

**Диссертация на соискание учёной степени магистра  
по направлению 151600 «Прикладная механика»**

**Конечно-элементное моделирование и  
исследование возникновения и распространения  
трещины в нефтеносном пласте под действием  
гидравлических сил**

Выполнил студент гр. 6055/1

Д.В. Матяс

Руководитель, к.т.н., профессор

А.И. Боровков

Соруководитель, ассистент

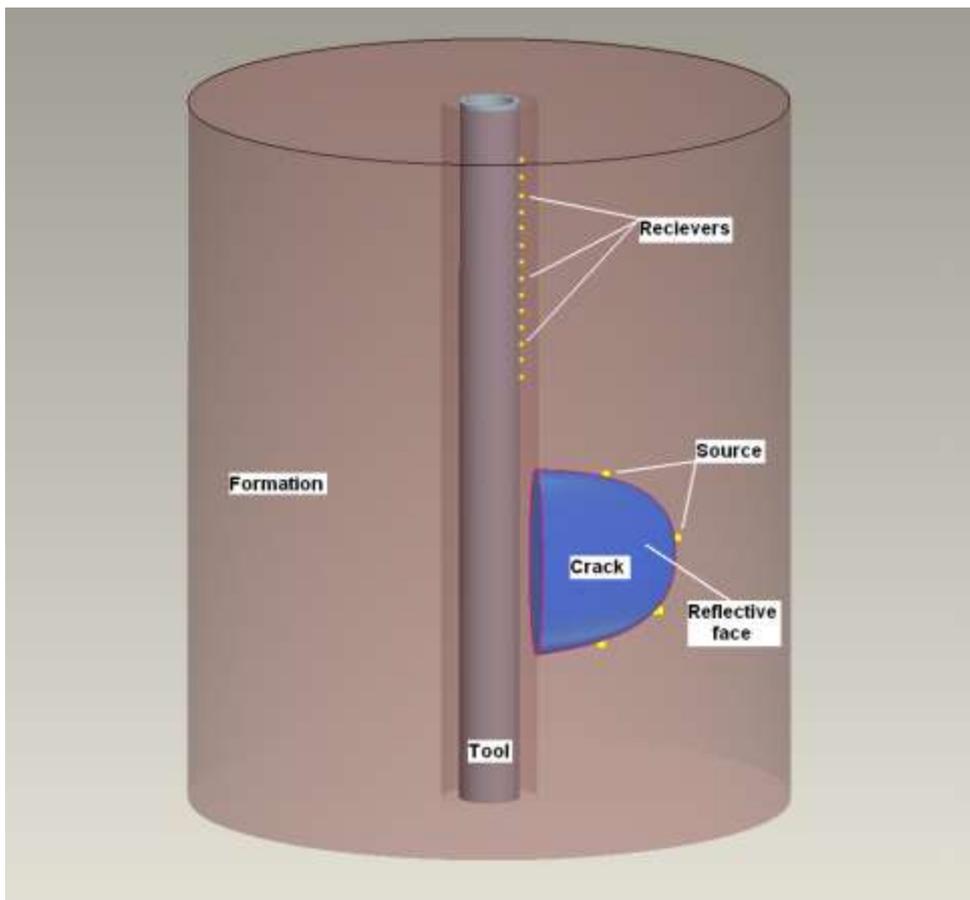
В.С. Модестов



# СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. Основные соотношения теории упругости и теории пластичности. Механика разрушения.	9
Глава 2. Теория и методы, используемые в КЭ системе LS-DYNA	60
Глава 3. Модельные задачи	85
3.1. Траектория роста трещины при воздействии дополнительной постоянной силы $W$	87
3.2. Траектория роста трещины при воздействии дополнительной постоянной силы $W$ при ненулевом начальном угле	89
3.3. Траектория роста трещины при воздействии дополнительной переменной силы $W$	91
3.4. Действие точечной силы на образец с надрезом	94
3.5. Моделирование взаимодействия жидкости с твердым телом использованием ALE-алгоритма	98
3.6. Моделирование механики разрушения. Компрессионное сжатие бетонного цилиндра (хрупкое разрушение)	101
Глава 4. Возникновение и распространение трещины в трехмерной постановке.	104
4.1. Постановка задачи о возникновении и распространении трещины в трехмерной постановке.	104
4.2. Результаты задачи о возникновении и распространении трещины в трехмерной постановке	107
Заключение	112
Приложение 1. История зарождения и распространения композиционных материалов	114
Приложение 2. Безопасность жизнедеятельности	142
Список литературы	151

# ВВЕДЕНИЕ

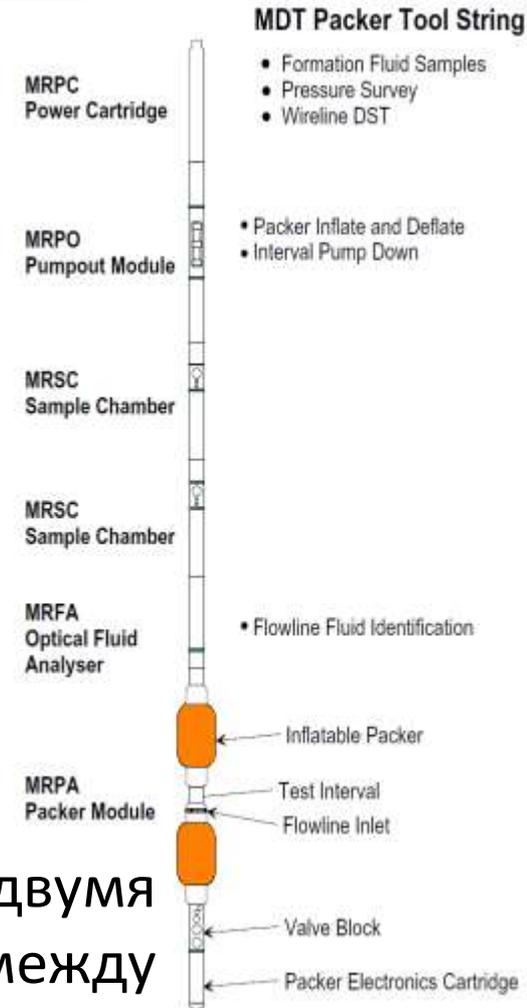
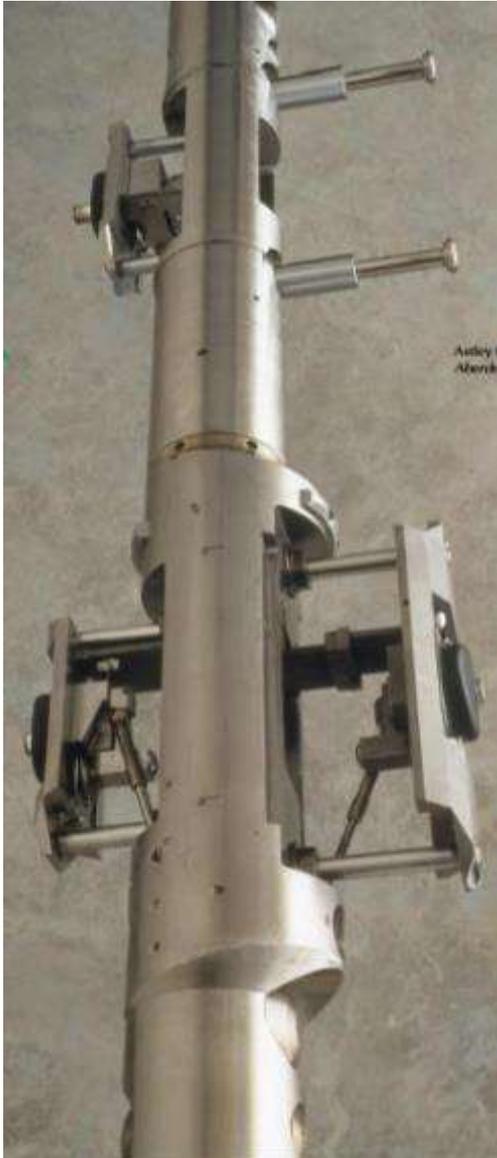


В геологоразведке развиваются высокоточные методы создания 3D модели резервуара. Данная работа посвящена методу, в котором искусственно создаваемый **разлом** в породе порождает волны, анализируя которые можно судить и свойствах конкретного пласта.

# ВВЕДЕНИЕ

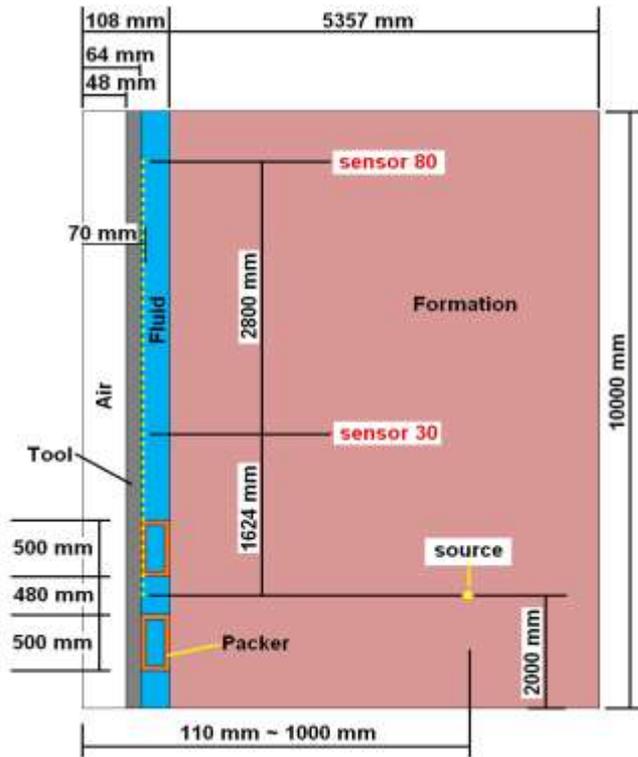
В верхней части колоны  
установлены ресиверы, для  
распознавания волн

Ресиверы установлены над двумя  
запирающими пакерами, между  
которыми создается  
гидравлическое давление

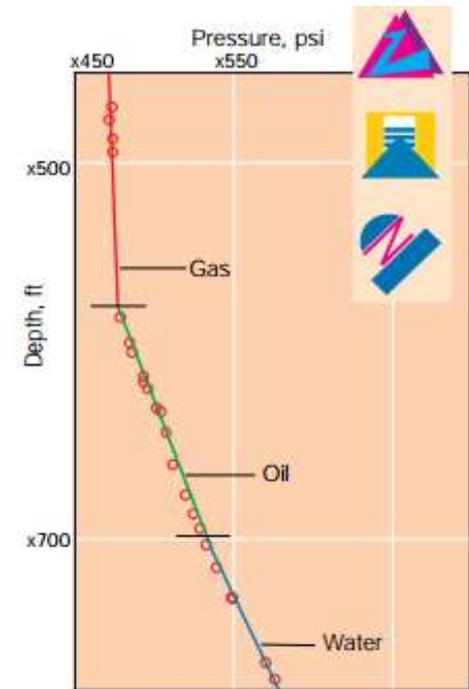


# ВВЕДЕНИЕ

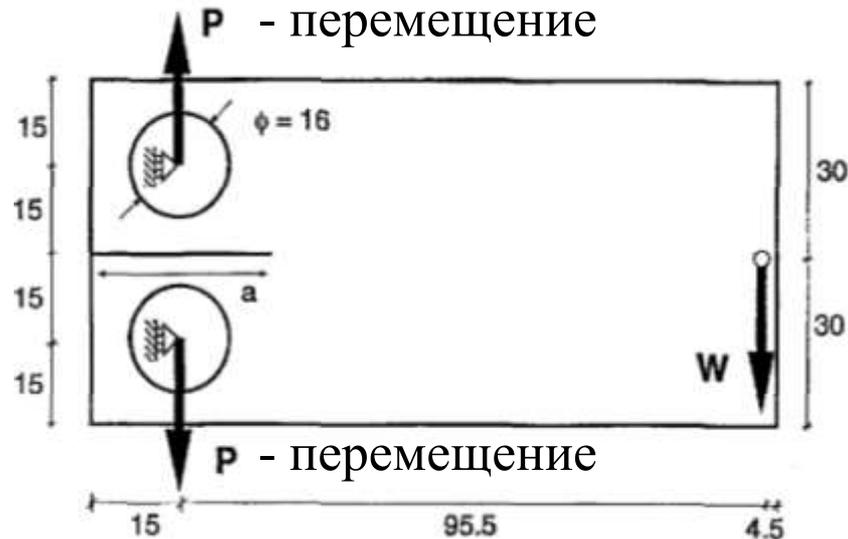
Кроме данных о давлении в пласте, также могут быть проанализированы **волны**, исходящие от появившейся трещины.



Моделирование процесса роста трещины является **обратной задачей**.



# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ



Траектория роста трещины при воздействии дополнительной постоянной силы  $W$  \*

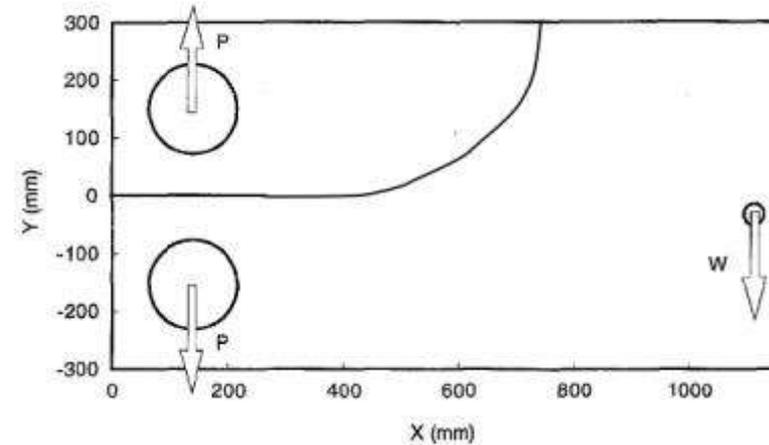
Рассматривалась задача в плоско-напряженной постановке. Для стабильного теста на верхнем и нижнем валике задаются перемещения  $P(t)=30\text{мм/с}$ . Справа на образец подвешивается мертвый груз  $W=79,4\text{Н}$ . Все остальные края свободны.

# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

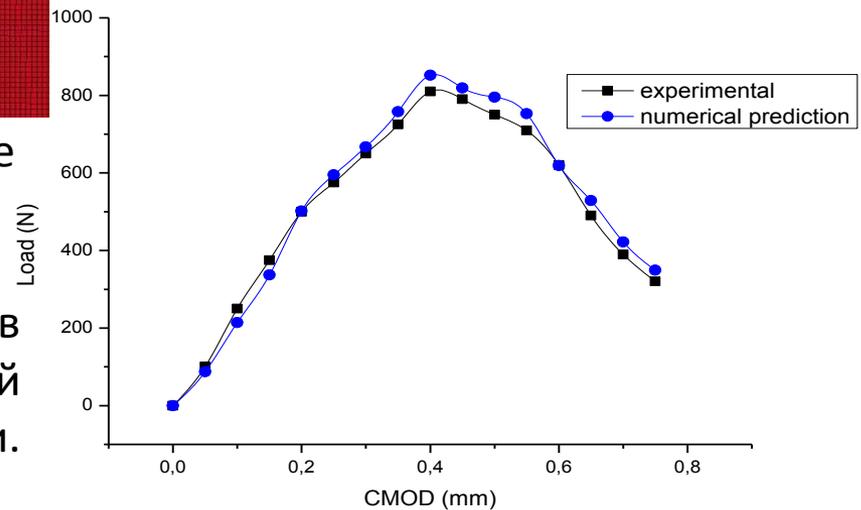


Результаты численного эксперимента. В задаче использована адаптация сетки.

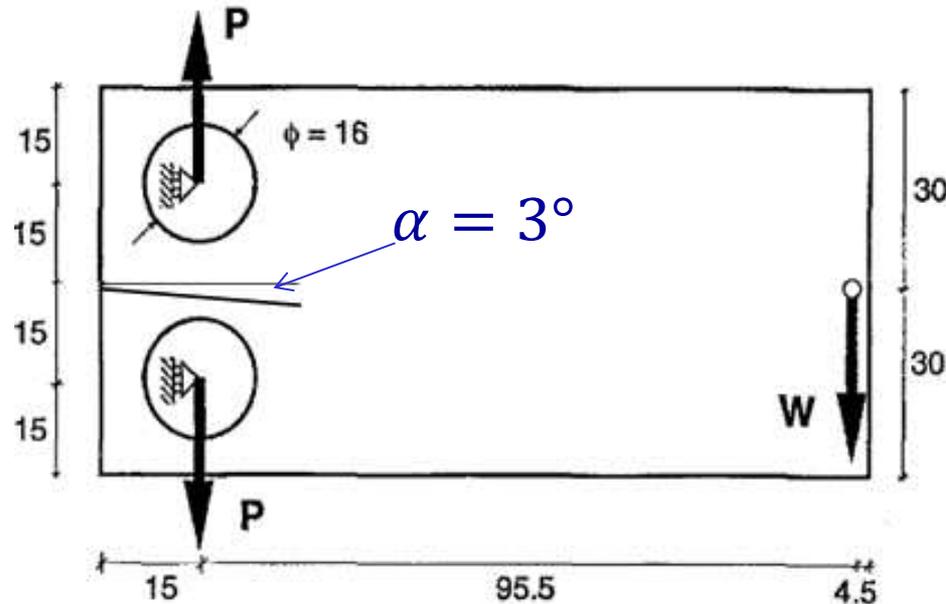
Раскрытие берегов трещины в зависимости от приложенной нагрузки.



Профиль трещины в реальном эксперименте



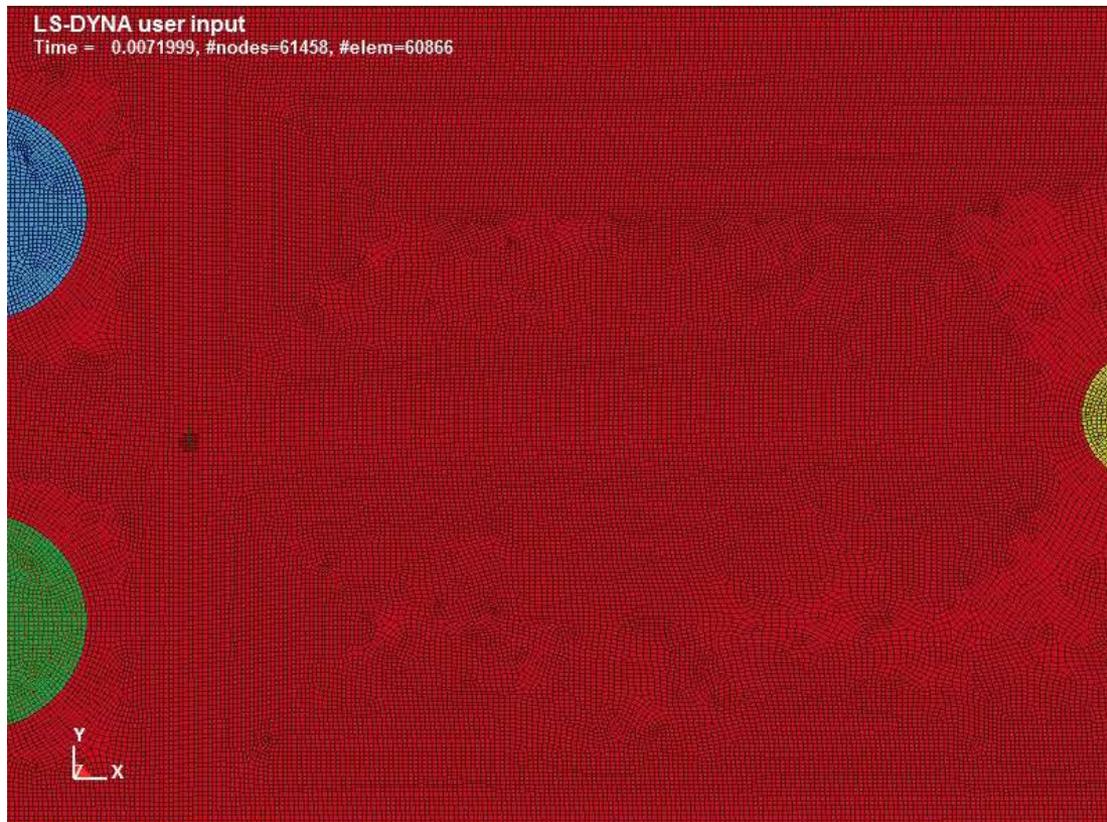
# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ



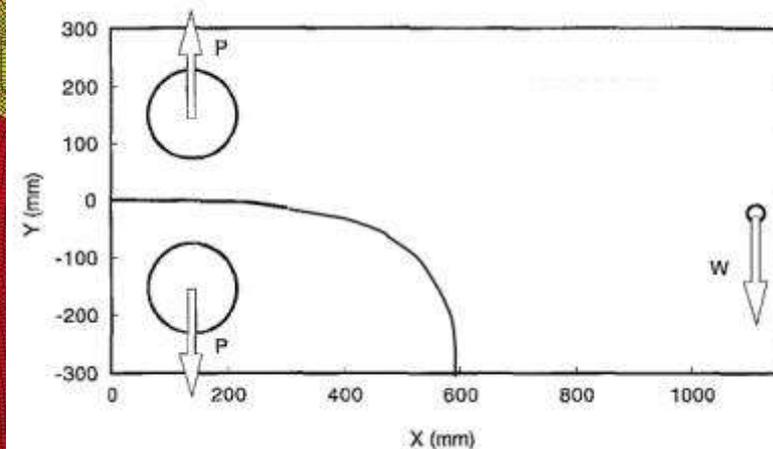
Траектория роста трещины при воздействии дополнительной постоянной силы  $W$  с первоначальным надрезом в образце под углом ( $3^\circ$ ) \*

Этот эксперимент был поставлен для проверки чувствительности геометрии распространения трещины к начальным условиям при тех же условиях нагружения

# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

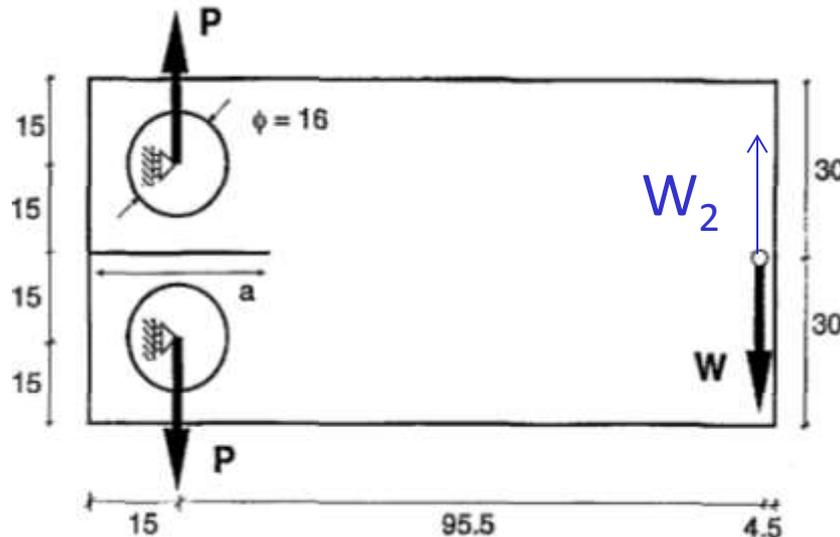


Результаты численного эксперимента. В задаче использована адаптация сетки.



Профиль трещины в реальном эксперименте.

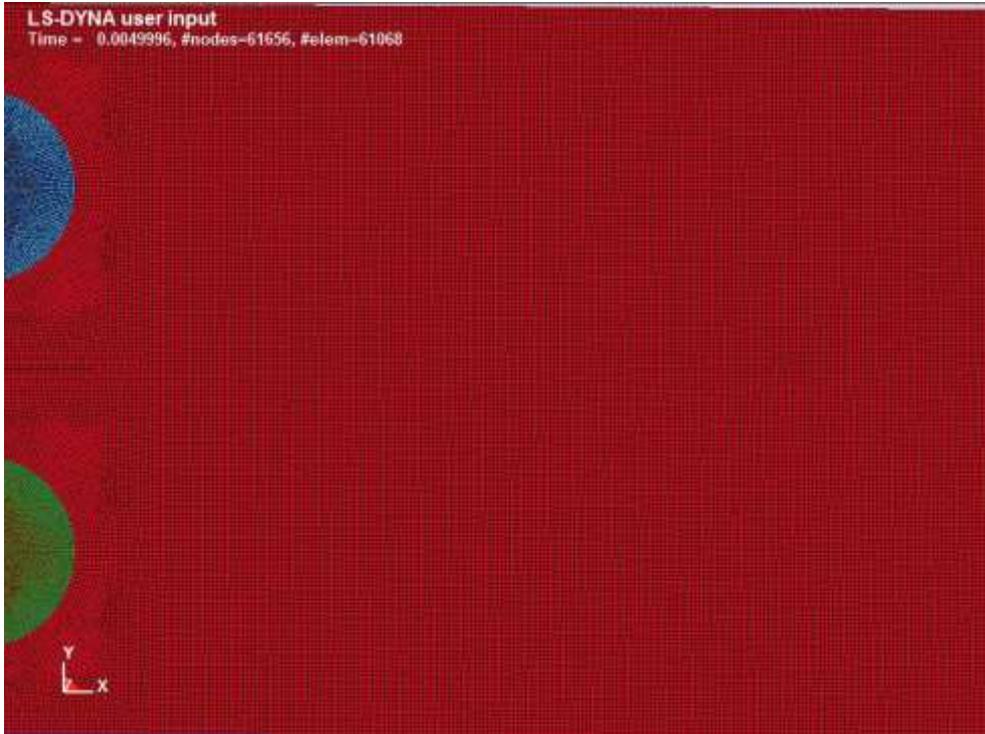
# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ



Траектория роста трещины при воздействии дополнительной переменной силы  $W^*$ .

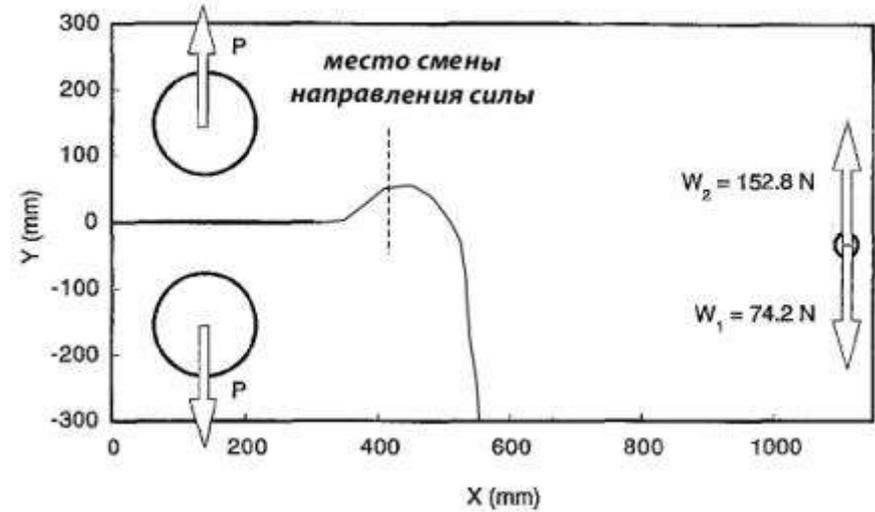
Этот эксперимент был разработан для смены направления траектории трещины. Это было сделано путем смены направления и значения дополнительной нагрузки с  $W_1 = 74,2$  N (направленной вниз) на  $W_2 = 152,8$  N (направленной вверх) в момент времени  $t = 0,2$  с.

# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

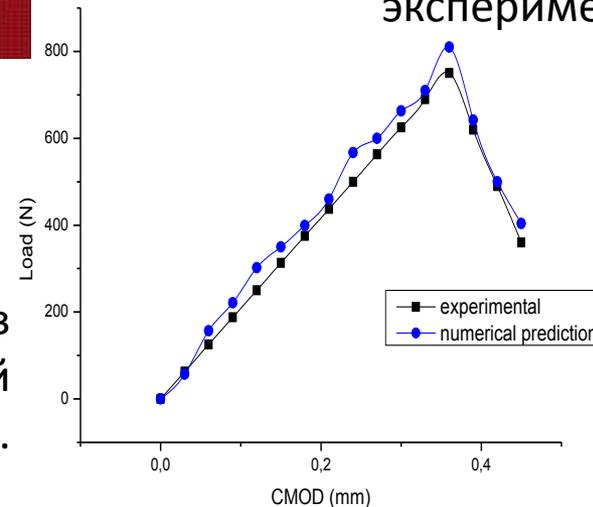


Результаты численного эксперимента. В задаче использована адаптация сетки.

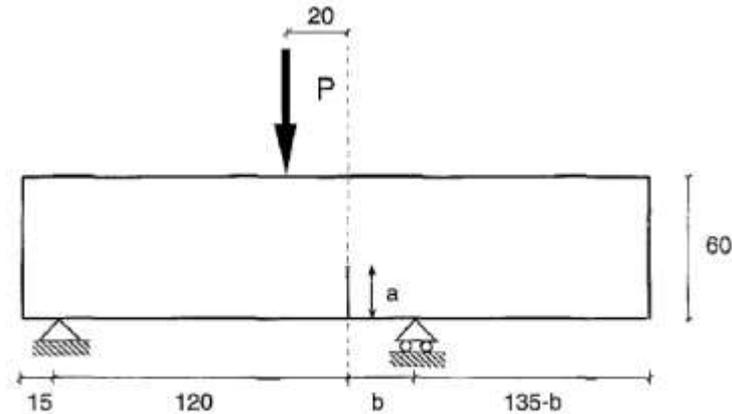
Раскрытие берегов трещины в зависимости от приложенной нагрузки.



Профиль трещины в реальном эксперименте



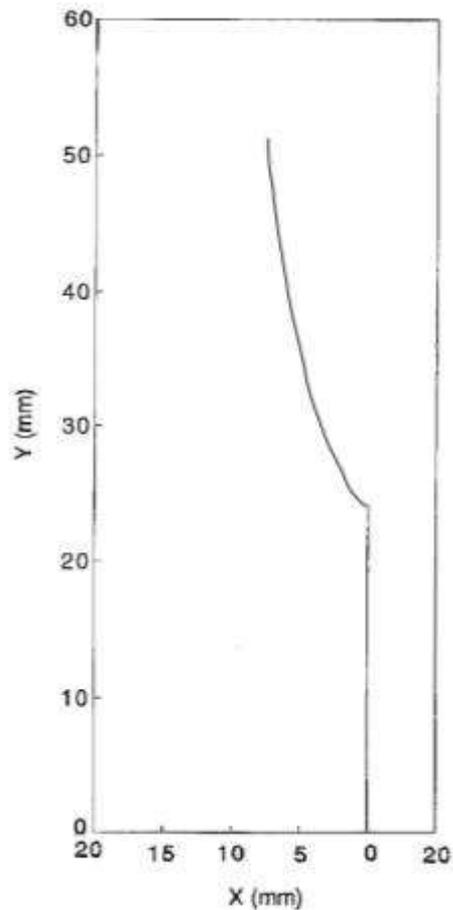
# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ



Траектория роста трещины при воздействии точечной силы  $P$  на образец с надрезом.

Снизу образец установлен на заделку и шарнирную опору. Цель теста: рассмотреть стабильную траекторию трещины при изменяющейся нагрузке  $P=4000t$  (N) для поддержания постоянного соотношения  $K_I/K_{II} = 0,41$ .

# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ



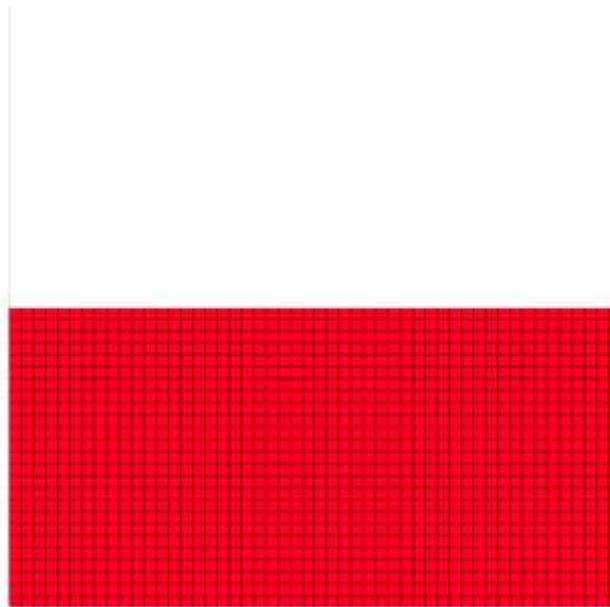
Экспериментальный  
профиль трещины.



Результаты численного эксперимента. В задаче  
использована адаптация сетки.

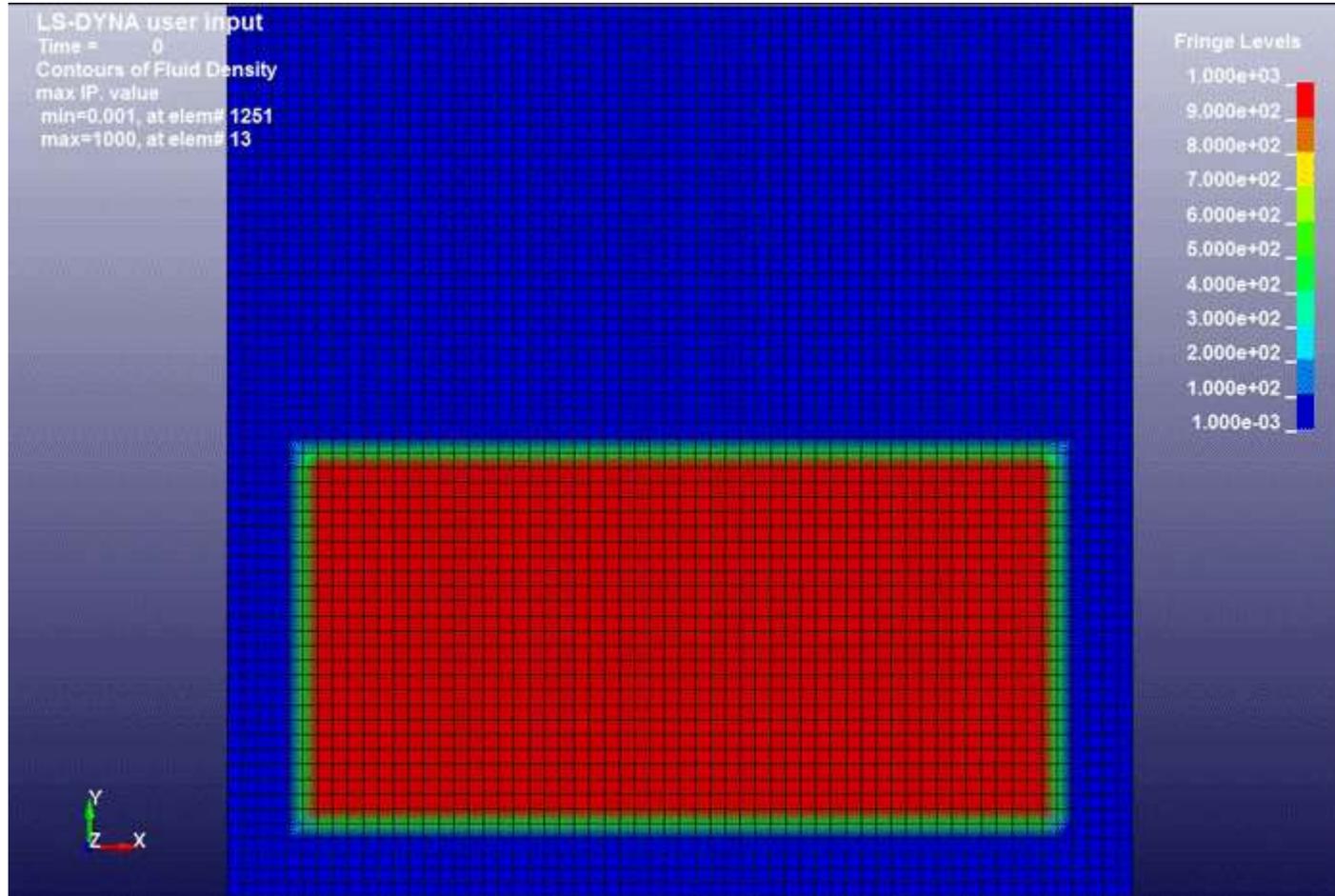
# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Задача была поставлена в плоской постановке. Было продемонстрировано взаимодействие жидкости с твердым телом с использованием **ALE-алгоритма** (Лагранжего-Эйлеров метод).



Задана несжимаемая жидкость с гравитацией, ограниченная квадратной рамкой, которая вращается вокруг своего геометрического центра с постоянной угловой скоростью  $V = 2$  рад/с.

# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

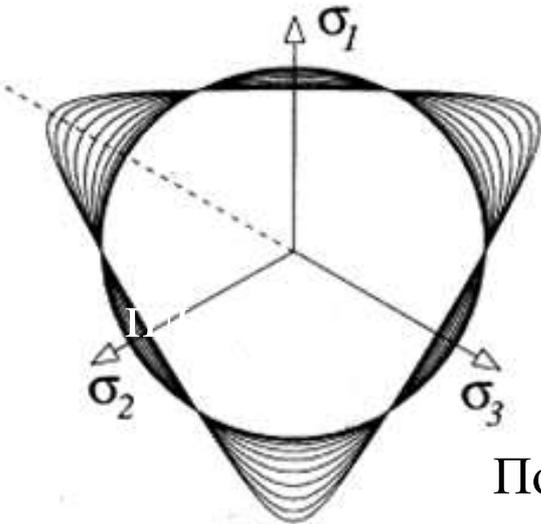


Результаты численного эксперимент. Шкала отображает плотность.

# МАТЕРИАЛЫ

жидкость	пласт
вода (несжимаемая)	бетон

На глубине свойства нефтеносного пласта близки к свойствам бетона, который был задан в LS-Dyna через материал \*MAT\_CONCRETE\_DAMAGE. Это материал основан на трех-инвариантной пластической модели Мальвара:



$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{P}{a_{1y} + a_{2y}P}$$

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{P}{a_1 + a_2P}$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{P}{a_{1f} + a_{2f}P}$$

После прохождения поверхности текучести:

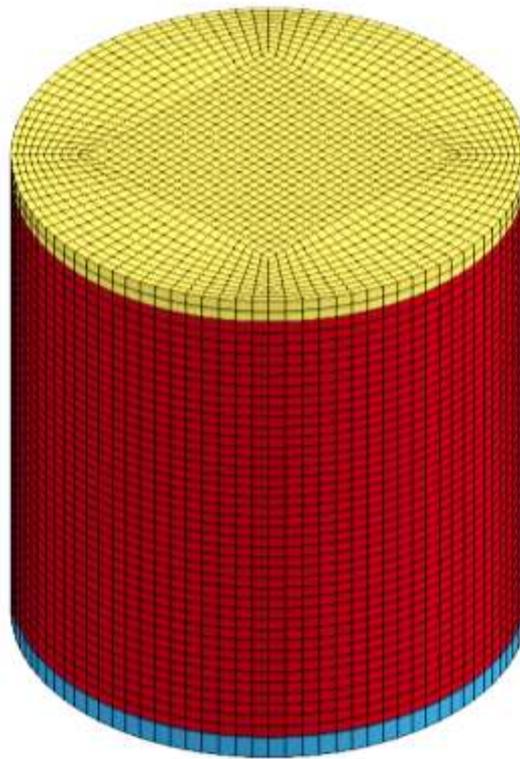
$$\Delta\sigma = \eta(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_y) + \Delta\sigma_y$$

После прохождения поверхности максимального напряжения:

$$\Delta\sigma = \eta(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_r) + \Delta\sigma_r$$

# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

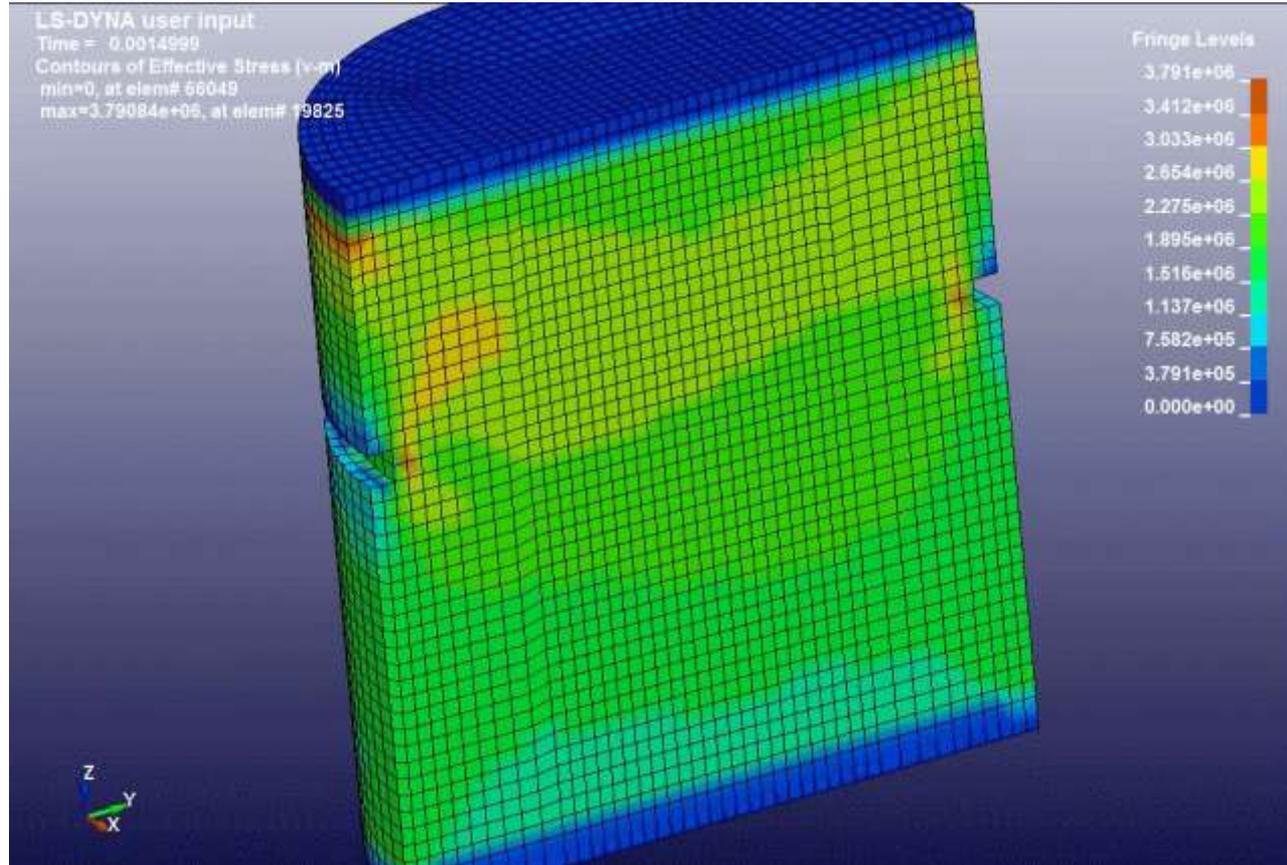
Моделирование механики разрушения. Компрессионное сжатие бетонного цилиндра с начальным дефектом в срединном сечении.



Объемная постановка. Снизу цилиндр упирается в абсолютно твердое тело.  
Сверху приложено возрастающее давление  $P=2,3t$  (МПа).

Высота цилиндра 0,1 м. Диаметр 0,1 м.

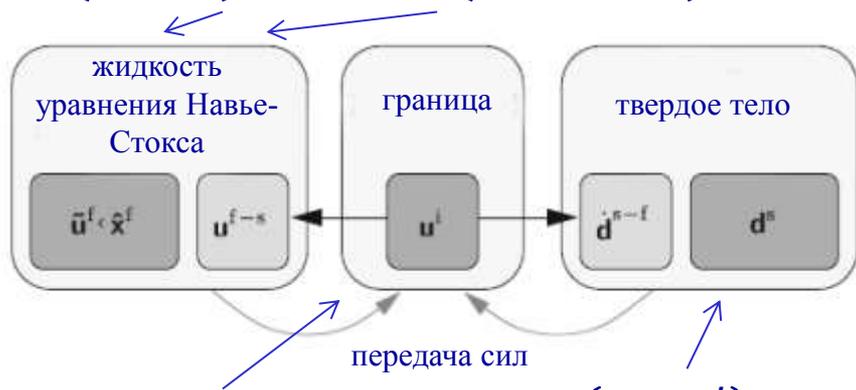
# МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ



Численные результаты. Шкала отображает напряжения по Мизесу.

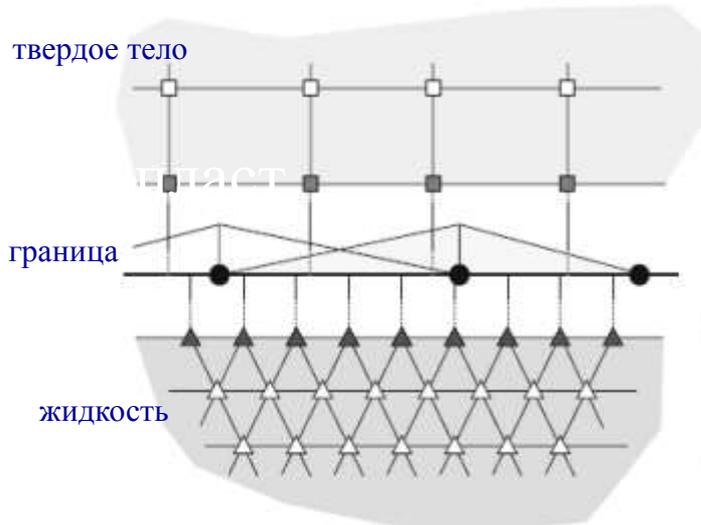
# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЖИДКОСТИ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ\*

$$m(\hat{x}^f, u^i) = 0 \quad \hat{g}^f(\hat{g}^f, \hat{x}^f, u^i) = 0$$



$$g^i(u^i, \tilde{u}^f, \hat{x}^f, d^s) = 0 \quad g^s(d^s, u^i) = 0$$

1. оценить  $\tilde{u}^f, u^i$
2. для системы уравнений в жидкости  $m(\hat{x}^f, u^i) = 0$  вычислить  $\hat{x}^f$  основываясь на  $u^i$  и  $\frac{\partial \hat{x}^f}{\partial u^i}$  из  $\frac{\partial m}{\partial \hat{x}^f} \frac{\partial \hat{x}^f}{\partial u^i} = -\frac{\partial m}{\partial u^i}$
3. для системы уравнений в твердом теле  $g^s(d^s, u^i) = 0$  вычислить  $d^s$  основываясь на  $u^i$  и  $\frac{\partial d^s}{\partial u^i}$  из  $\frac{\partial g^s}{\partial d^s} \frac{\partial d^s}{\partial u^i} = -\frac{\partial g^s}{\partial u^i}$
4. вычислить невязку для  $\hat{g}^f(\tilde{u}^f, \hat{x}^f, u^i)$  и  $g^i(\tilde{u}^f, \hat{x}^f, u^i, d^s)$ , завершить если она меньше допуска
5. вычислить производные A, B, C, D
6. решить совмещенную систему жидкости и интерфейса и найти новые  $\tilde{u}^f, u^i$

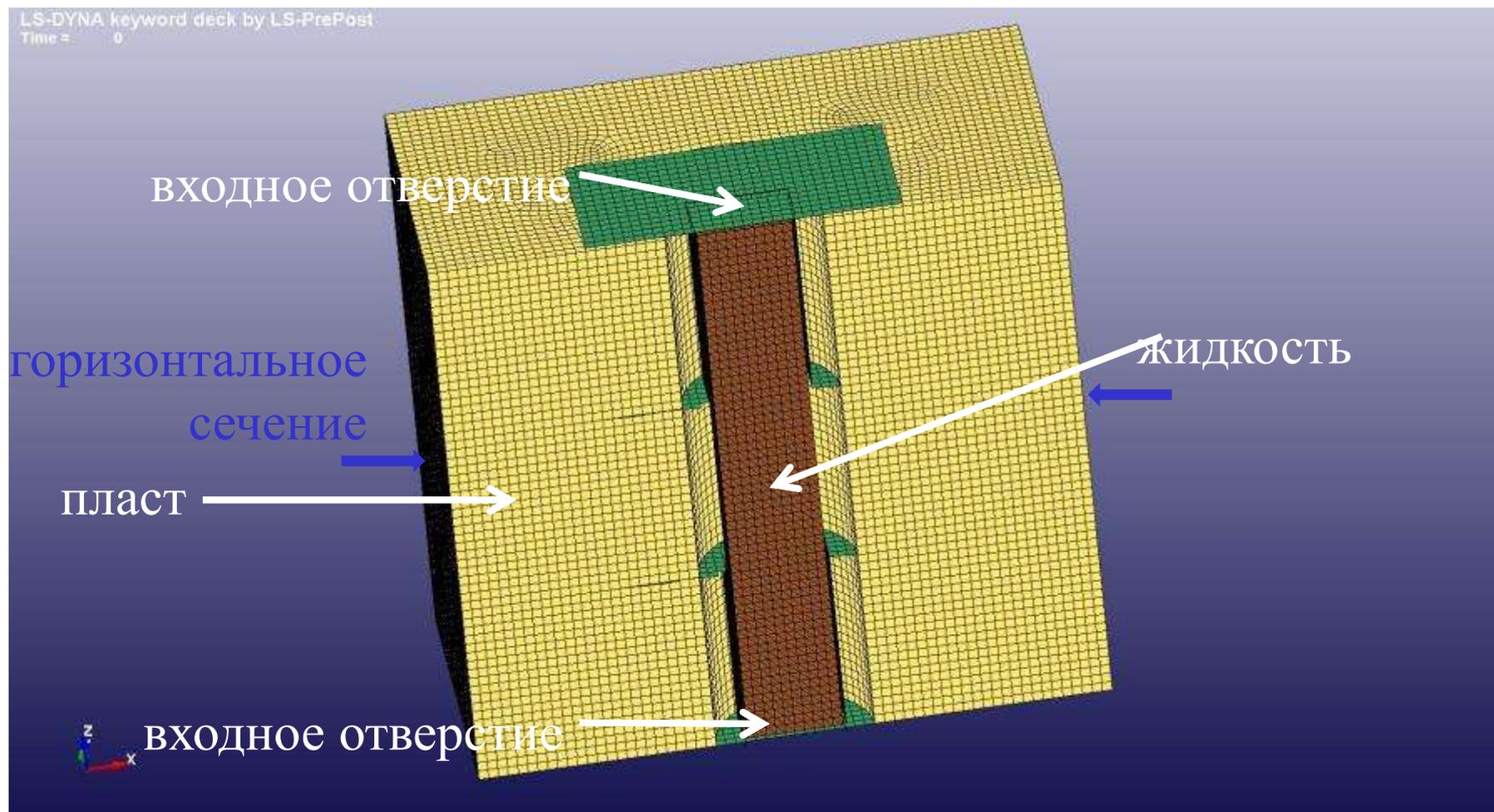


$n^f$	A	E1	D	0
$n^s$	0	B	E3	0
$n^i$	D	E2	E4	D
$n^s$	0	0	D	C



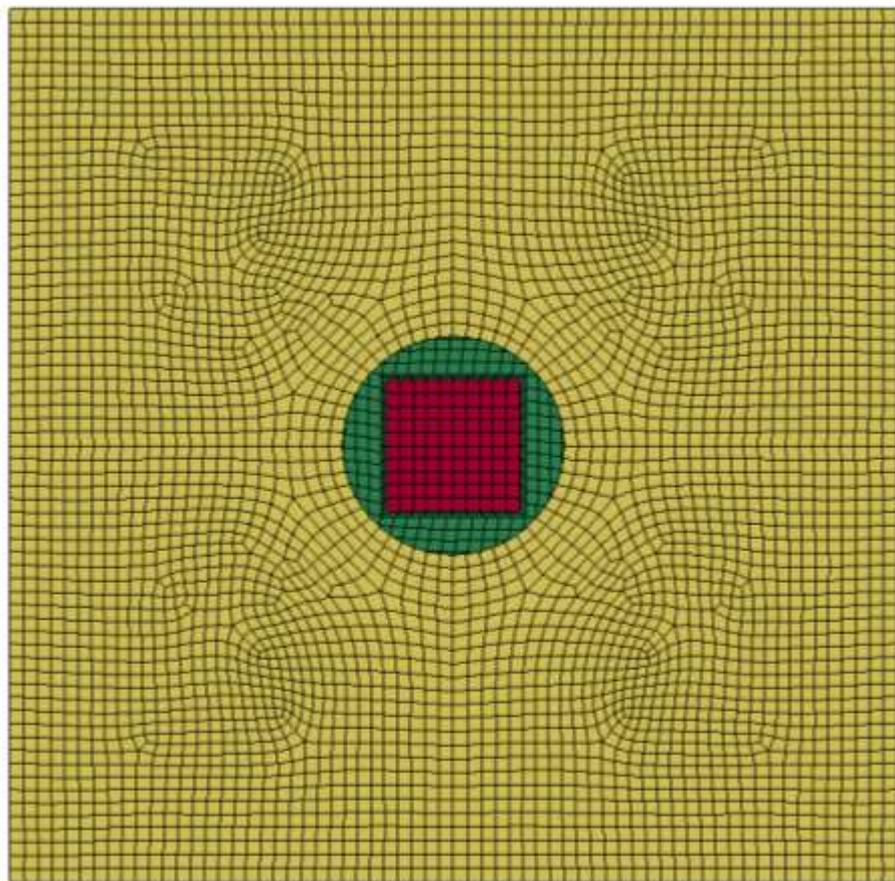
\*Wulf G. Dettmer, Djorđe Perić – On the coupling between fluid flow and mesh motion in the modeling of fluid-structure interaction

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ТРЕЩИНЫ



До момента начала закачки жидкости грунт находится в преднапряженном состоянии ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ ), имитирующем напряжения в пласте на глубине

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ТРЕЩИНЫ



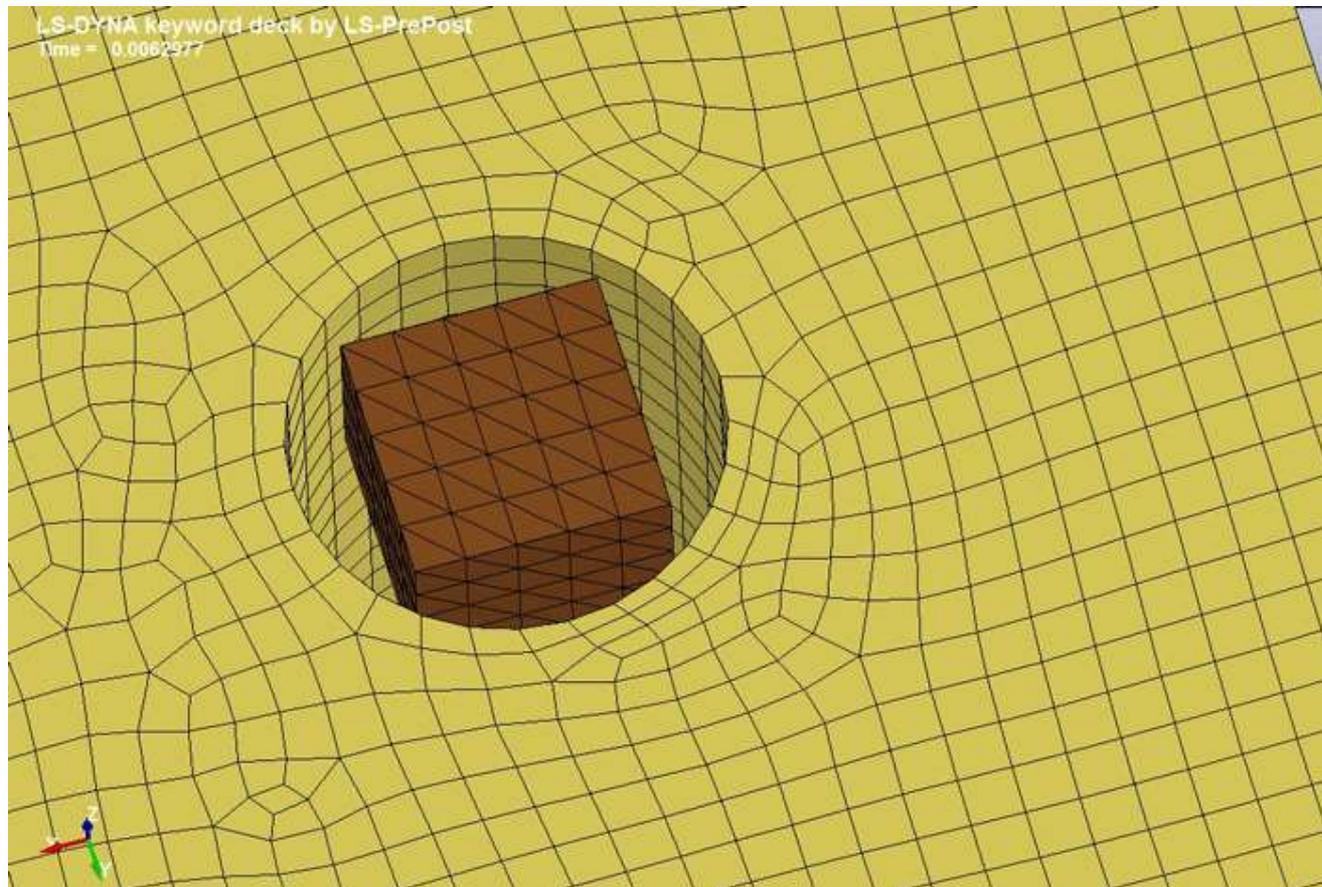
вертикальное  
сечение

Время рассматриваемой динамической задачи: 0,1 с

Размеры образца: 1,4 x 1,4 x 1,4 м.

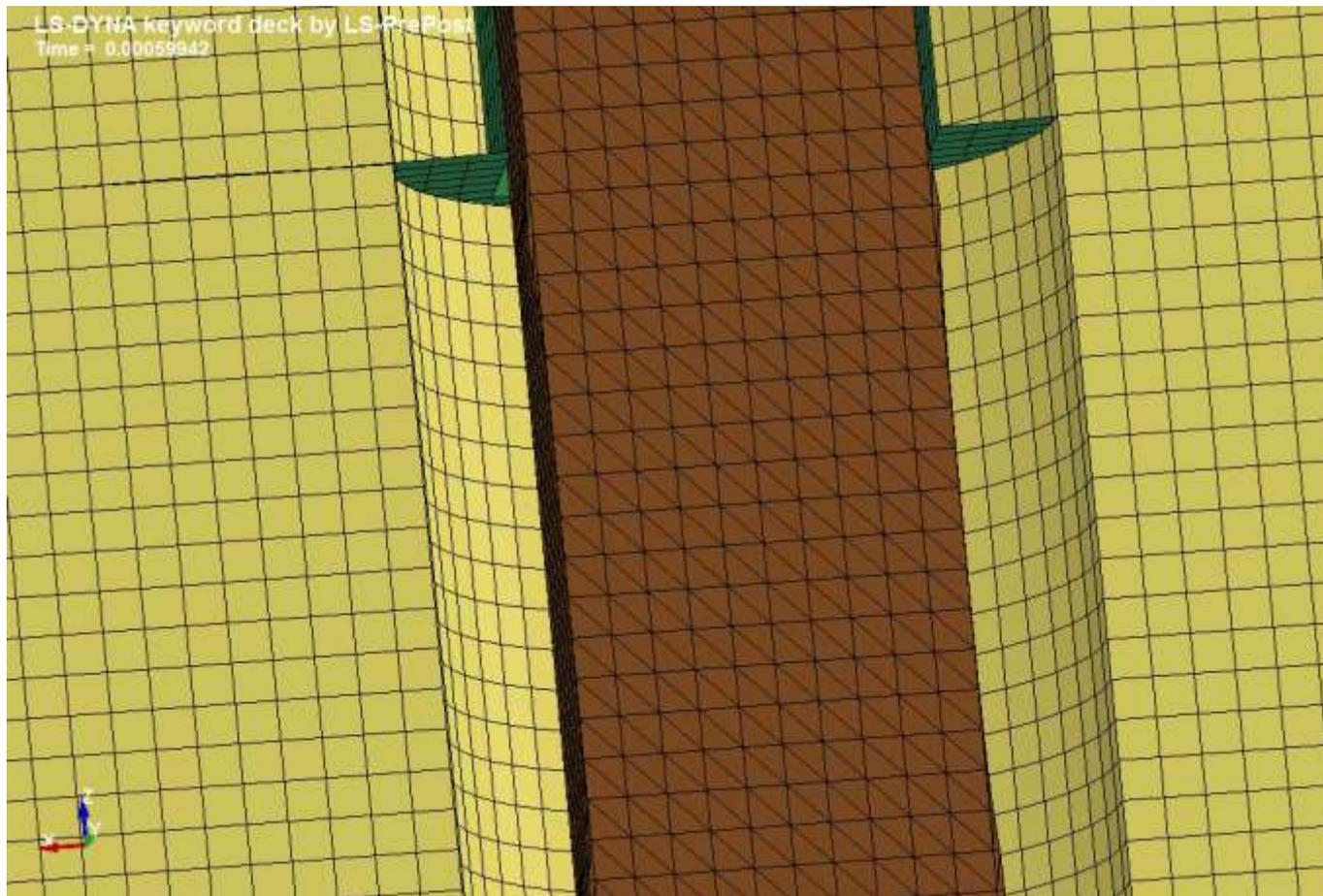
Диаметр скважины: 40 см

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ТРЕЩИНЫ



Численный эксперимент. Горизонтальное сечение

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ТРЕЩИНЫ



Численный эксперимент. Вертикальное сечение



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Процесс моделирования данной задачи потребовал объединить в одной задаче знания из нескольких областей
- В будущем можно промоделировать трещину для пласта в условиях разных преднапряженных состояний ( $1,25\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$  или  $1,5\sigma_x = \sigma_y = 1.25\sigma_z$ ) и оценить факторы, влияющие на фронт трещины, что поможет ответить на вопрос: будет ли сдвигать фронт в таких условиях (скажем, с вертикального, на горизонтальный)
- Также стоит промоделировать трещину в условиях когда имеется слабое место в скважине, что предопределило бы её развитие именно от туда

Спасибо за внимание!