



Презентация по дипломной работе

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СЦЕПЛЕНИЯ БЕТОНА С АРМАТУРОЙ В АНКЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДЛЯ Ж/Б КОНСТРУКЦИЙ

Исполнитель: **Пименов Н. К.¹**

Научный руководитель: **Лукин А.В.¹**

¹ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский политехнический университет», каф. «Механика и процессы управления», г. Санкт-Петербург, Россия

Санкт-Петербург
2015



Эксперимент №1:

Двухосное монотонное нагружение цилиндрического бетонного образца

[1] CEB-FIP Model Code 1990

[2] Abaqus Analysis User's Guide

Схема эксперимента

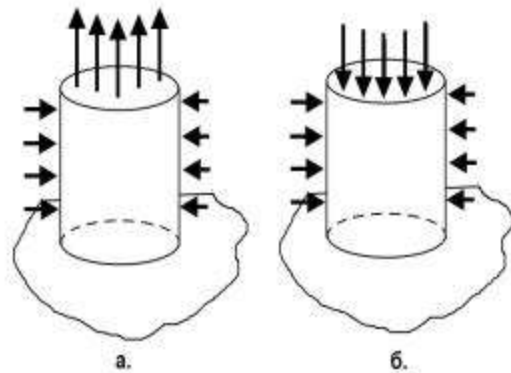
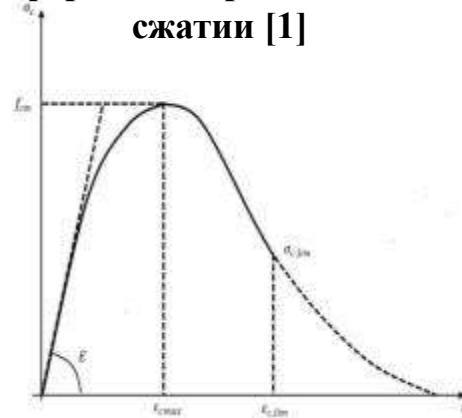


Диаграмма напряжения-деформации при одноосном сжатии [1]



Пример нестабильной диаграммы [2]



Конечно-элементная модель



Диаграмма напряжения-деформации при одноосном растяжении [1]

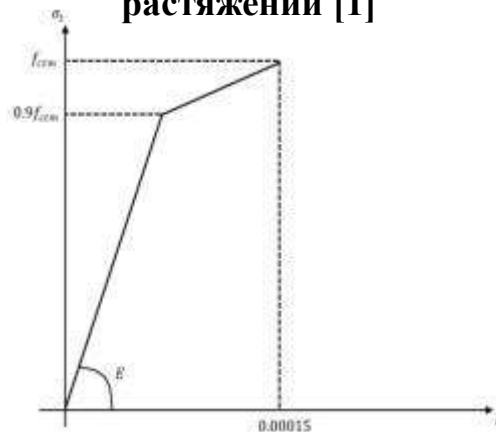
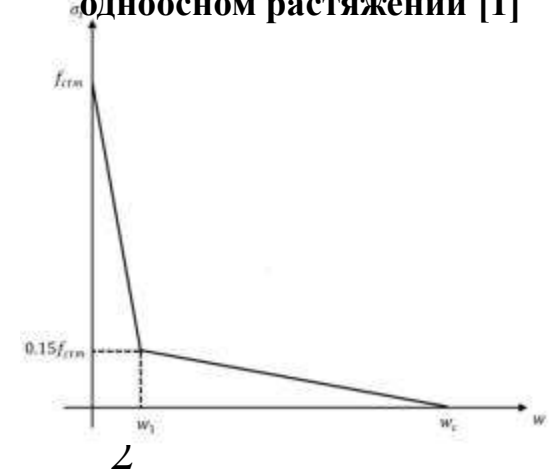


Диаграмма напряжения-раскрытие трещин при одноосном растяжении [1]

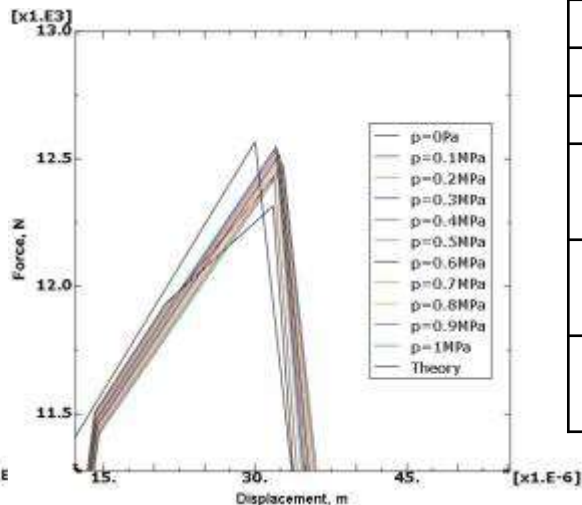
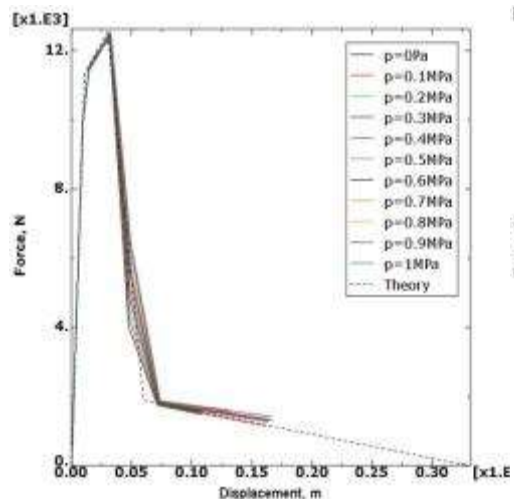
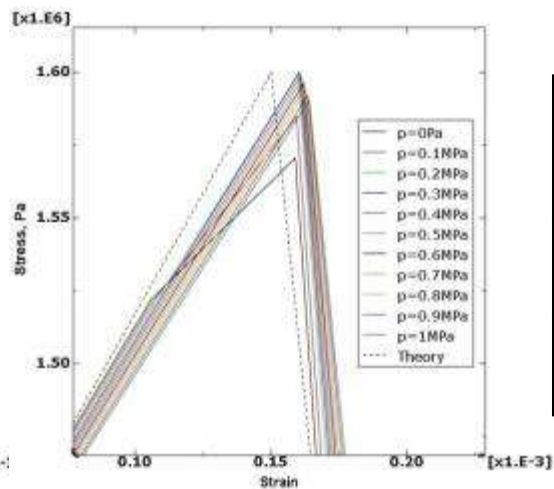
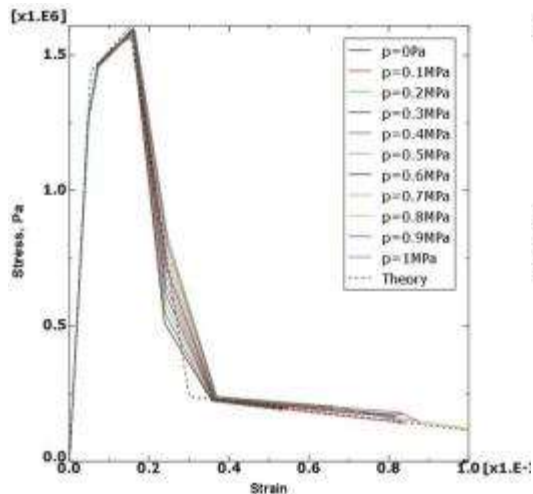




Эксперимент №1:

Результаты:

Растяжение



	CEB-FIP Model Code 90	ABAQUS	Отличие, %
Предел прочности, МПа	1.6	1.57	≈ 2
Деформации пика	0.00015	0.000159	≈ 6

Класс бетона		C12
Модуль упругости	E, ГПа	27
Предел прочности на сжатие	F_{cm} , МПа	20
Предел прочности на растяжение	F_{ctm} , МПа	1.6
Деформация пика на диаграмме сжатия	ϵ_c	0.0022
Деформация пика на диаграмме растяжения	ϵ_t	0.00015



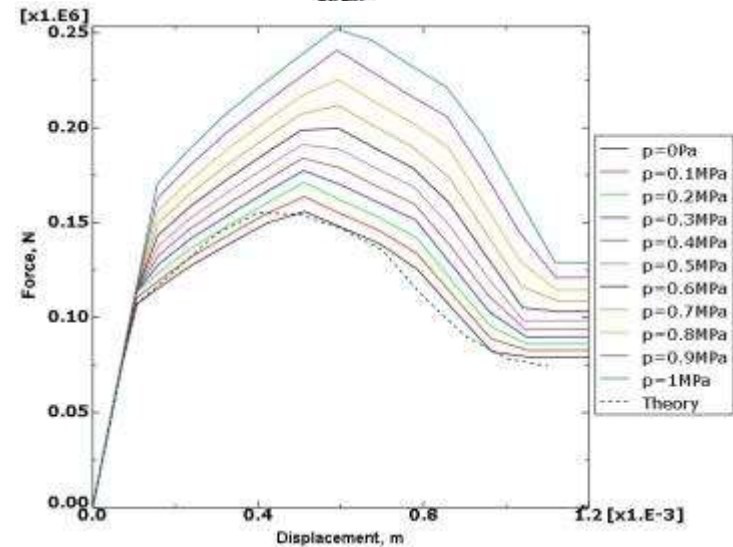
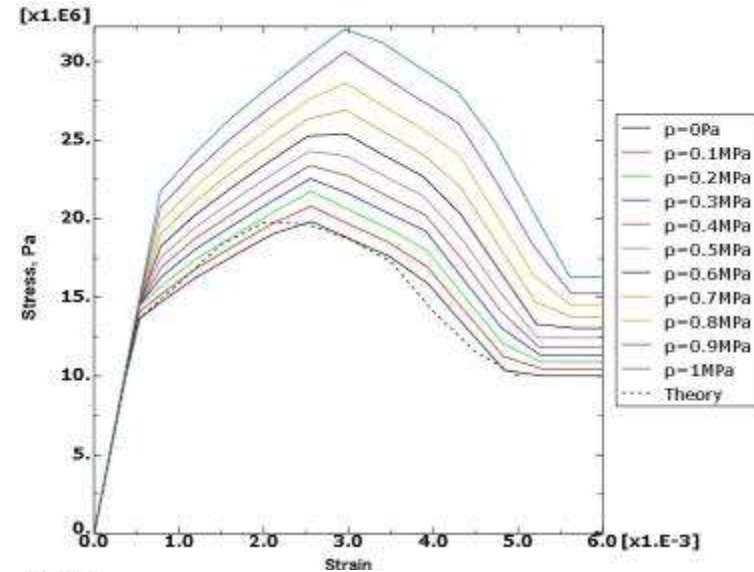
Эксперимент №1:

Результаты:

	CEB-FIP Model Code 90	ABAQUS	Отличие, %
Предел прочности, МПа	20	19.81	≈ 1
Деформации пика	0.0022	0.0026	≈ 15

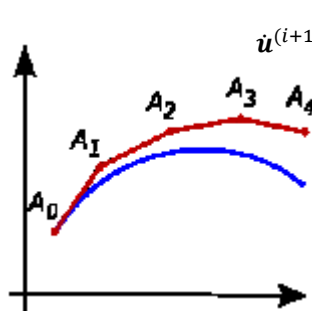
Гидростатическое давление	P = 0 МПа	P = 1 МПа	Увеличение на 0.1 МПа, %
Предел прочности, МПа	19.81	32.1	≈ 6
Деформации пика	0.0026	0.00295	≈ 1.5

Сжатие





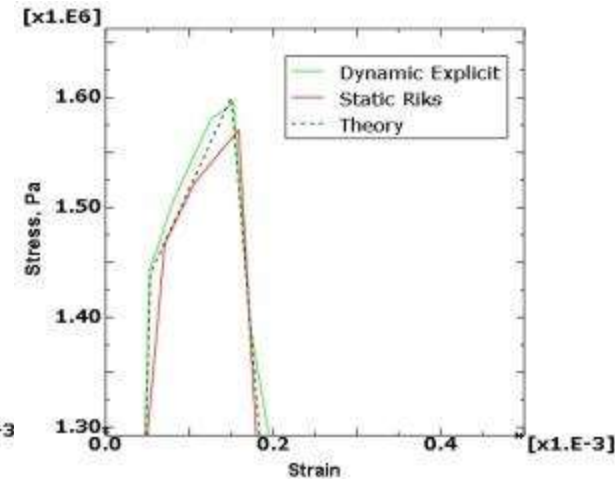
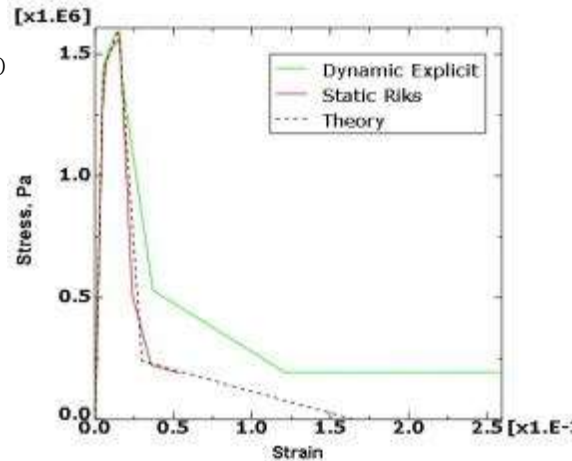
Эксперимент №2: Решение явным методом эксперимента №1



$$\dot{u}^{(i+1/2)} = \dot{u}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^i}{2} \ddot{u}^{(i)}$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+1/2)}$$

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)})$$



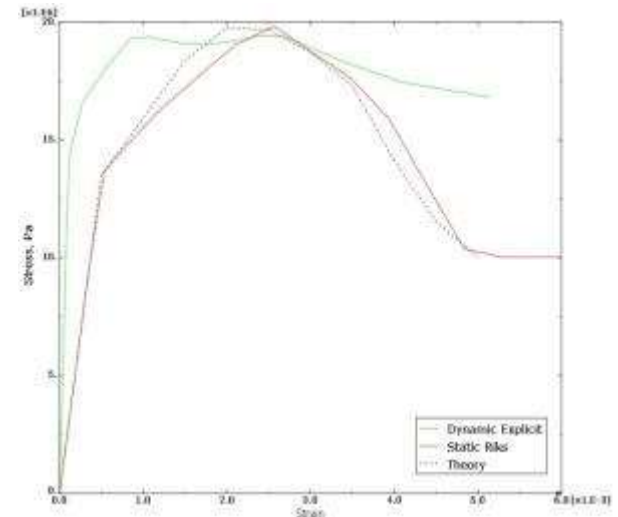
Растяжение

	CEB-FIP Model Code 90	Static Riks	Dynamic Explicit
Предел прочности, МПа	1.6	1.57	1.59
Деформации пика	0.00015	0.000159	0.000152
Деформации при 0.2МПа на ниспадающей ветви диаграммы	0.00055	0.00054	0.00123

Сжатие

	CEB-FIP Model Code 90	Static Riks	Dynamic Explicit
Предел прочности, МПа	20	19.81	19.63
Деформации пика	0.0022	0.0026	0.00082
Деформации при 17.1 МПа на ниспадающей ветви диаграммы	0.0036	0.0037	0.0051

Сжатие

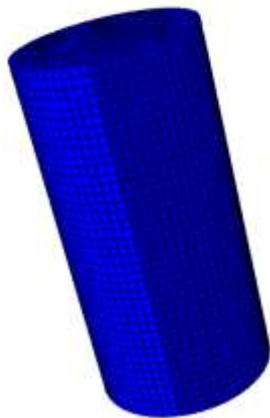
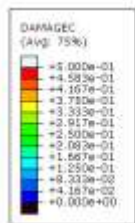




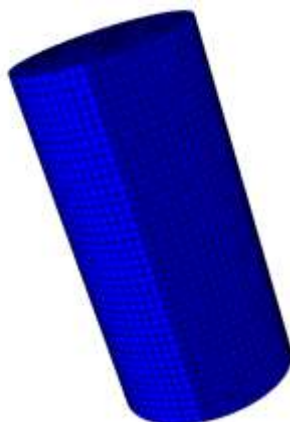
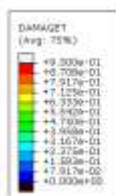
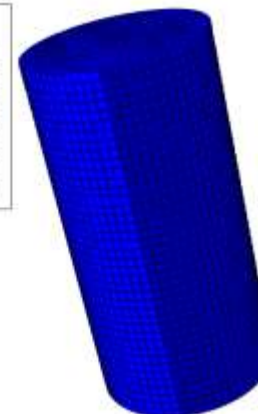
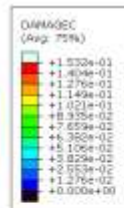
Эксперимент №3: Разрушение бетонного образца

Dynamic Explicit

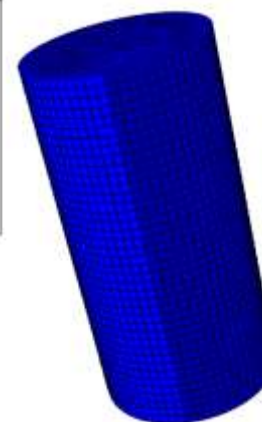
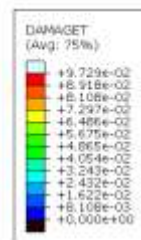
Static Riks



Сжатие



Растяжение

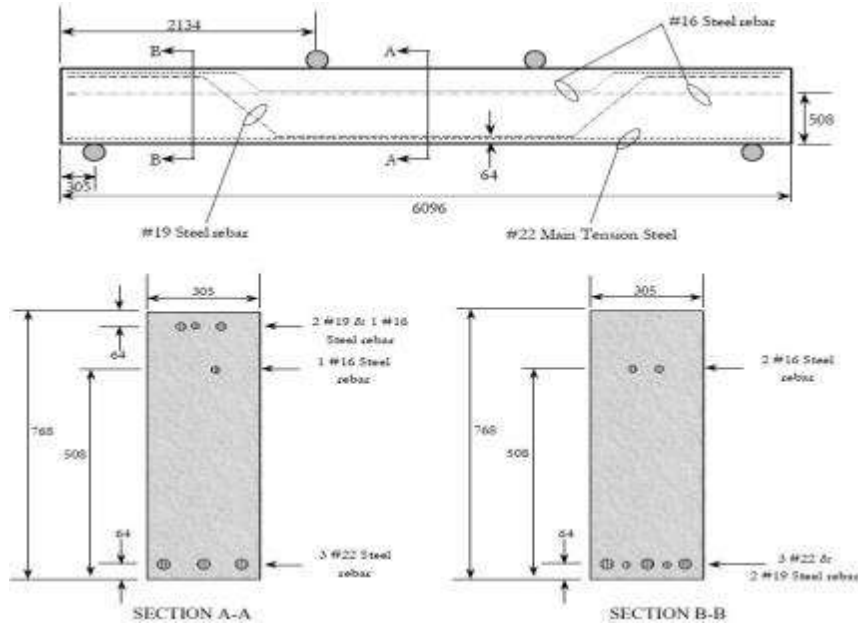




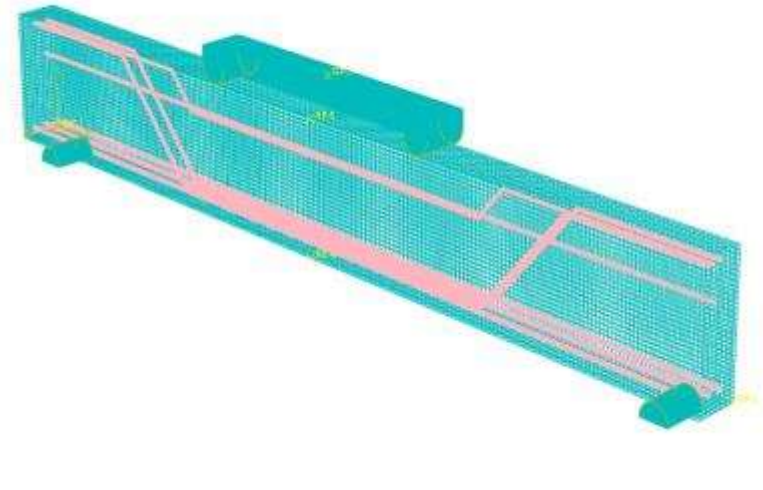
Эксперимент №4: Монотонное нагружение армированной балки

[3] G. Monti, E. Spacone, F. C. Filippou. Model for anchored reinforcing bars under seismic excitation.

Схема армирования балки [3]



Конечно-элементная модель



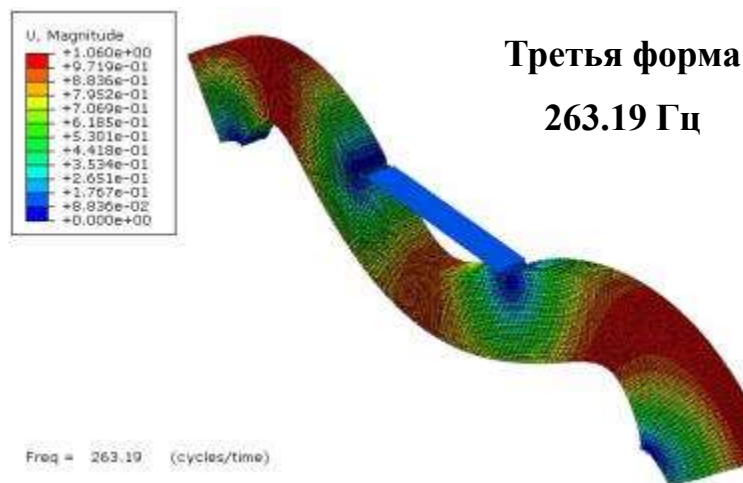
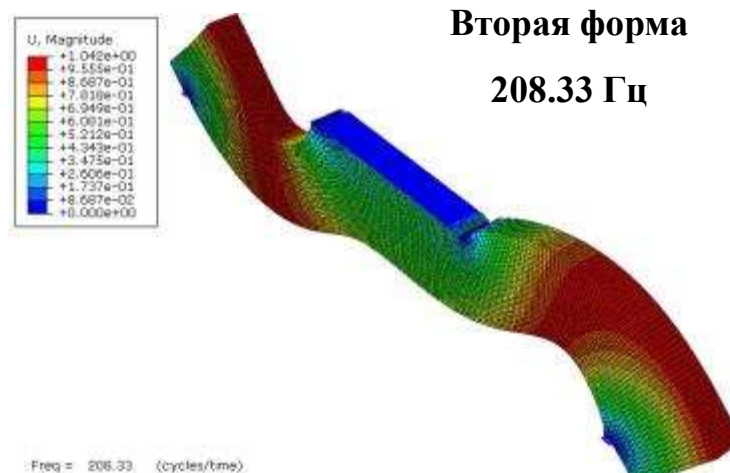
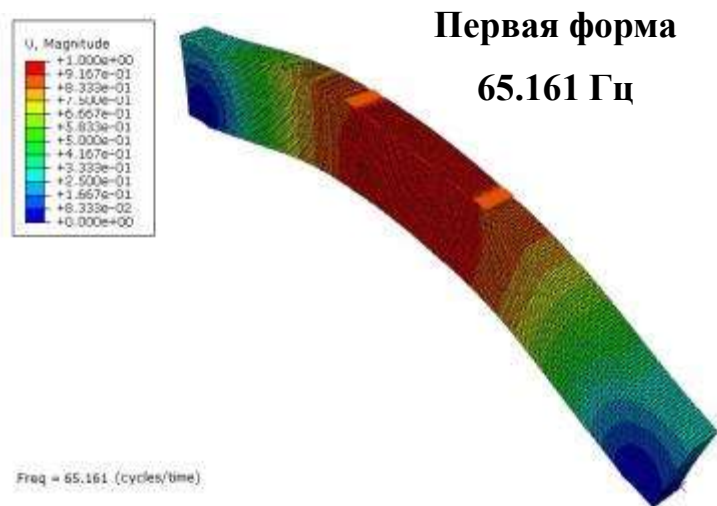
Параметры арматуры [3]

Стандартный размер стержня	Метрический размер стержня	Площадь стержня, мм ²
#5	#16	200
#6	#19	280
#7	#22	390

Характеристики материалов [3]

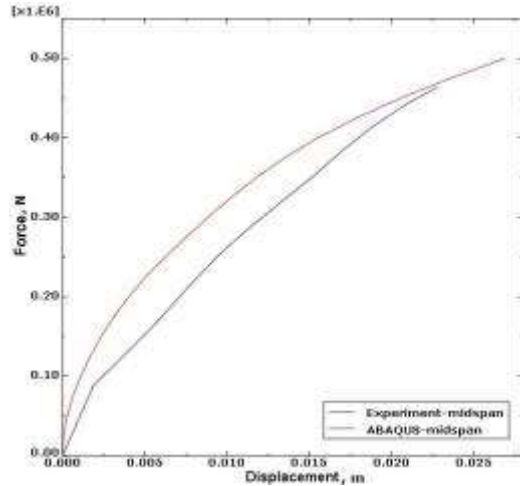
Материал	Предел прочности, МПа	Предельная деформация	Модуль упругости, ГПа
Бетон	20.7	0.003	21.5
Сталь	414	0.002	200

Эксперимент №4: Исследование изгибных форм колебаний:



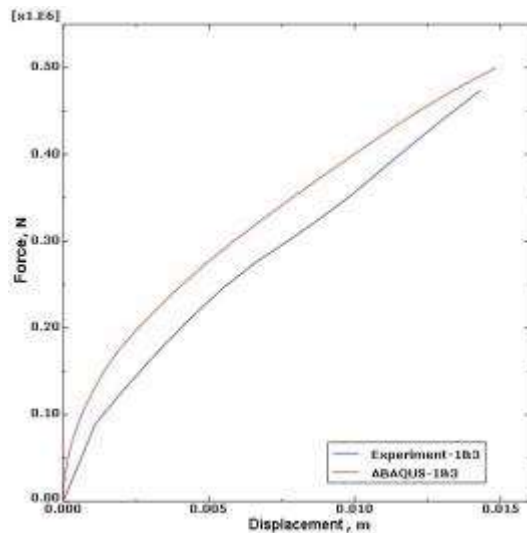


Эксперимент №4: Результаты:



Зависимость прогиба от силы в среднем датчике

	Прогиб, м	Сила, Н ABAQUS	Сила, Н Experiment	Отличие %
Максимальное отличие	0.0057	241256	167296	≈ 44
Отличие при максимальном прогибе	0.0241	478734	476000	≈ 0.6



Зависимость прогиба от силы в крайнем датчике

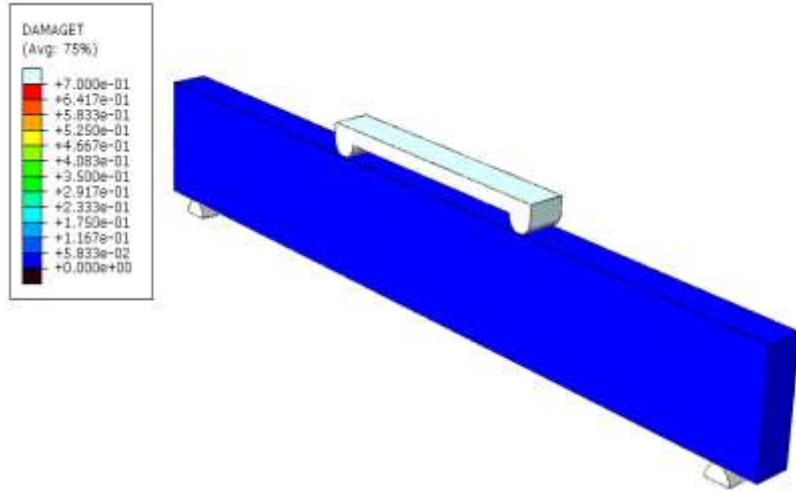
	Прогиб, м	Сила, Н ABAQUS	Сила, Н Experiment	Отличие %
Максимальное отличие	0.0068	325014	275515	≈ 17.9
Отличие при максимальном прогибе	0.0143	491832	476000	≈ 3.3



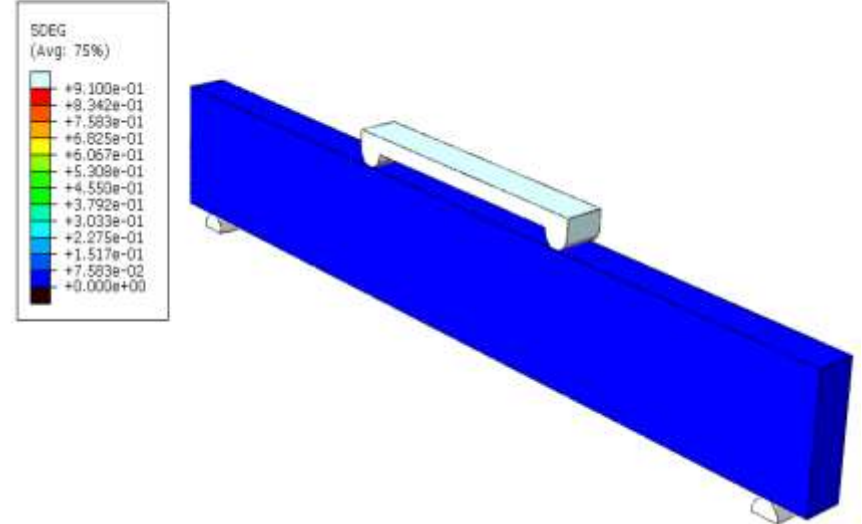
Эксперимент №4:

Результаты:

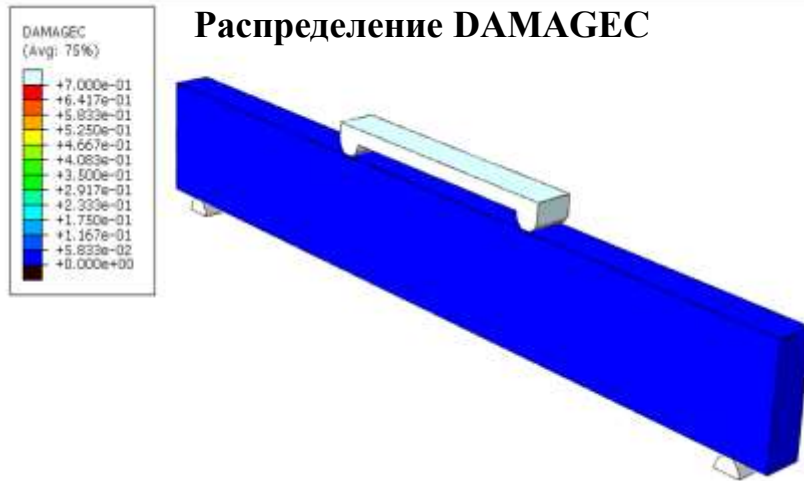
Распределение DAMAGET



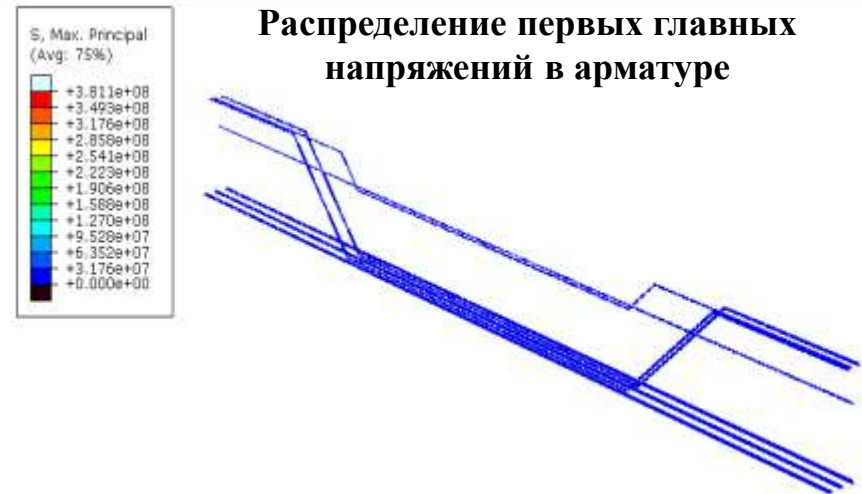
Распределение SDEG



Распределение DAMAGEC



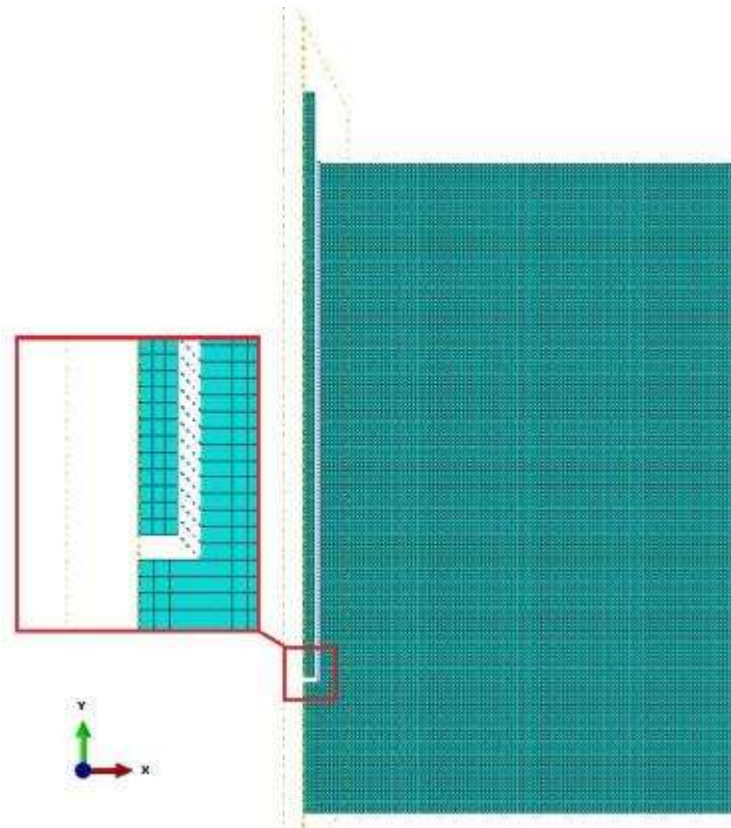
Распределение первых главных напряжений в арматуре



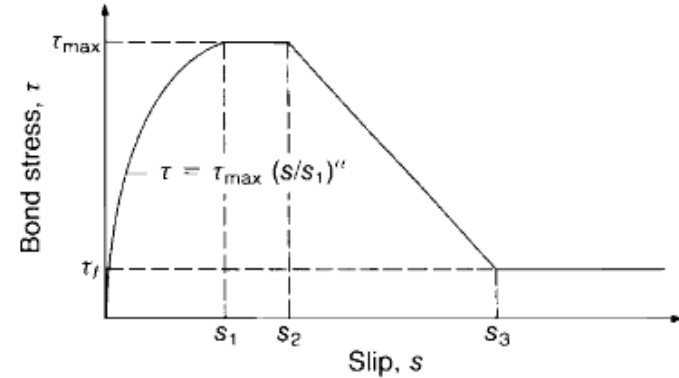


Эксперимент №5: Вытягивание арматуры из бетона

Осесимметричная постановка задачи с моделированием пружин нелинейной жесткости



Нелинейная упругая характеристика пружины сформирована на основе зависимости CEB-FIP Model Code 90

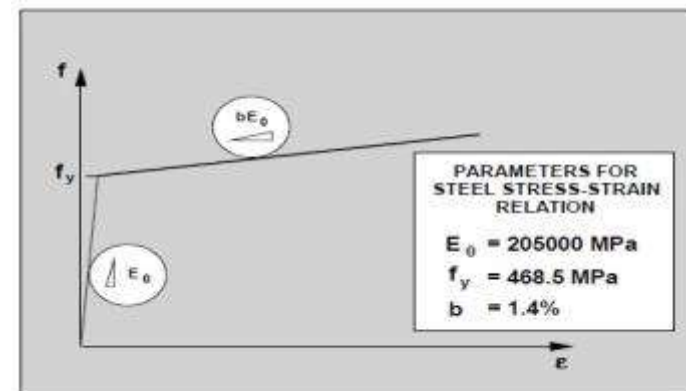


$$\tau = \tau_{\max} (s/s_1)^2 \text{ for } 0 \leq s \leq s_1$$

$$\tau = \tau_{\max} \text{ for } s_1 < s \leq s_2$$

$$\tau = \tau_{\max} - (\tau_{\max} - \tau_f) \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right) \text{ for } s_2 < s \leq s_3$$

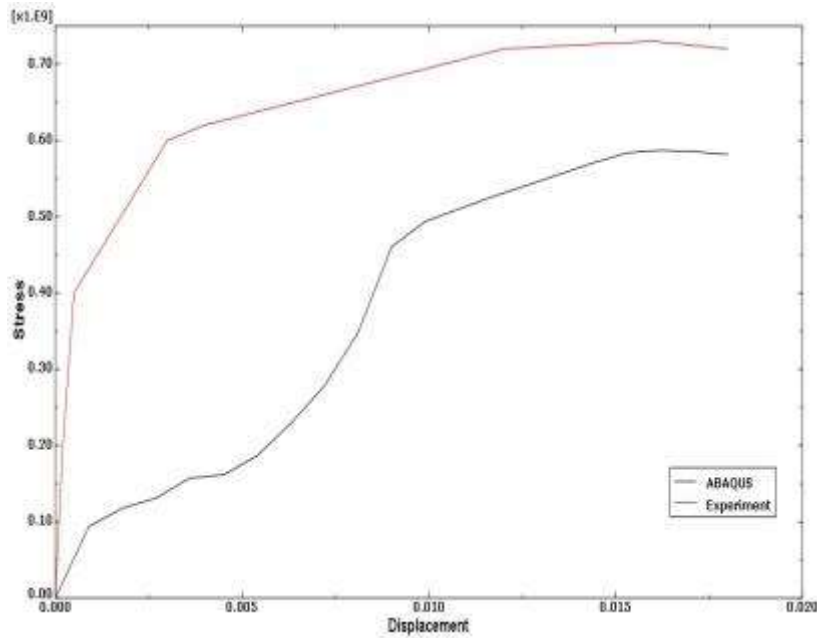
$$\tau = \tau_f \text{ for } s_3 < s$$



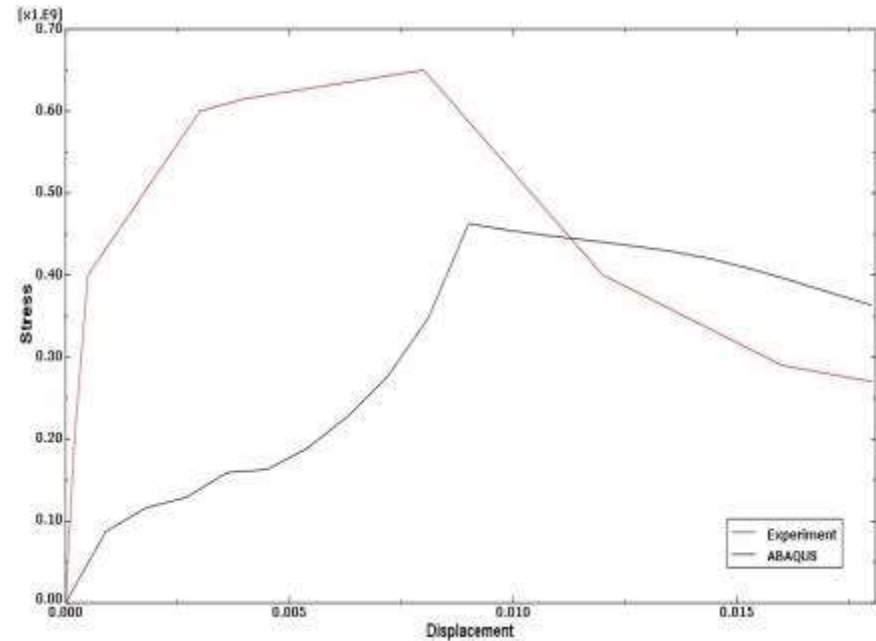


Эксперимент №5: Результаты:

Данные реального эксперимента получены из статьи G. Monti, E. Spacone, F. C. Filippou. Model for anchored reinforcing bars under seismic excitation.



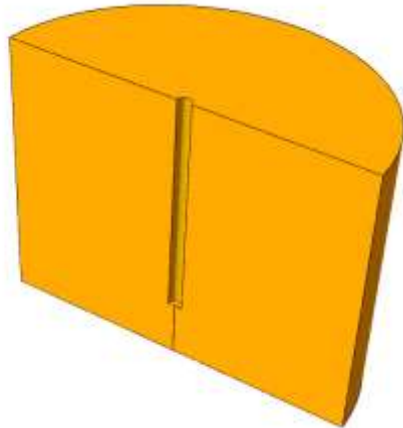
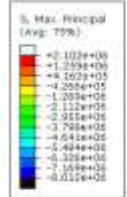
**Диаграмма напряжения-
перемещения в шейке стального
стержня**



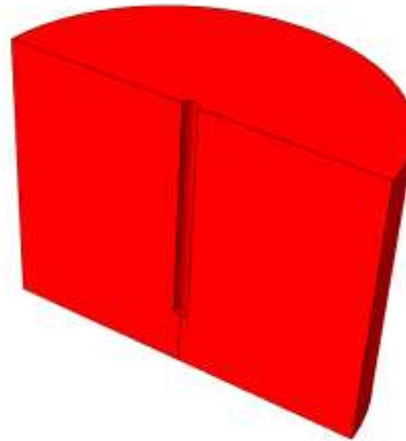
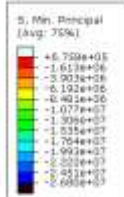
**Диаграмма напряжения-
перемещения на верхнем конце
стального стержня**



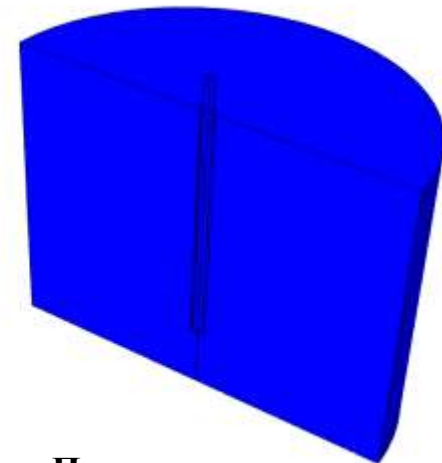
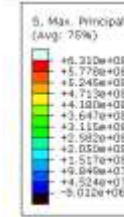
Эксперимент №5: Результаты:



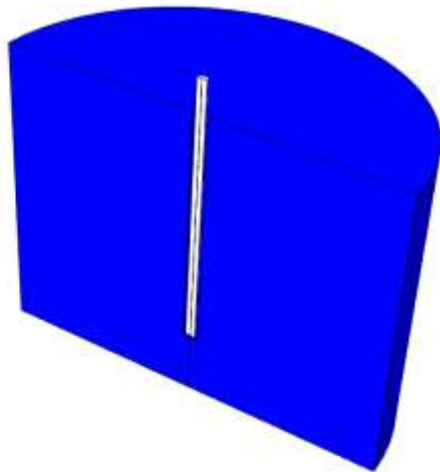
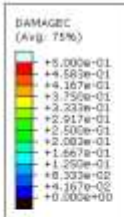
Первые главные напряжения в бетоне



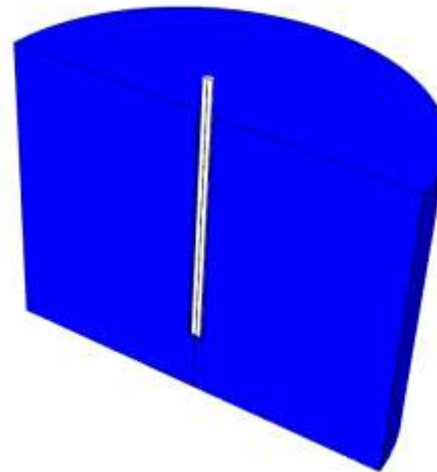
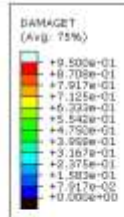
Третьи главные напряжения в бетоне



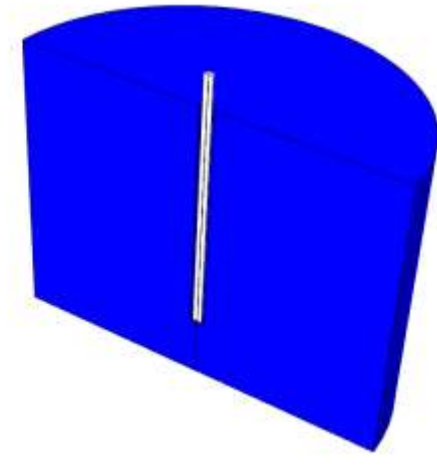
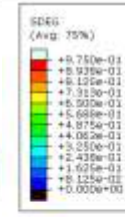
Первые главные напряжения в стержне



Распределение DAMAGEC



Распределение DAMAGET



Распределение SDEG



Эксперимент №6:

Вытягивание арматуры из недеформируемого бетона. Результаты:

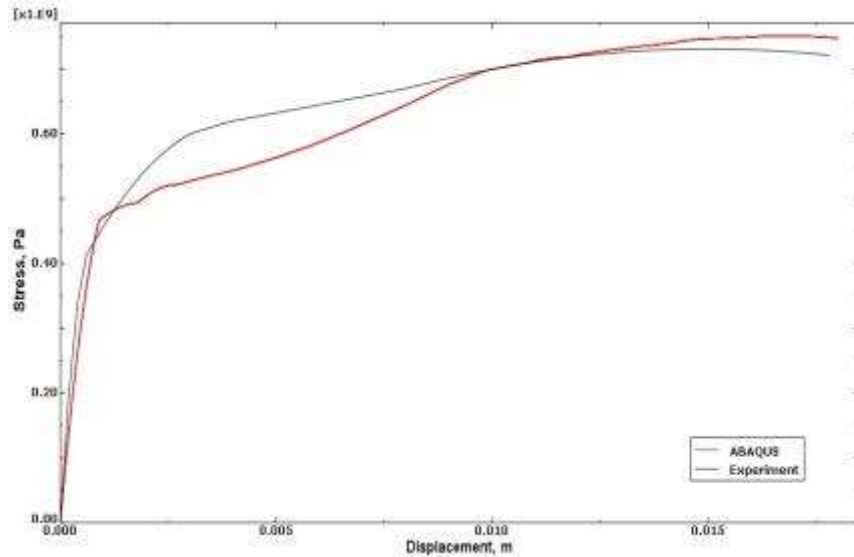


Диаграмма напряжения-перемещения в шейке стального стержня

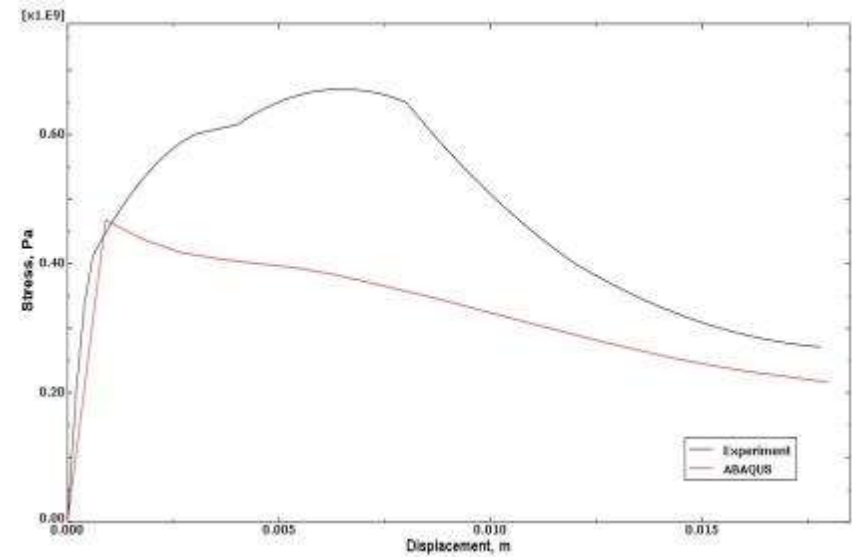


Диаграмма напряжения-перемещения на верхнем конце стального стержня

	Experiment	ABAQUS	Отличие, %
Напряжение (МПа) в точке наибольшей разницы (0.0071 м)	621	533	≈ 14.2
Напряжение (МПа) в точке наибольшего перемещения (0.018 м)	720	746	≈ 3.6

	Experiment	ABAQUS	Отличие, %
Напряжение (МПа) в точке наибольшей разницы (0.0038 м)	665	384	≈ 42.3
Напряжение (МПа) в точке наибольшего перемещения (0.018 м)	270	215	≈ 20



Эксперимент №7:

Вытягивание арматуры из бетона. Диаграмма контакта №2. Результаты:

Диаграмма напряжения-перемещения в шейке стального стержня

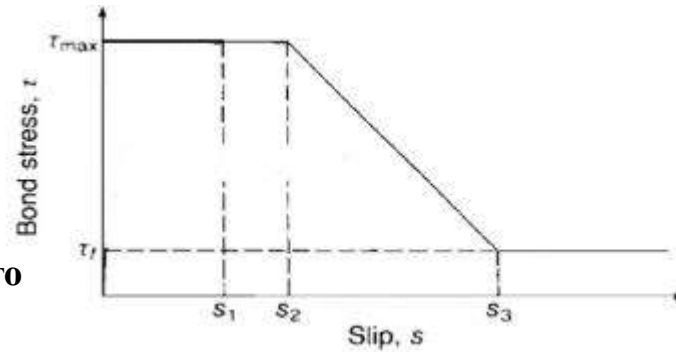
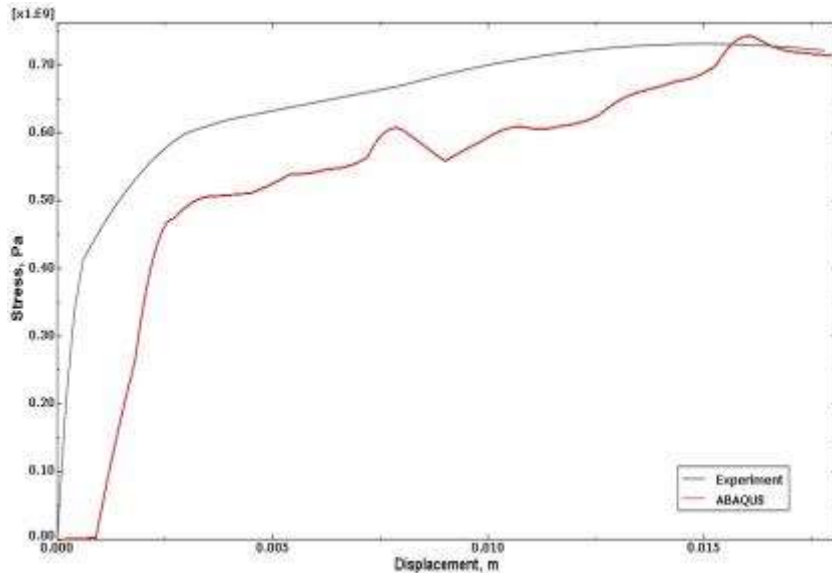
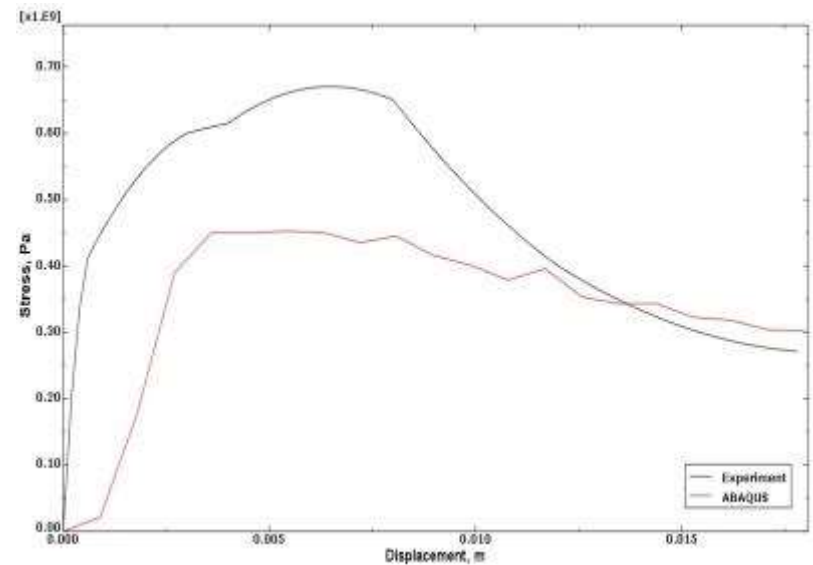


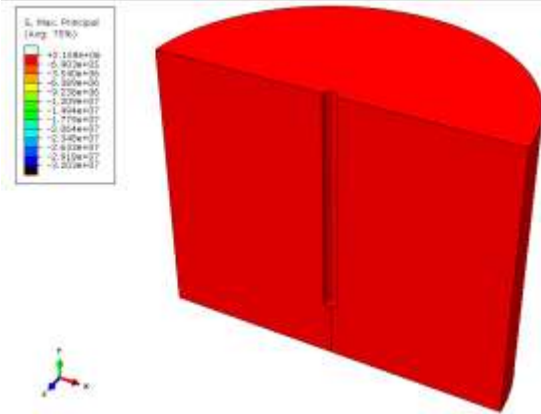
Диаграмма напряжения-перемещения на верхнем конце стального стержня



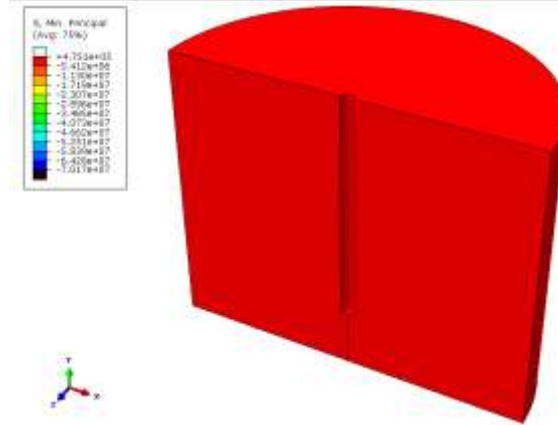


Эксперимент №7:

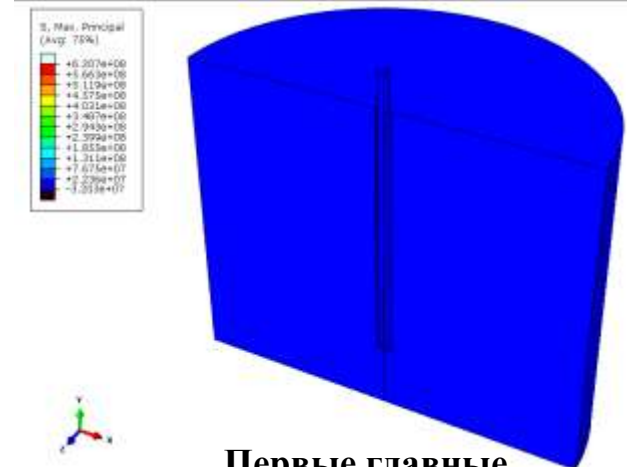
Результаты:



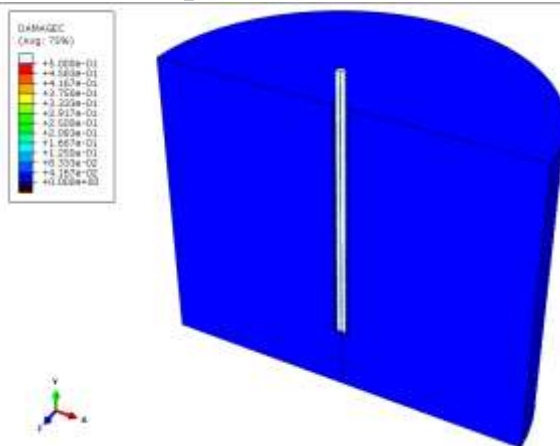
Первые главные напряжения в бетоне



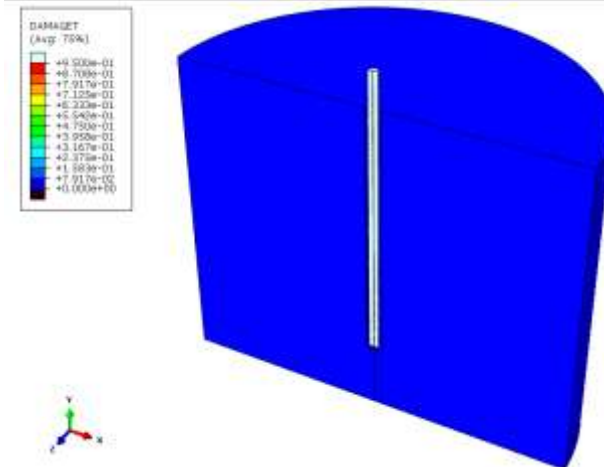
Третьи главные напряжения в бетоне



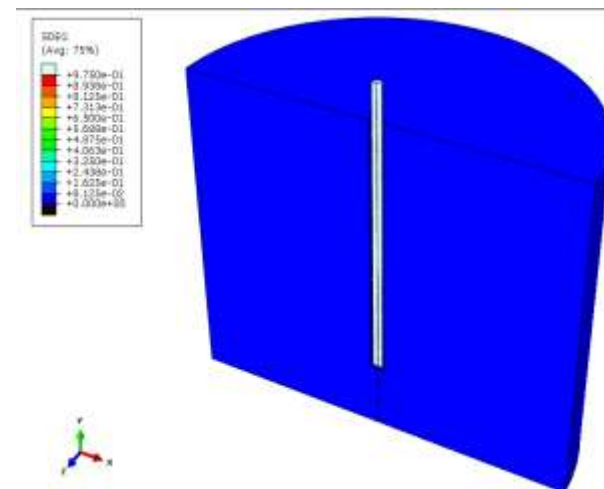
Первые главные напряжения в стержне



Распределение DAMAGEC



Распределение DAMAGET



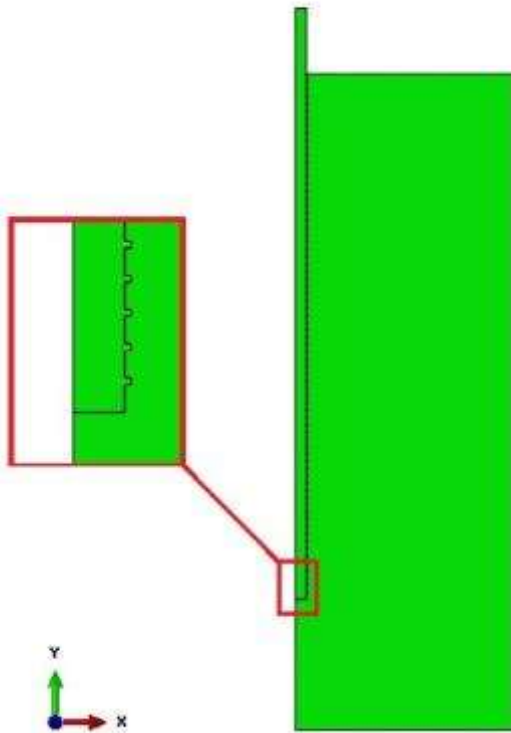
Распределение SDEG



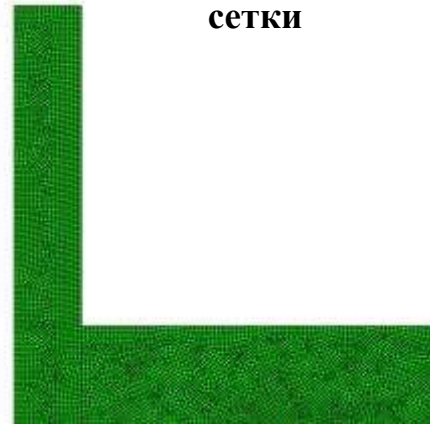
Эксперимент №8:

Вытягивание арматуры из бетона. Стержень с арматурным профилем.

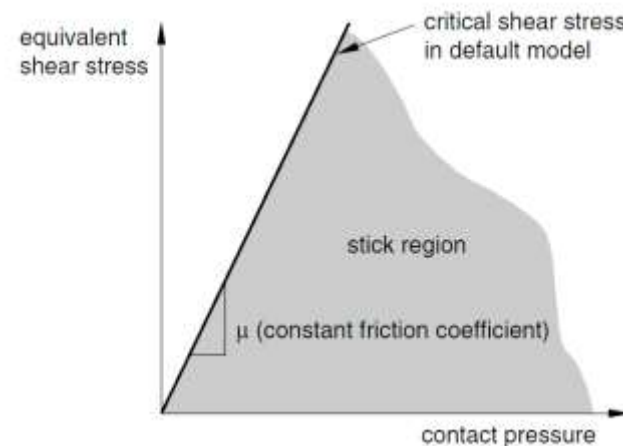
Осесимметричная постановка задачи с моделированием арматурного профиля



Фрагмент конечно-элементной сетки



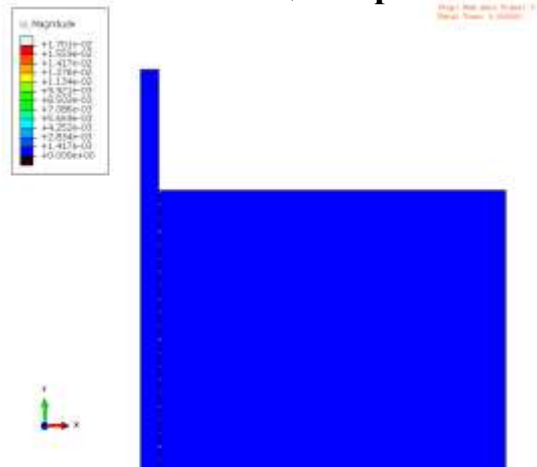
Условие начала скольжения: $\tau = \mu\sigma$



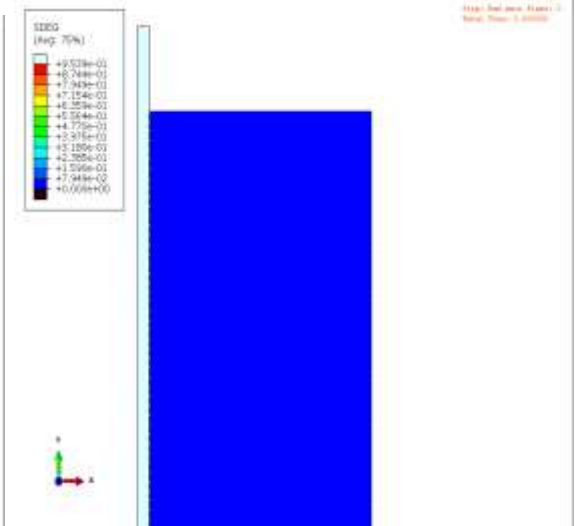
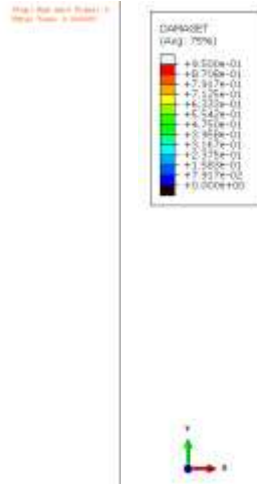
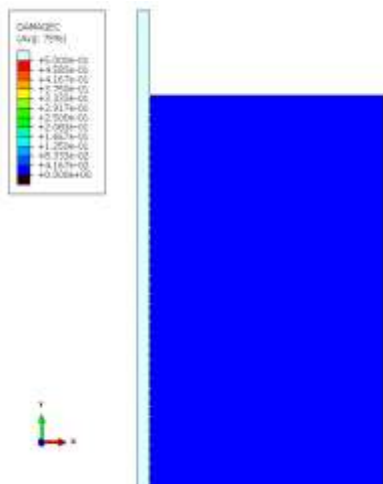
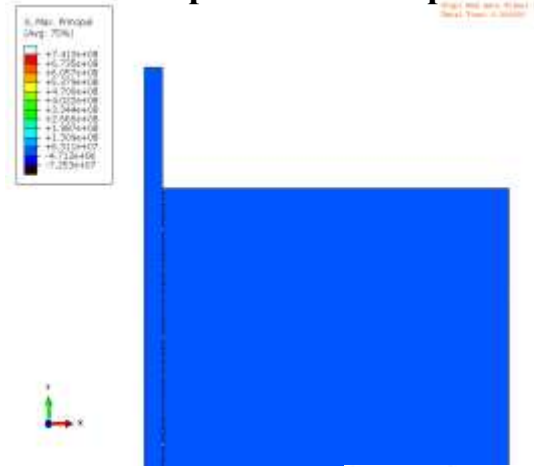


Эксперимент №8: Результаты:

Перемещение верхнего конца стержня



Первые главные напряжения в стержне



Распределение DAMAGEC

Распределение DAMAGET

Распределение SDEG



Итог:

Были проведены следующие эксперименты:

- **Двухосное монотонное нагружение бетонного цилиндра. Решение явным и неявным методами.**
- **Монотонное нагружение армированной балки.**
- **Серия Pullout тестов с различными моделями контакта арматуры и бетона.**

Планируемые исследования:

- **Улучшение поведения модели бетона при решении явными методами квази-статических задач.**
- **Улучшение модели контакта арматуры и бетона при вытягивании стержня.**
- **Постановка трехмерной задачи вытягивания арматуры из бетона.**



Спасибо за Ваше внимание!