является старейшим методом из числа тех, которые сегодня составляют класс безсеточных гидродинамических методов.
- Преимущества:
  - Лагранжевый *и* надежный (нет сетки, которая могла бы запутываться).
    - Хорошо приспособлен для решения задач со сложными течениями или высокими скоростями деформации.
  - Прост при рассмотрении новых физических явлений.
    - Зависящие от времени переменные не вызывают трудностей – никогда не возникает необходимости в учете адвекции или пересчете сетки.
  - Позволяет естественным образом учитывать формирование и развитие разрывов в материале.
- Недостатки:
  - Точное представление резких границ материала затруднительно.
  - Требует более значительных объемов вычислений, чем сеточные методы.

Графическое представление действия SPH

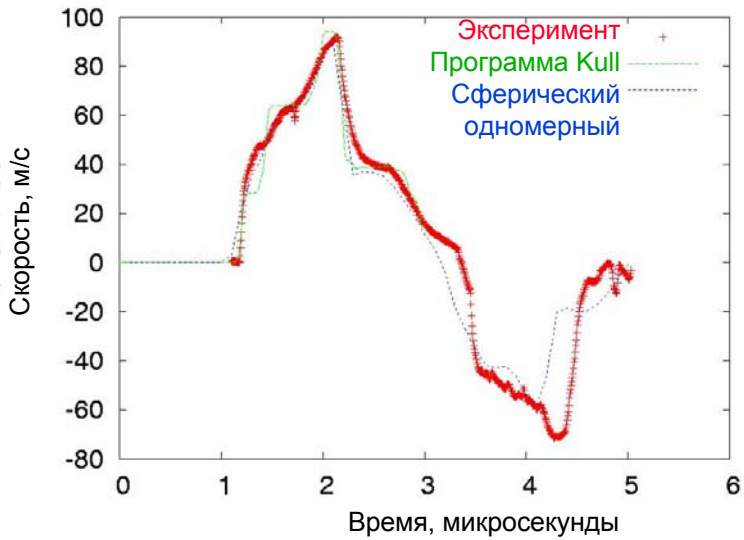
- Физические переменные определяются в произвольном наборе пространственных точек.
- Точки передвигаются со скоростью материала, произвольно воссоединяясь с новыми соседними точками по мере выполнения вычислений.
- С каждой точкой связан масштаб разрешения или сглаживания (*h*), представляющий собой диапазон ее взаимодействия с другими точками.
- Формализм метода SPH дает непрерывное представление узловых переменных и их пространственных градиентов.



Моделирование материалов

- **Метод SPH традиционно применяется в задачах динамики сжимаемых газов.**
- **Однако добавление моделей твердого материала несложно.**
  - **Я добавил к моей программе метода SPH уравнение состояния Грюнайзена и упругопластическую модель Стейнберга-Гунана (Steinberg-Guinan).**

Эксперимент с ударом летящей пластиной



Результат испытания баллистическим ударом (Taylor anvil) через 150 мкс

Простая модель разрушения материала

- Бенц и Эсфог (Benz & Asphaug) опубликовали серию статей (1994, 1995, 1999), подробно описывающих простую скалярную модель повреждения в программной среде SPH.
  - Статистическая модель разрушения, основанная на модели сплошной среды Грэйди и Киппа (Grady & Kipp) (1980).
- В явной форме вводим набор энергий активации дефекта для каждого узла SPH согласно распределению Вейбулла.
  - Предполагается, что численная плотность дефектов, деформация разрушения которых меньше ε, описывается степенным законом:

$$n(\varepsilon) = k\varepsilon^m$$

- Деформация в узле *i* (ε_i) определяется максимальным характеристическим значением растягивающей нагрузки σ^t_i и модулем упругости Юнга *E*:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i^t}{E}$$

Модель разрушения материала (продолжение)

- **Если напряжение в узле превышает одно из установленных значений энергии активации дефекта, то оно вызывает повреждение (*D* ∈ [0,1]) со скоростью**

$$\frac{dD^{1/3}}{dt} = \frac{c_g}{R_s} = \frac{0.4c_l}{R_s}$$

  - **c_g - скорость распространения трещины,**
  - **c_l - скорость продольной упругой волны,**
  - **R_s - радиус разгруженного трещиной объема, принимаемого как функция масштаба разрешения в узле *h*.**

- **Скалярное повреждение *D* используется для создания нового узла поврежденного материала с разделением массы между первоначальным и поврежденным материалами следующим образом:**

$$m_i' = (1 - D_i)m_i,\ m_{D_i}' = D_i m_i$$

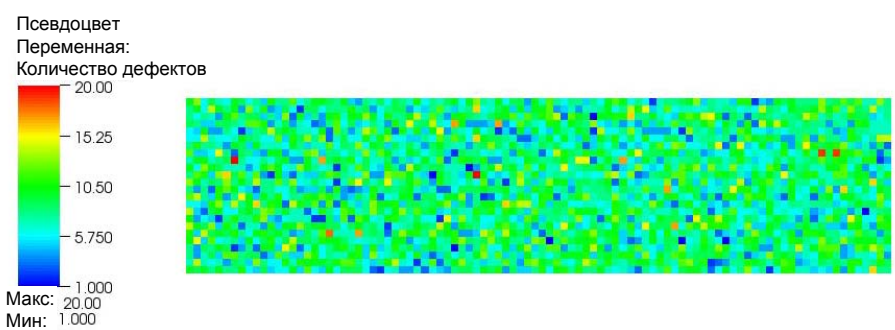
- **Поврежденный материал не имеет прочности и не выдерживает напряжения.**

Пример: начальные дефекты в стальном стержне

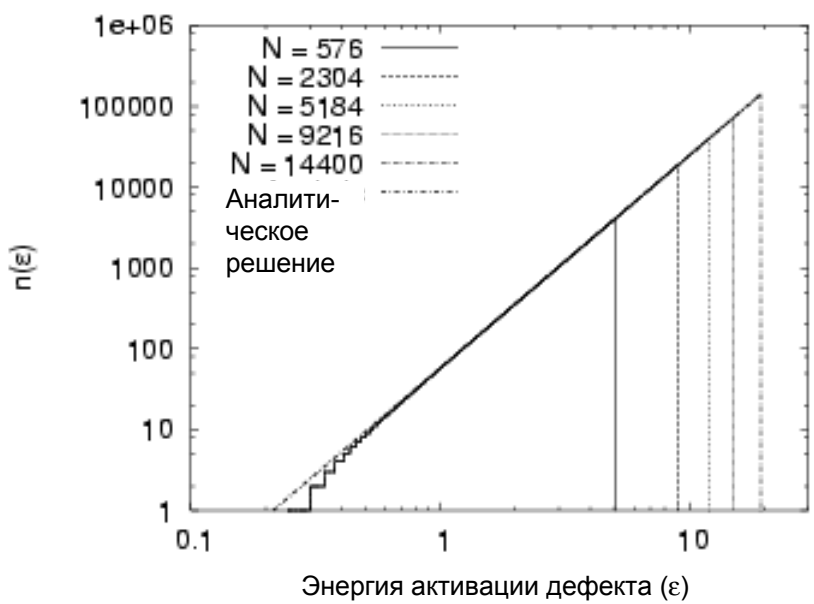
- **При постановке задачи мы определяем в каждом узле набор энергий активации дефекта:**

$$\varepsilon_{i,j}^{\mathrm{act}} = \left[\frac{j}{kV}\right]^{1/m},\ j \in [1, N_f]$$

Количество дефектов, определенное для каждого узла



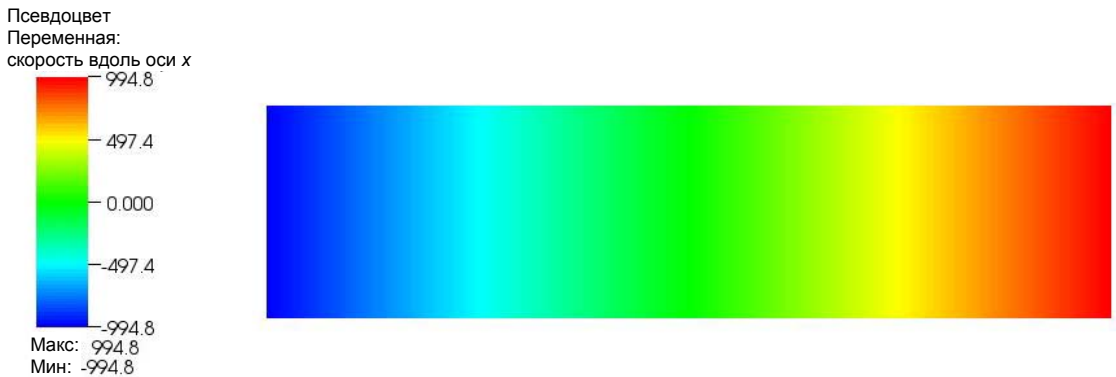
Функция распределения энергий активации дефекта



Пример: стержень из высокопрочной стали

- **Рассмотрим стальной стержень размерами 20x5 см с начальной скоростью** $\mathbf{v}(x) = \begin{pmatrix} v_0 x \\ 0 \end{pmatrix}$
  - **Вызывает во всем стержне первоначальную постоянную скорость деформации.**
- **Устанавливается постоянная скорость на концах стержня.**
  - **Вызывает растяжение концов стержня независимо от предела прочности материала на растяжение.**

Скорость вдоль оси x,
t = 0 мкс



Ожидаемый размер фрагментов

- Грэйди и Кипп (Grady & Kipp) рассчитывают ожидаемое распределение фрагментов на основе совокупности дефектов, которые активируются и растут до значения повреждения *D* = 1.
  - При постоянной скорости деформации, $\dot{\varepsilon}$

$$L(\dot{\varepsilon}) = \frac{6c_g}{m+2}\alpha^{(m+3)^{-1}}\dot{\varepsilon}^{-m/(m+3)}$$

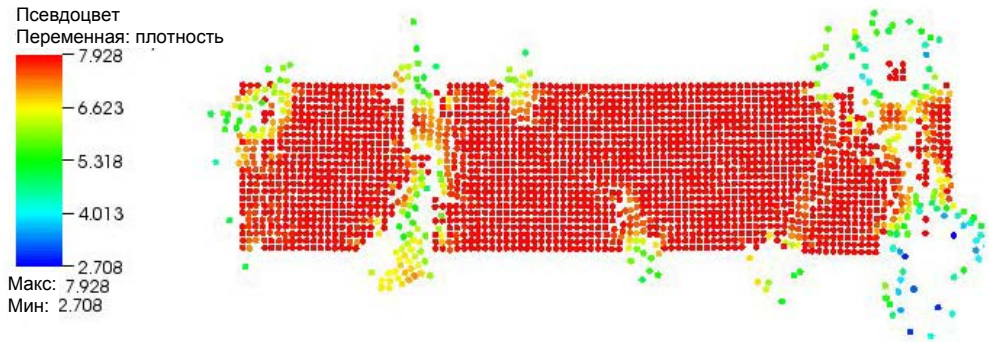
$$\alpha = \frac{8\pi c_g^3 k}{(m+1)(m+2)(m+3)}$$

- В последующих примерах для стержня из высокопрочной стали предполагаемые размеры характерных фрагментов составят 8,6 см и 2,9 см соответственно для v_0 = 10 м/с и v_0 = 100 м/с.
  - Это предполагает, что стержень размером 20 см должен полностью сломаться поперек в 2-3 местах при скорости v_0 = 10 м/с и в 6-7 местах при скорости v_0 = 100 м/с.

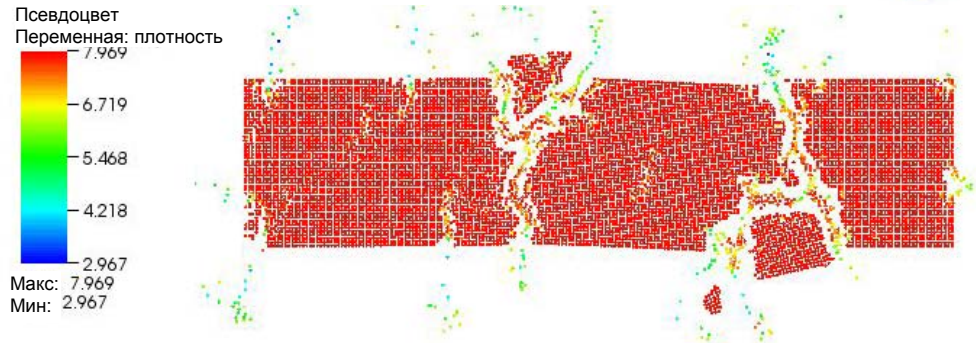
Стержень из высокопрочной стали: v_0=10 м/с через t=500 мкс

плотность массы

Разрешение: 100x25



Разрешение: 200x50

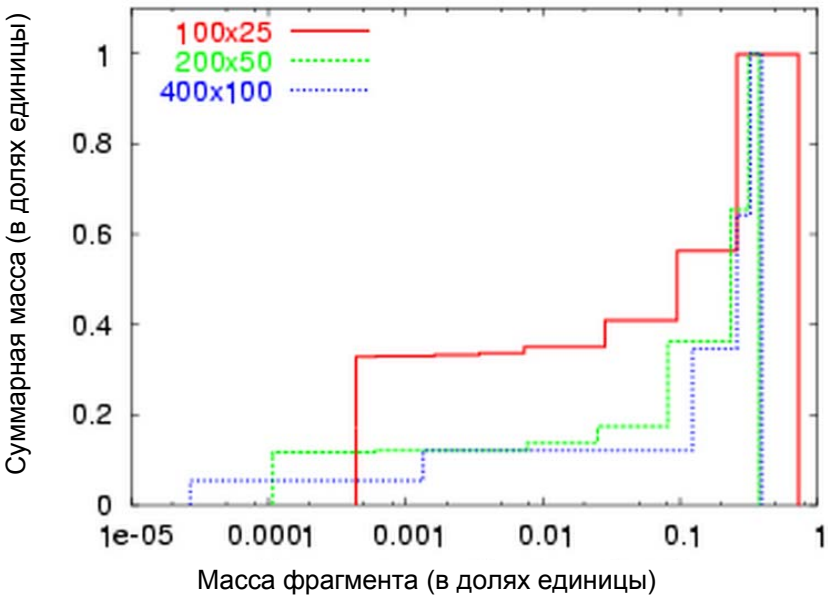


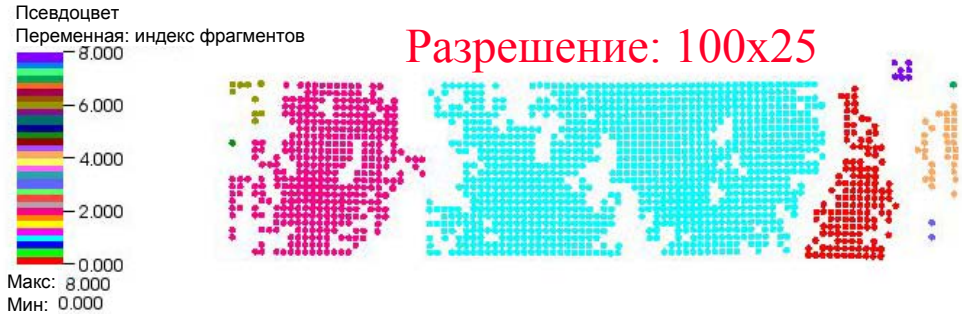
Разрешение: 400x100

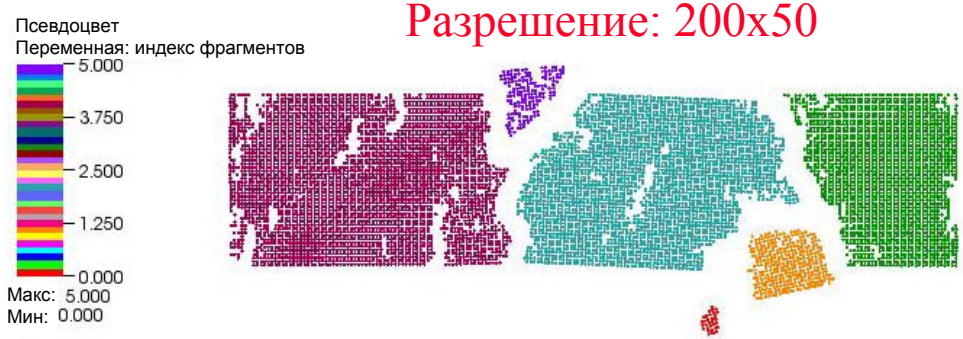
Стержень из высокопрочной стали: v_0=10 м/с через t=500 мкс

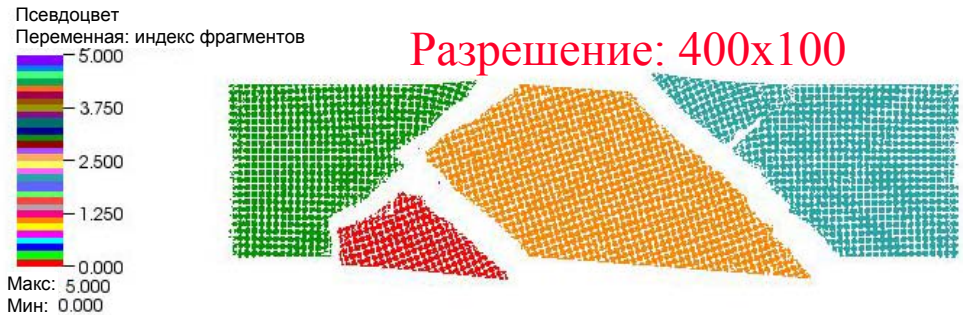
Свойства фрагментов

Функция распределения массы фрагментов





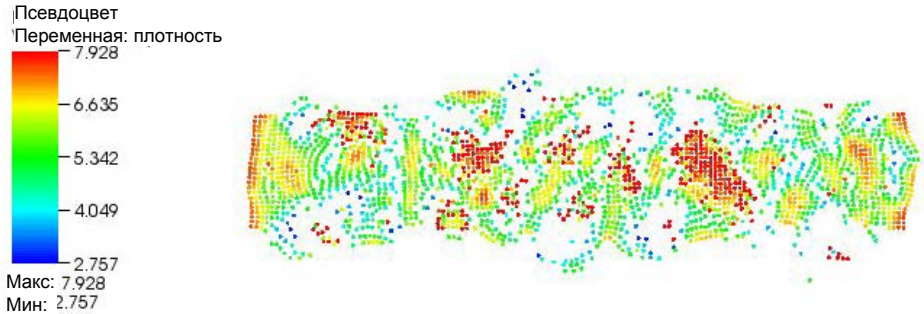




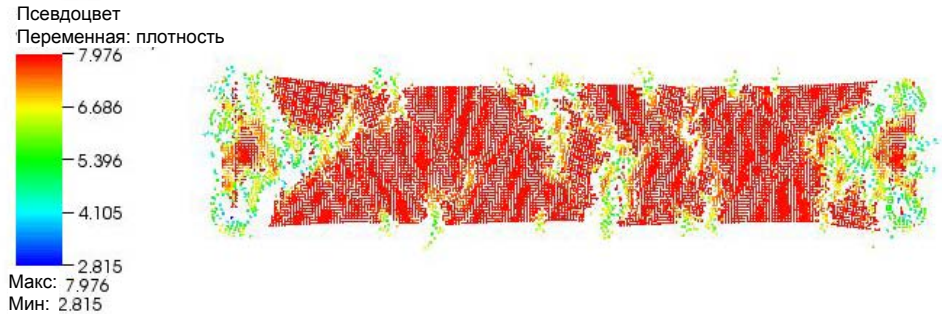
Стержень из высокопрочной стали: v_0=100 м/с через t=500 мкс

Разрешение: 100x25

плотность массы



Разрешение: 200x50

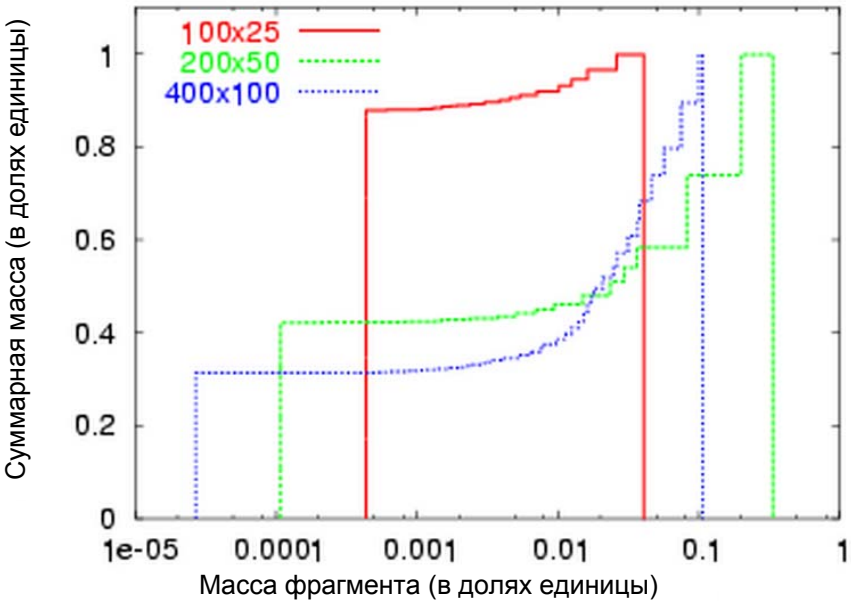


Разрешение: 400x100

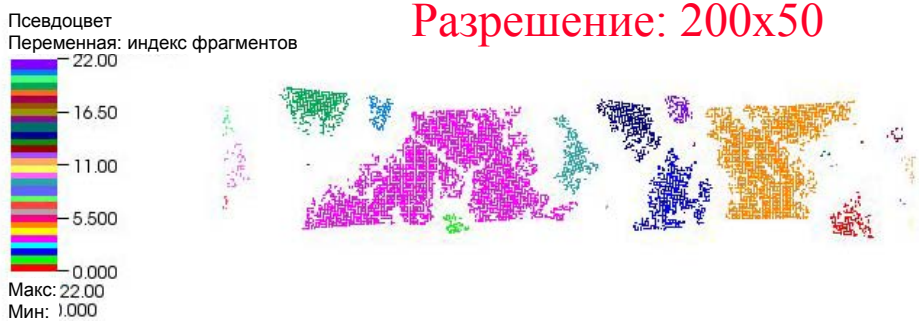
Стержень из высокопрочной стали: v_0=100 м/с через t=500 мкс

Свойства фрагментов

Функция распределения массы фрагментов



Разрешение: 100x25



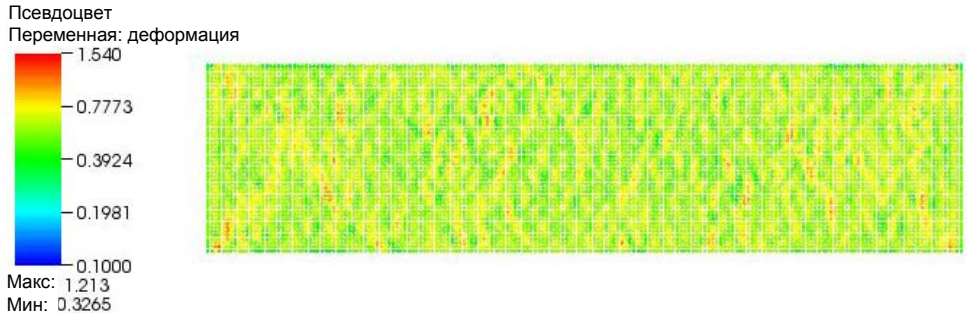
Разрешение: 200x50

Разрешение: 400x100

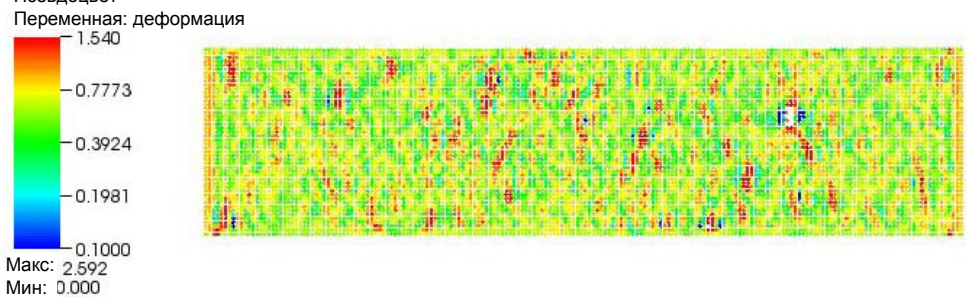
Стержень из высокопрочной стали: v0=10 м/с – деформация по нагружению

- **Почему же эти стержни ломаются в определенных местах?**

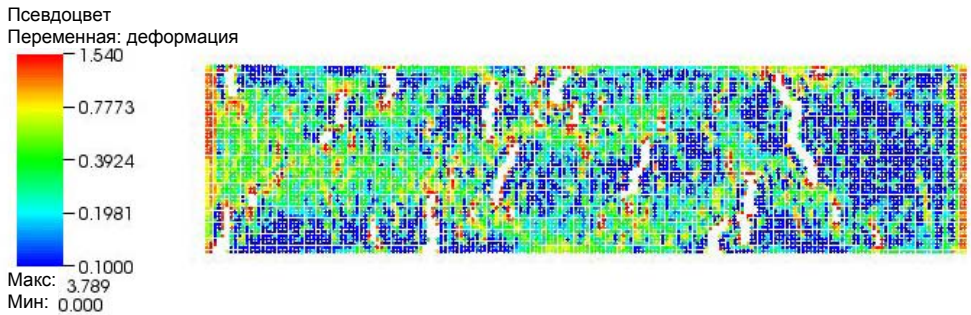
t = 37,5 мкс



t = 62,5 мкс



t = 100 мкс

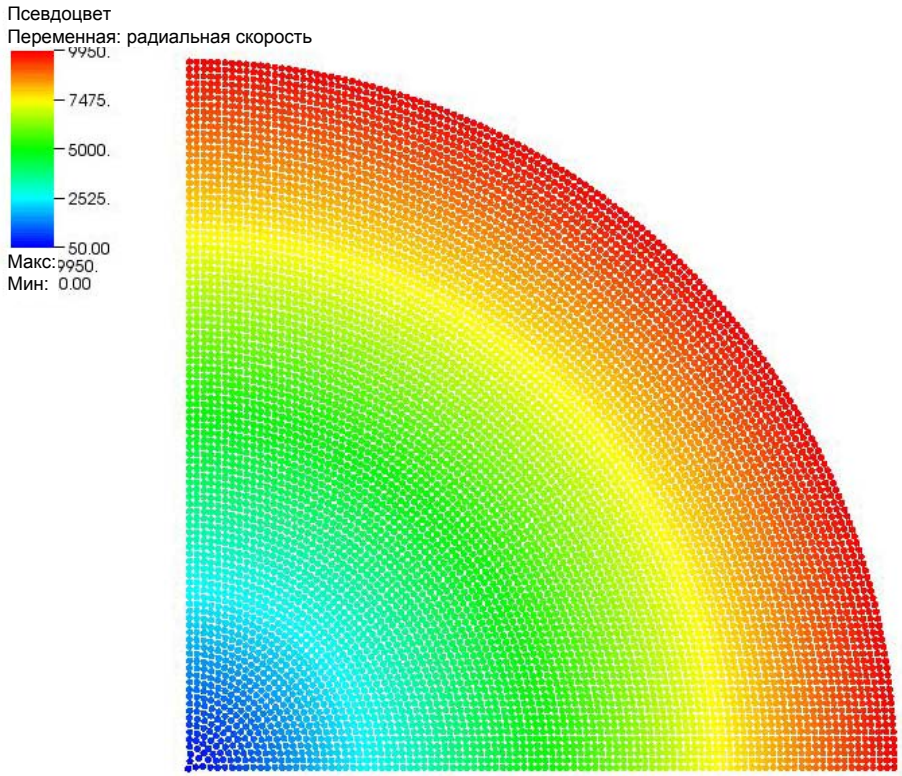


Диск из высокопрочной стали

- **Рассмотрим теперь двумерный стальной диск с установленным начальным полем скорости**

$$v_r = v_0 r$$

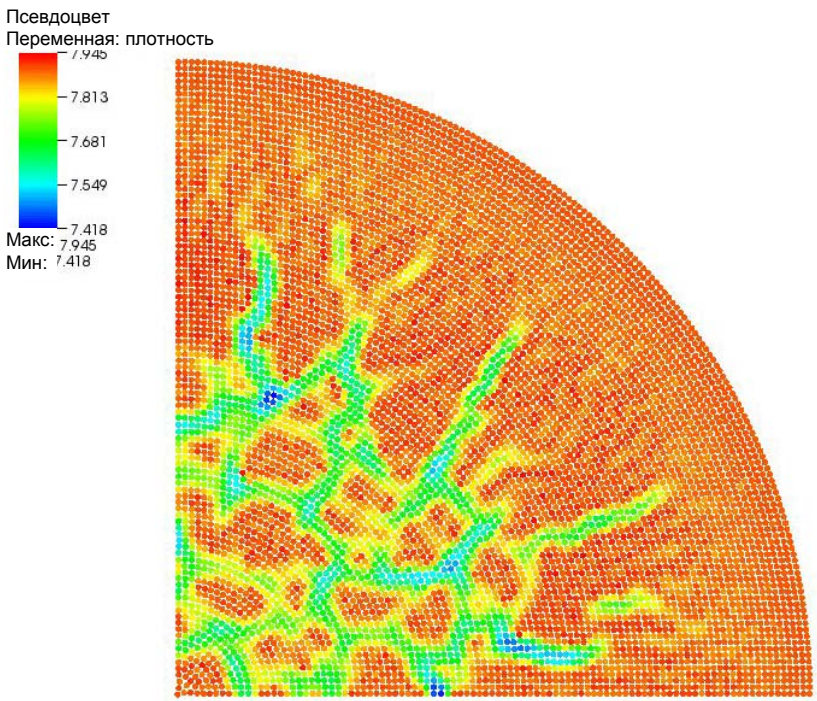
- **В этом примере:**
  - **v_0 = 100 м/с**
  - **Расчет проводится для одного квадранта**
  - **Значение скорости на внешней границе не устанавливается**



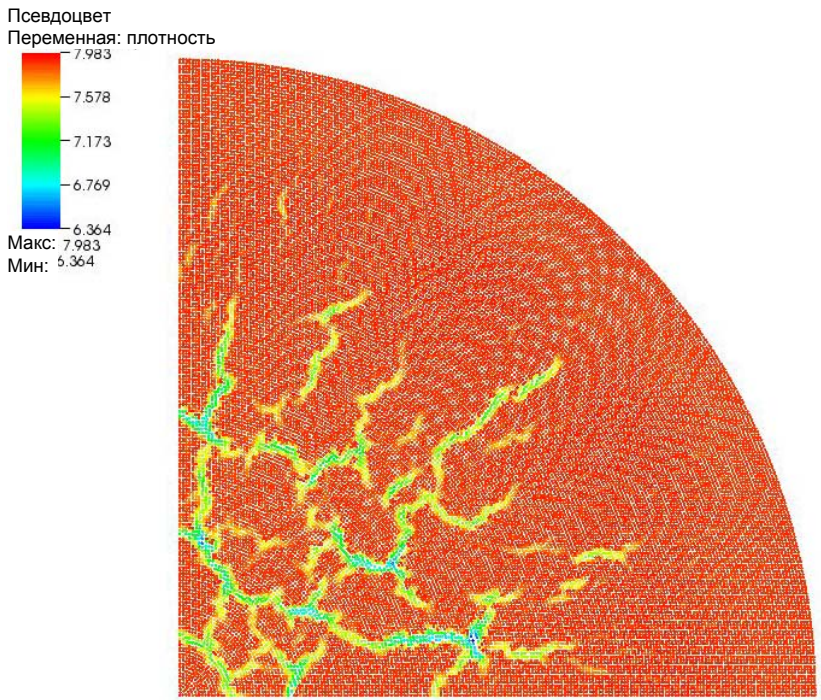
Диск из высокопрочной стали, t = 25 мкс: плотность массы

- **На этих графиках показаны все материалы (поврежденные и неповрежденные).**

$n_r = 100$



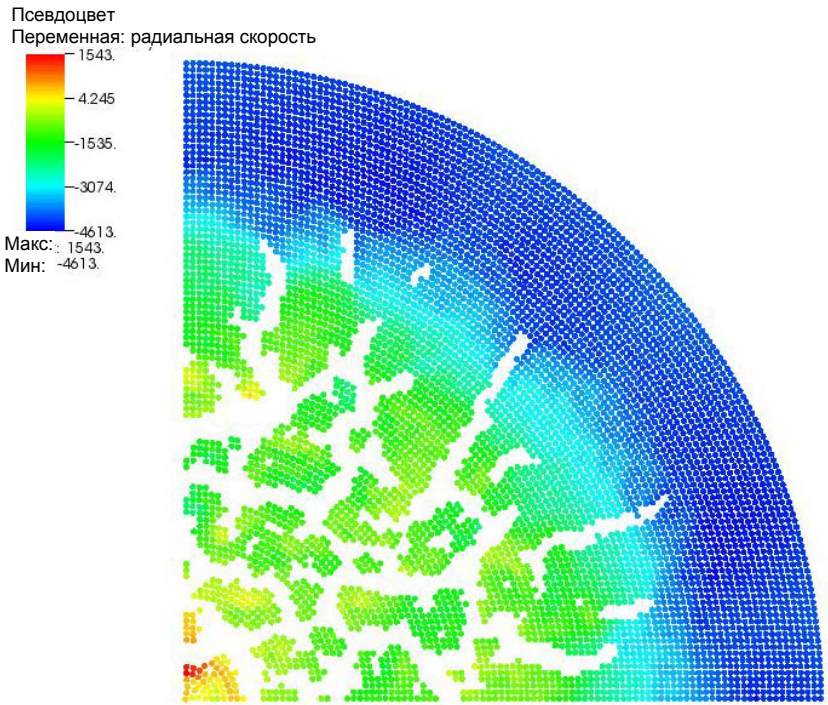
$n_r = 200$



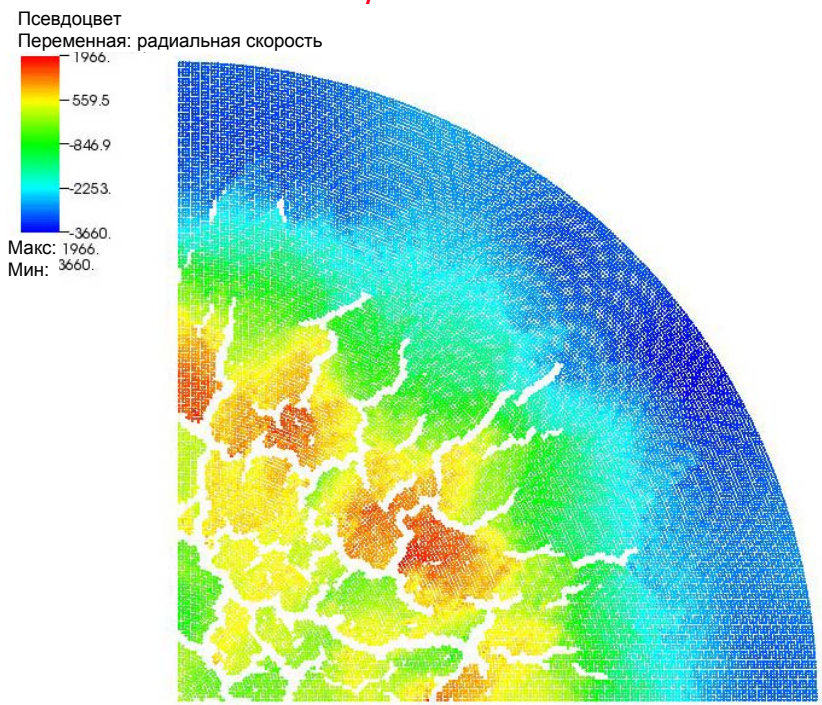
Диск из высокопрочной стали, t = 25 мкс: радиальная скорость

- На графиках представлен только неповрежденный материал при двух различных значениях разрешения.
- Обратите внимание, что к этому моменту наружные радиальные отрезки развернулись.

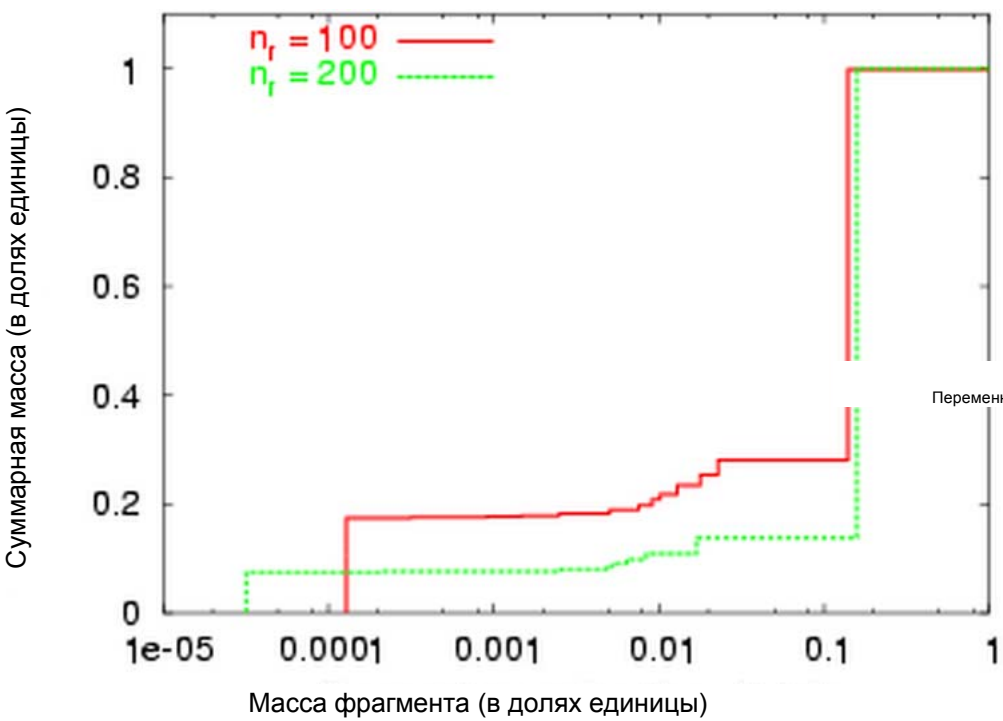
$n_r = 100$

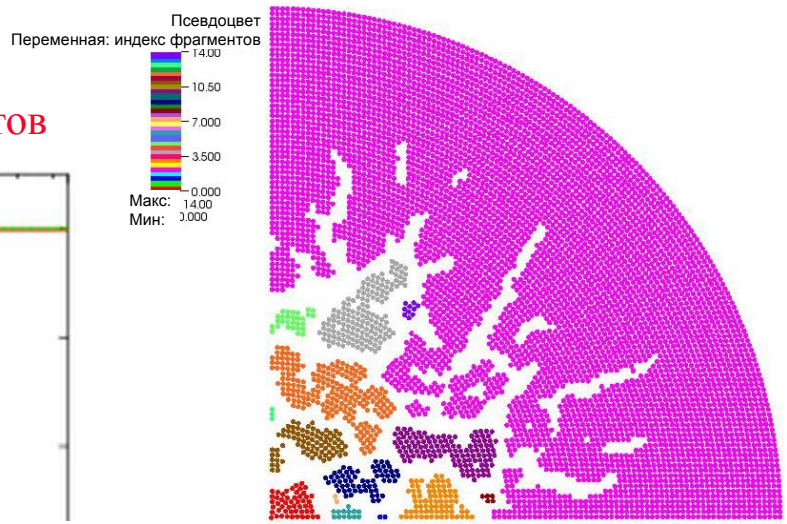


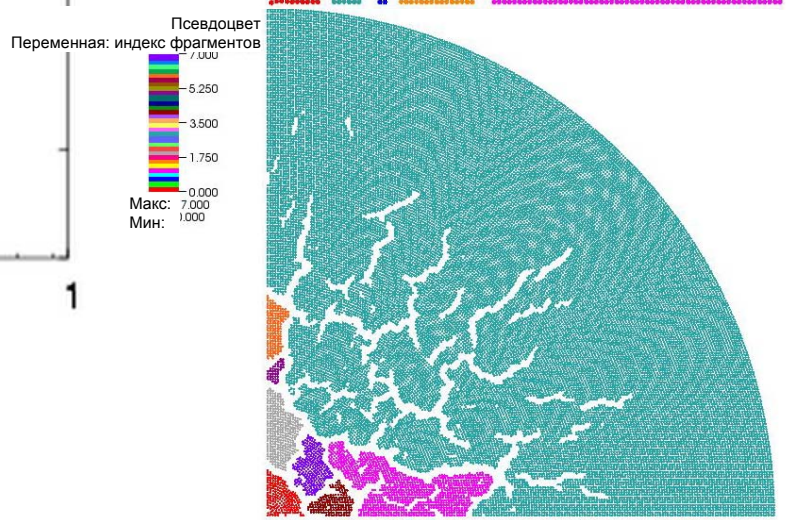
$n_r = 200$



Диск из высокопрочной стали, t = 25 мкс: фрагменты



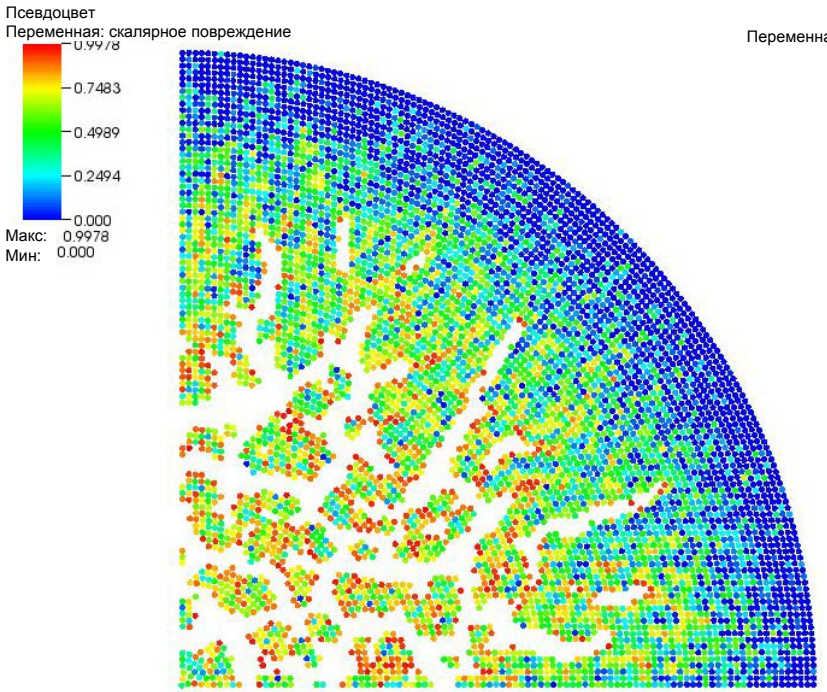




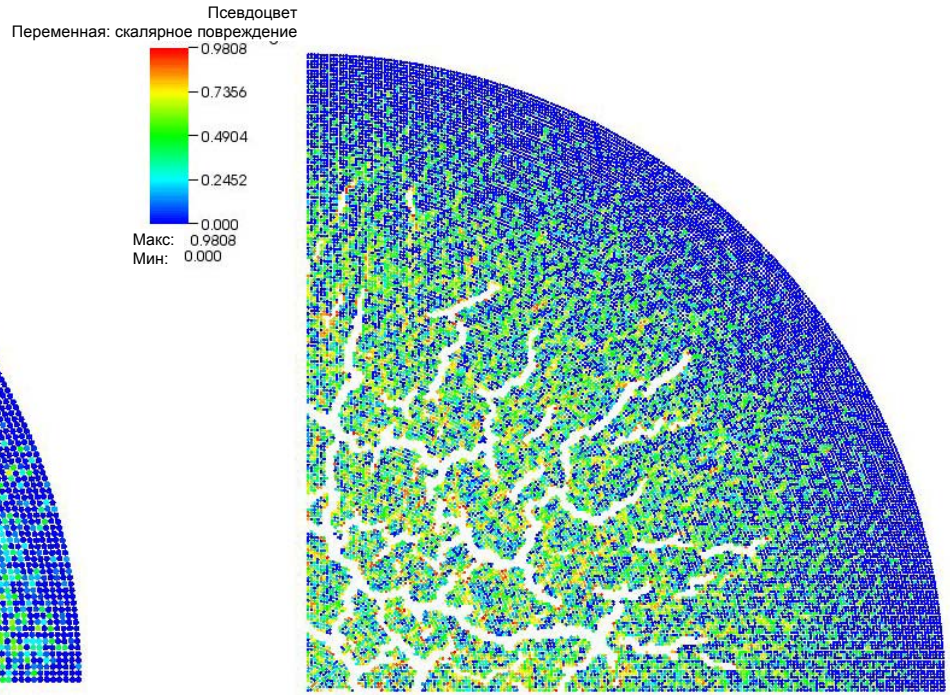
Диск из высокопрочной стали, t = 25 мкс: повреждение

- На графиках представлен только неповрежденный материал.
- Обратите внимание, что частично поврежденный материал распределен по всему диску.

$n_r = 100$

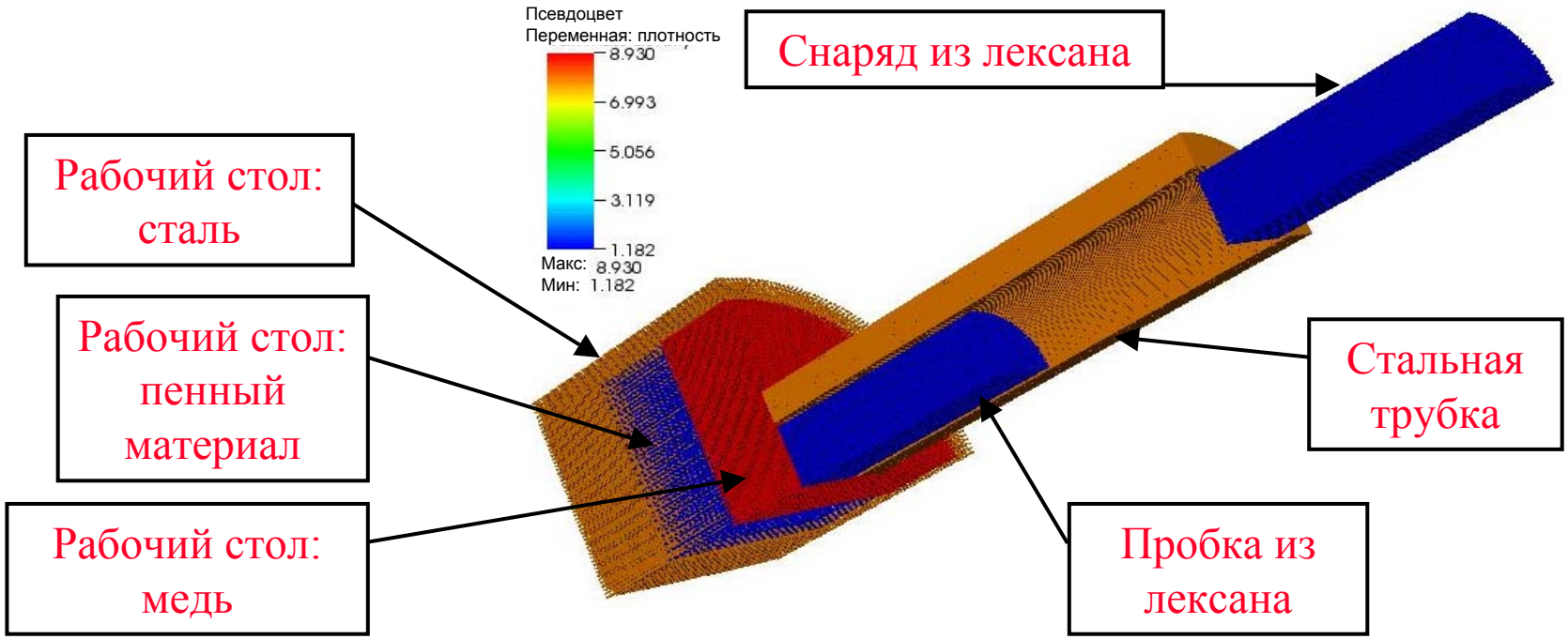


$n_r = 200$



Эксперимент с расширяющейся трубкой и газовой пушкой

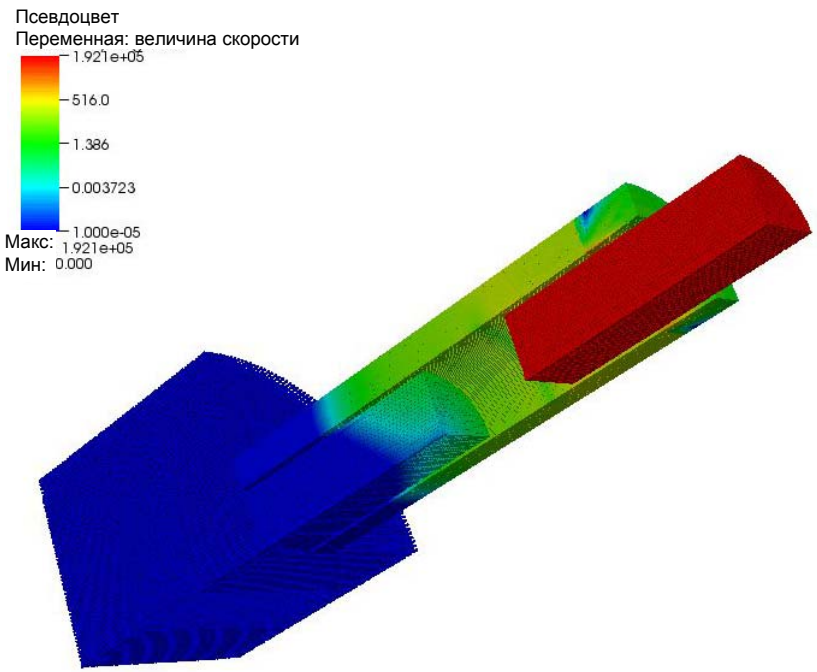
- **Моделируется серия экспериментов по разрыву металлических трубок из-за удара пластикового снаряда внутри трубки.**
  - **Т.Дж. Воглер, Т.Ф. Торнхилл, У.Д. Рейнхард, Л.С. Чхабилдас, Д.И. Грейди, Л.Т. Уилсон, О.А. Херикейн, А. Санву «Разрыв материалов в экспериментах с расширяющейся трубкой» (Vogler TJ, Thornhill TF, Reinhart WD, Chhabildas LC, Grady DE, Wilson LT, Hurricane OA & Sunwoo A, “Fragmentation of Materials in Expanding Tube Experiments”) Международный журнал баллистической физикеи и техники (*Int. J. Impact Engng)*, 2003; 29:735-746**



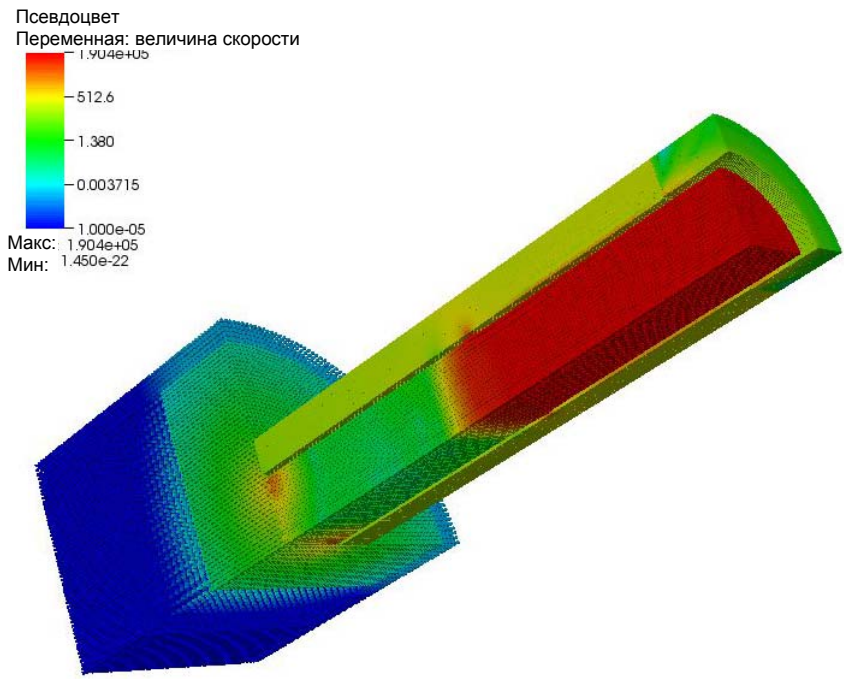
Расширяющаяся трубка – начальные этапы изменения

- **Скорости при входе снаряда.**

8,0 мкс

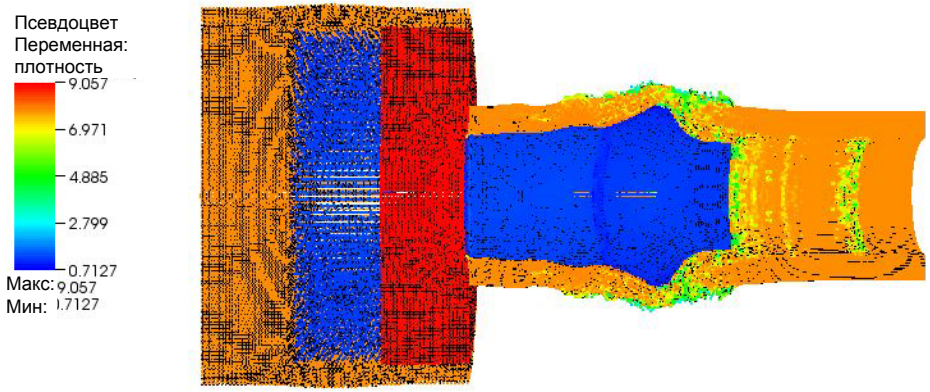


13,75 мкс

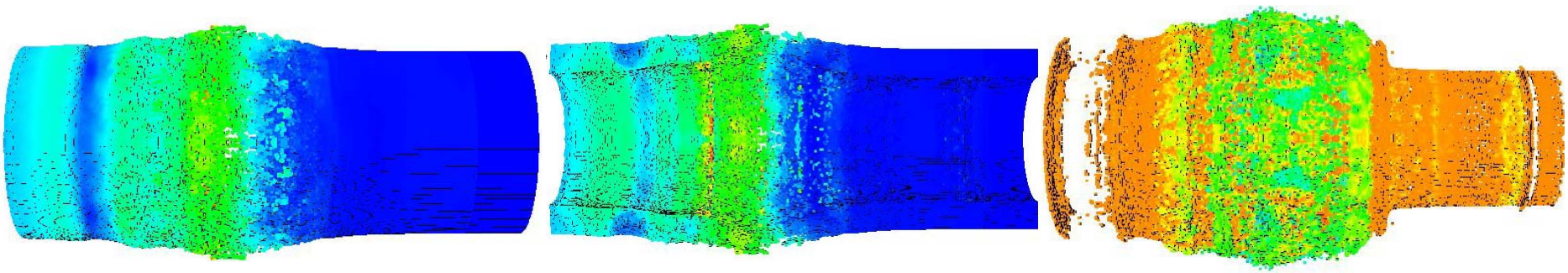


Расширяющаяся трубка – трубка в начале расширения

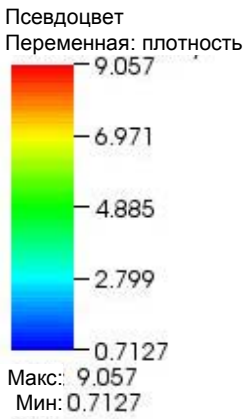
- **Через 26,75 мкс снаряд и пробка создают усилие на трубку, вызывая значительное повреждение в точке расширения.**

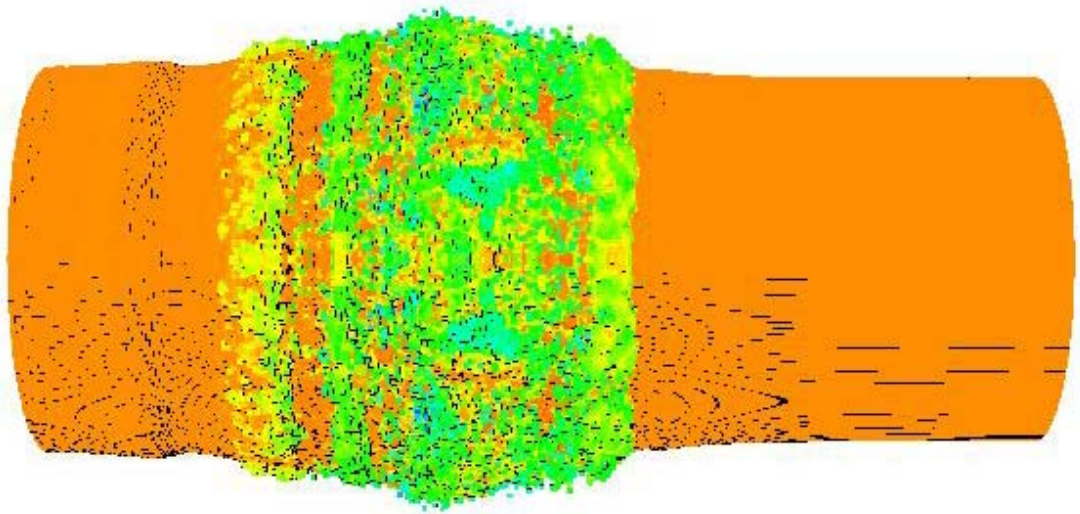


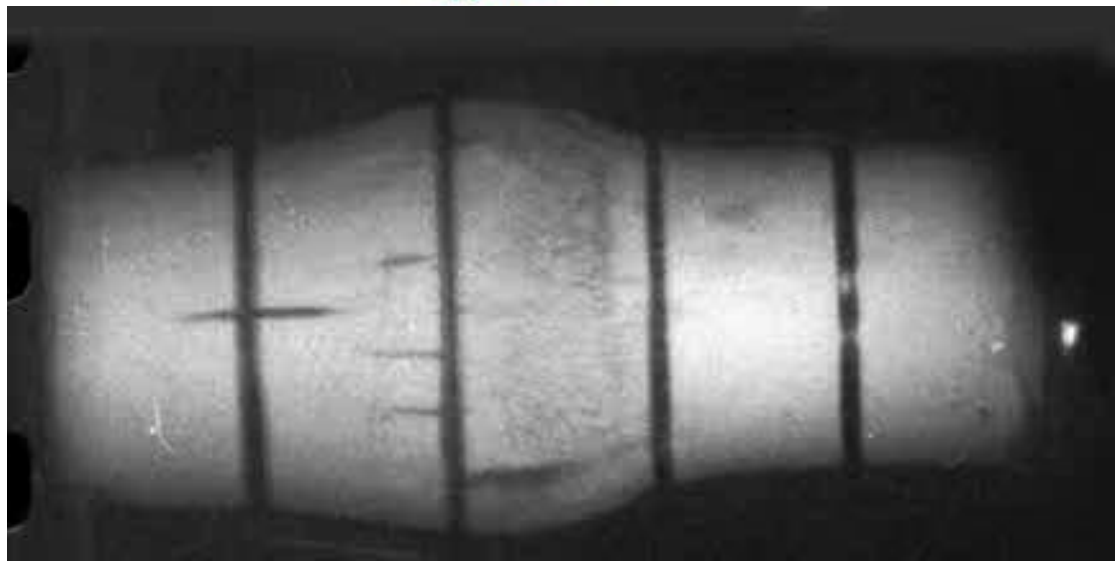
Наружная поверхность, скорость неповрежденного материала	Внутренняя поверхность, скорость неповрежденного материала	Наружная поверхность, плотность поврежденного материала



Расширяющаяся трубка – результаты эксперимента

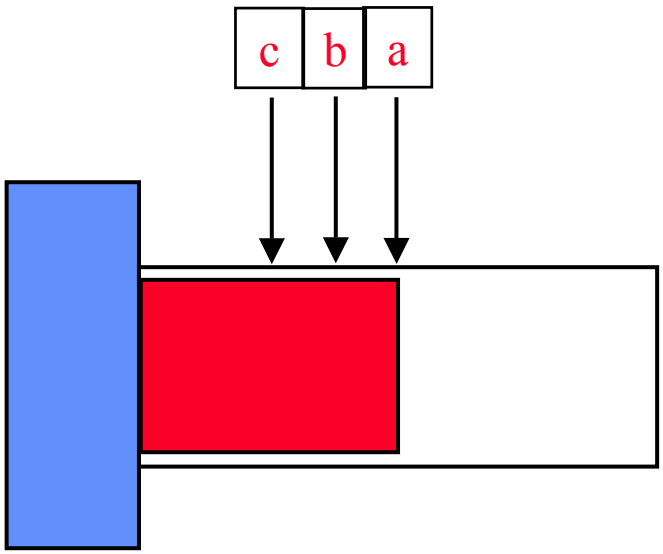


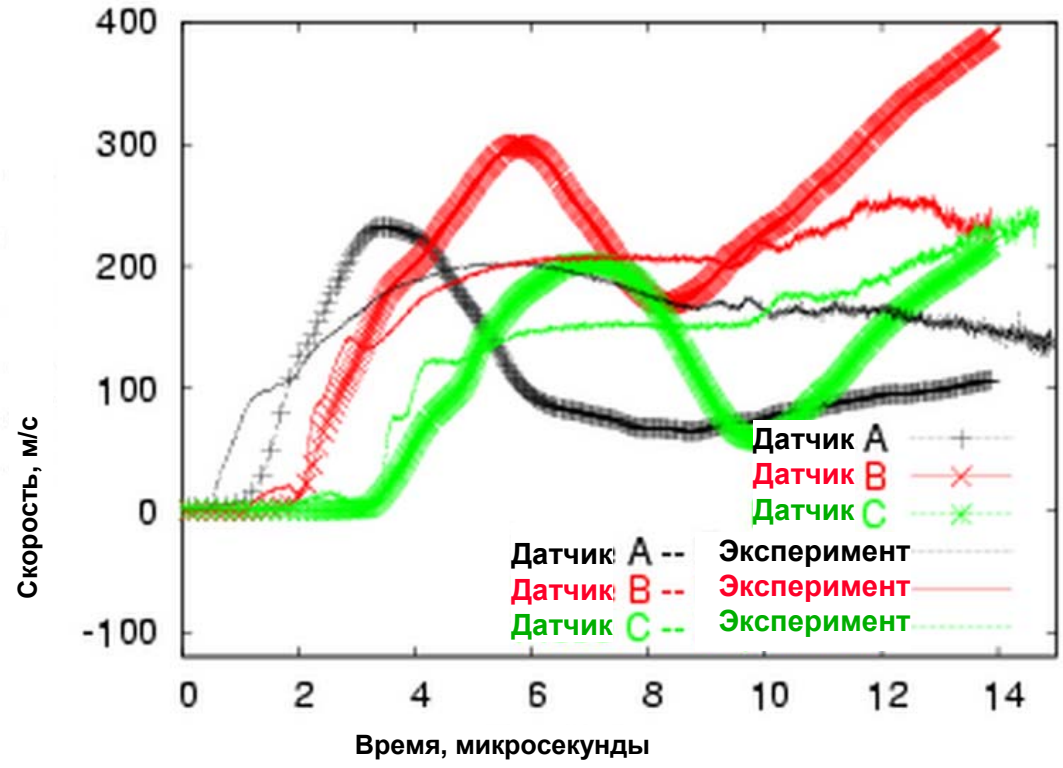




Расширяющаяся трубка – данные, полученные с помощью интерферометрической системы VISAR

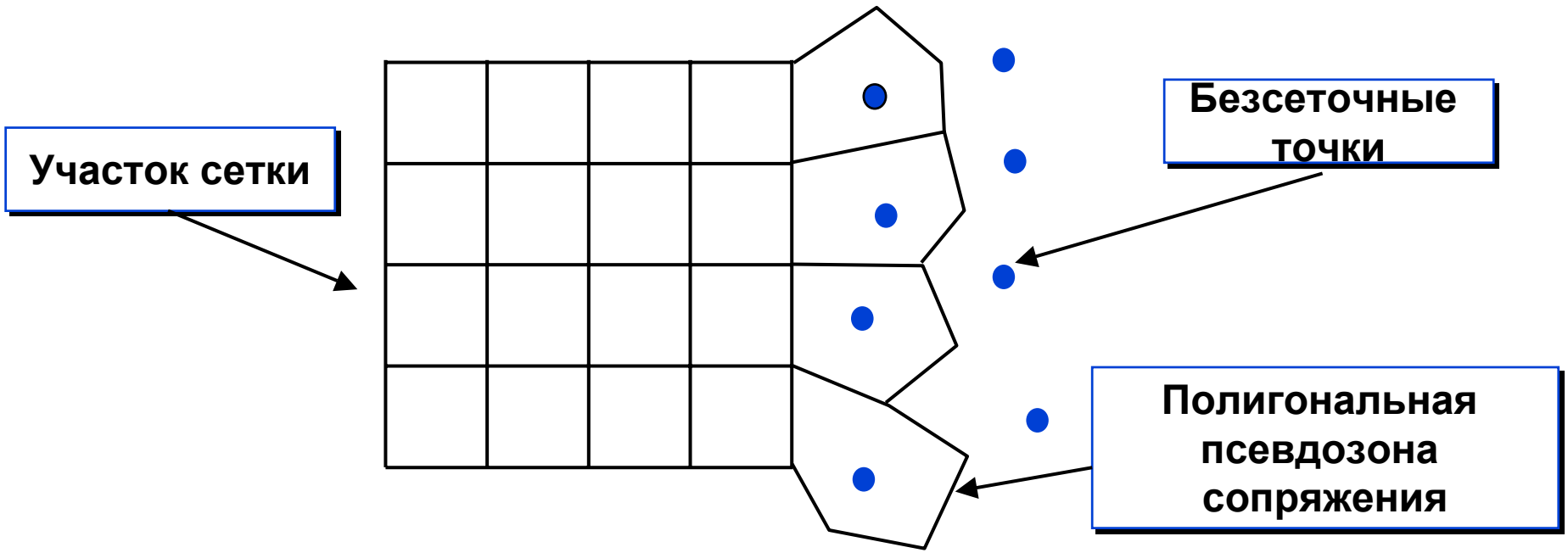
- В этом эксперименте для проведения измерений были использованы три датчика скорости VISAR, расположенные на внешней поверхности трубки.
  - Датчик A на расстоянии 25 мм от рабочего стола
  - Датчик B на расстоянии 20 мм
  - Датчик C на расстоянии 15 мм





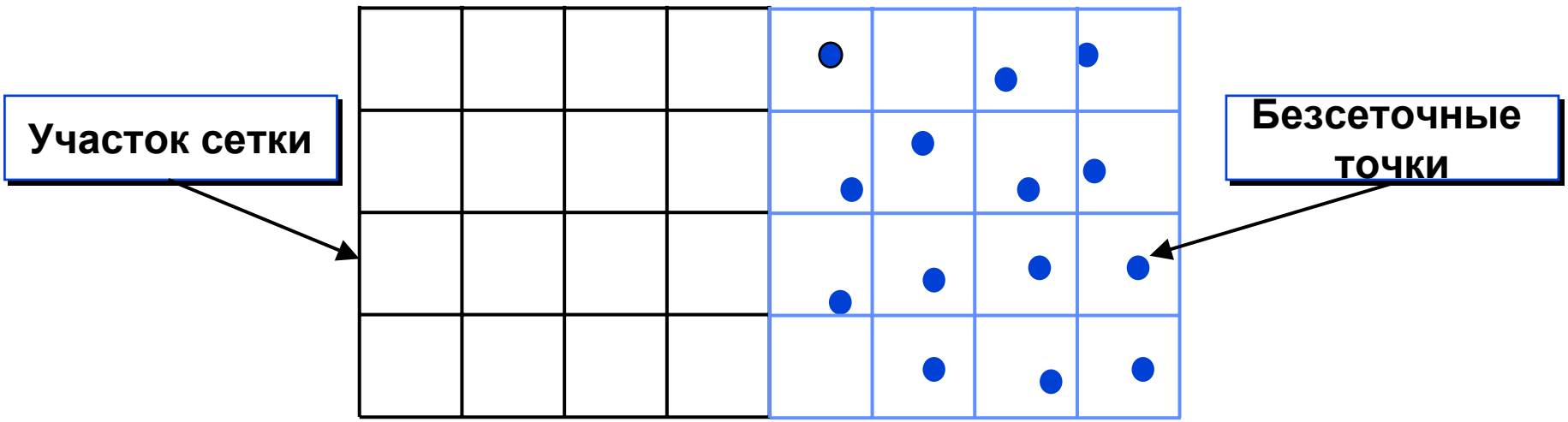
Как можно провести сопряжение с программной средой, основанной на использовании сеток?

- Имеется несколько возможных путей сопряжения безсеточной схемы, такой как SPH, с традиционными программами, основанными на использовании сеток:
  - Прямая гибридизация, возможная при использовании ПМО, способного работать с бесструктурными полигональными элементами (или возможно треугольными)



Как можно провести сопряжение с программной средой, основанной на использовании сеток?

– Интерполяция вперед и назад данных для зоны наложения сеточной и безсеточной областей друг на друга.
  - Характеристики для безсеточной области находятся решением для безсеточных точек, а затем отображаются назад на сетку



Неохваченные вопросы / Будущая работа

- Применить имеющиеся методы к более широкому кругу интересных экспериментов.
- Модель разрушения Бенца и Эсфога (Benz & Asphaug) учитывает только разрушение при растяжении, следует распространить ее и на разрушение при сдвиге.
  - Можно расширить имеющийся алгоритм, ввести более современные модели (Джонсона-Кука (Johnson-Cook), MARFRAC и т.д.)
- Фрагменты должны быть определены во время работы модели и преобразованы в новые материалы.
  - Предотвращает действие напряжения между фрагментами, сталкивающимися друг с другом.
- Мы должны отследить возникновение фактических точек плавления и пересчитать образование разрушенного и неповрежденного материала, если происходит обратное отвердевание.
- Различные численные усовершенствования:
  - Улучшение операций на поверхностях с переменными и их градиентами, суммарная плотность, адаптивный метод гладких частиц (ASPH) …