



**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Физико-механический факультет
Кафедра «Механика и процессы управления»**

**Диссертация на соискание академической
степени магистра по направлению
553300 «Прикладная механика»**

**Конечно-элементное моделирование и анализ
поведения графитовых уплотнений в
соединительной муфте**

**Выполнил, студент группы 6055/12
Руководитель, к. т. н., профессор
Соруководитель, ассистент**

**Жмайло М.А.
Боровков А.И.
Войнов И.Б.**

**Санкт-Петербург
2012 год**



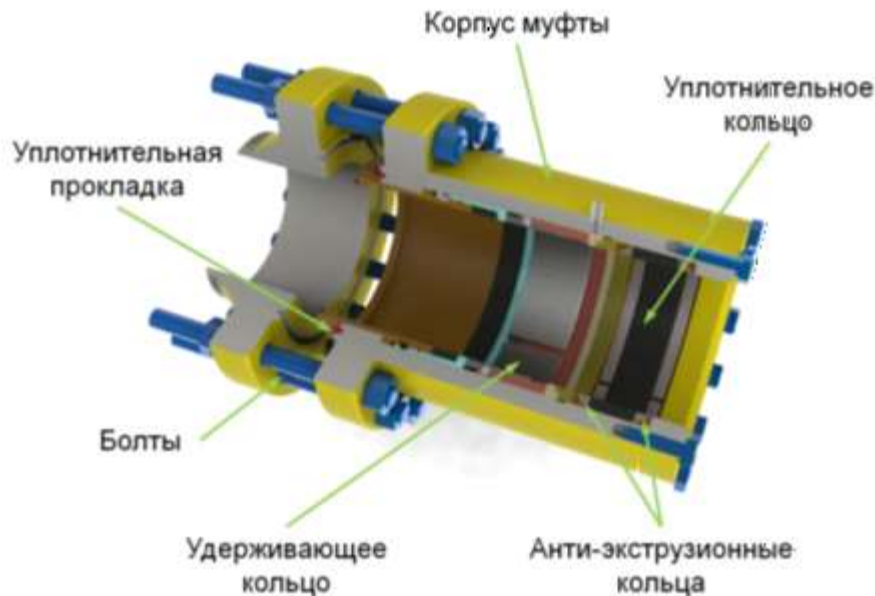
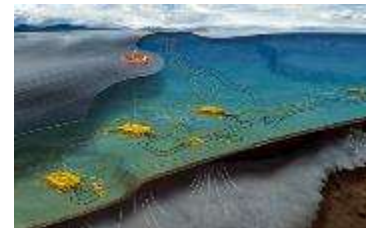
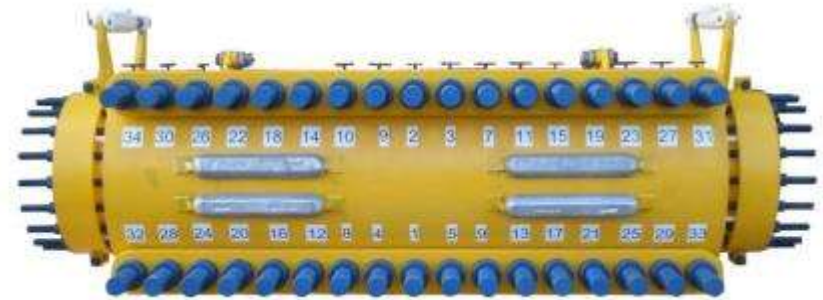
Цель и задачи работы

Цель: моделирование и исследование поведения графитовых уплотнений в бессварочной соединительной муфте.

Задачи:

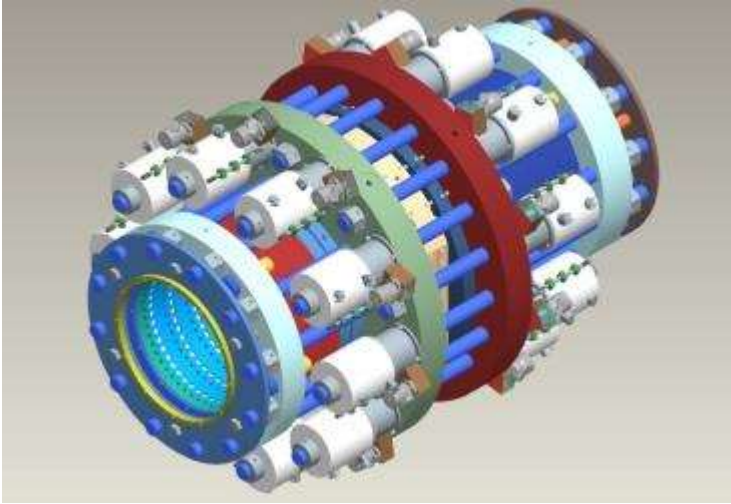
1. Характеристика особенностей соединительной муфты и их учет в модели.
2. Моделирование и анализ поведения графитовых уплотнений.
 - 2.1. Качественное описание поведения графитовых уплотнений.
 - Решение вспомогательной задачи о гидростатическом сжатии жидкости в стакане под воздействием поршня.
 - Оценка влияния параметров на качество решения задачи.
 - 2.2. Моделирование и анализ поведения графитовых уплотнений в ходе процесса герметизации соединения муфты и трубы.
 - Решение задачи о герметизации соединения бессварочной соединительной муфты с графитовым уплотнением и трубы большого диаметра.
 - Оценка влияния учета трения на результаты решения.
 - Анализ поведения графитовых уплотнений и других элементов конструкции.

Бессварочные соединительные муфты



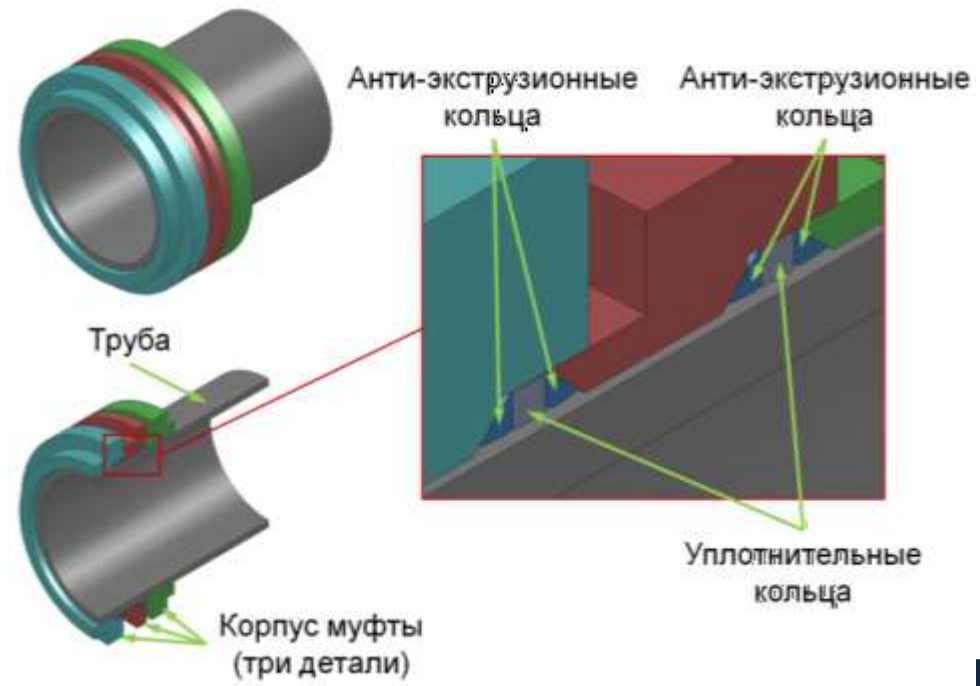
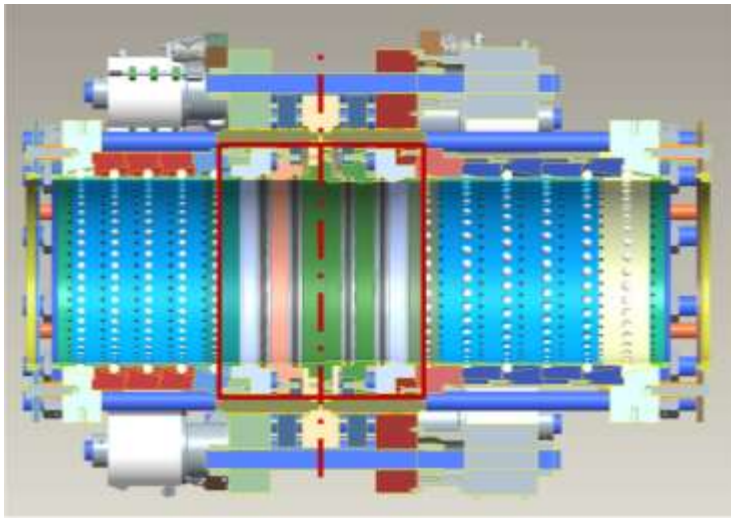
Герметизация трубопровода

Особенности соединительной муфты



Основные особенности:

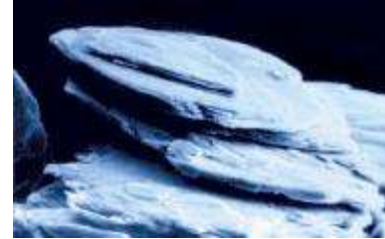
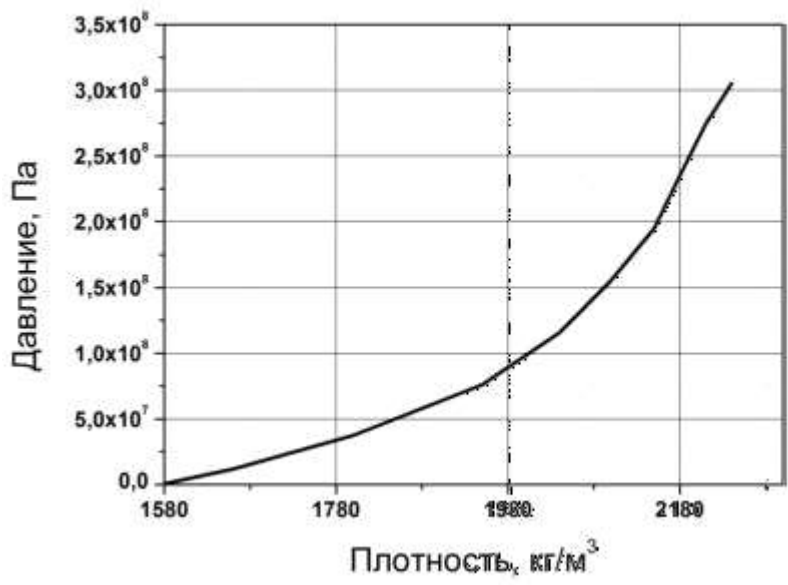
- контактное взаимодействие тел с существенно различными кривизнами поверхностей;
- значительная деформация уплотнительных колец из материала с нелинейным поведением.



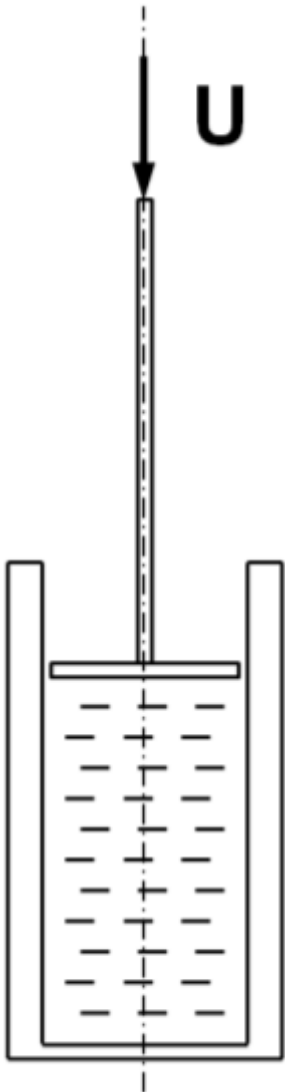
Особенности соединительной муфты

Материал уплотнительного кольца –
пенографит или **термически
расширенный графит** (exfoliated
graphite):

- гидростатическое поведение;
- нелинейная зависимость
давления от плотности.



Задача о гидростатическом сжатии жидкости



Решение задачи дает возможность:

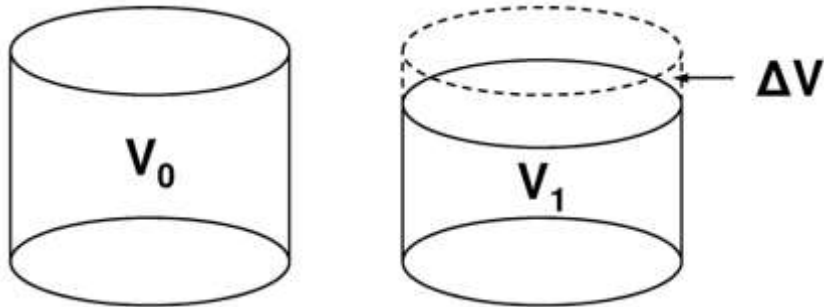
- понять, допустимо ли в задаче о муфте исключение из рассмотрения графитовых уплотнительных колец с учетом лишь их влияния на окружающие элементы конструкции;
- исследовать чувствительность решения к изменению различных параметров.

№	Поведение жидкости	Жесткость стакана и поршня
1	Линейное	Абсолютно жесткие
2	Линейное	Податливые
3	Нелинейное	Податливые

Варианты получения решения:

- аналитическое решение;
- численное решение в ANSYS (элементы HSFLD241);
- численное решение в ANSYS (APDL-код).

Задача о гидростатическом сжатии жидкости

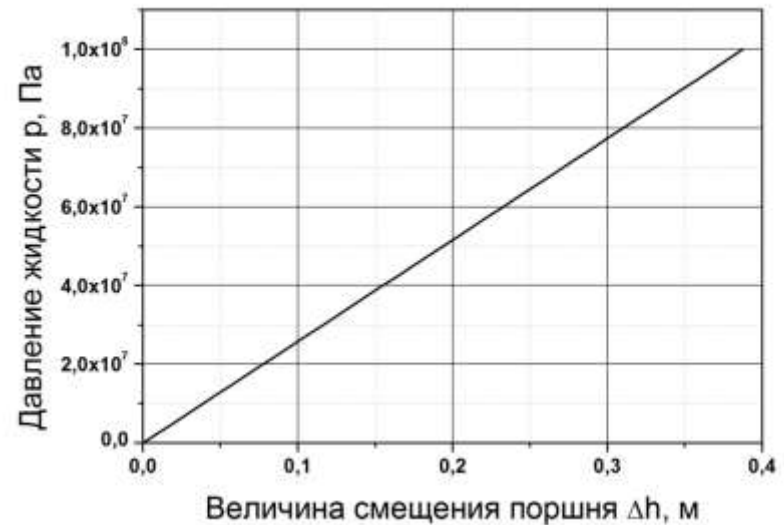
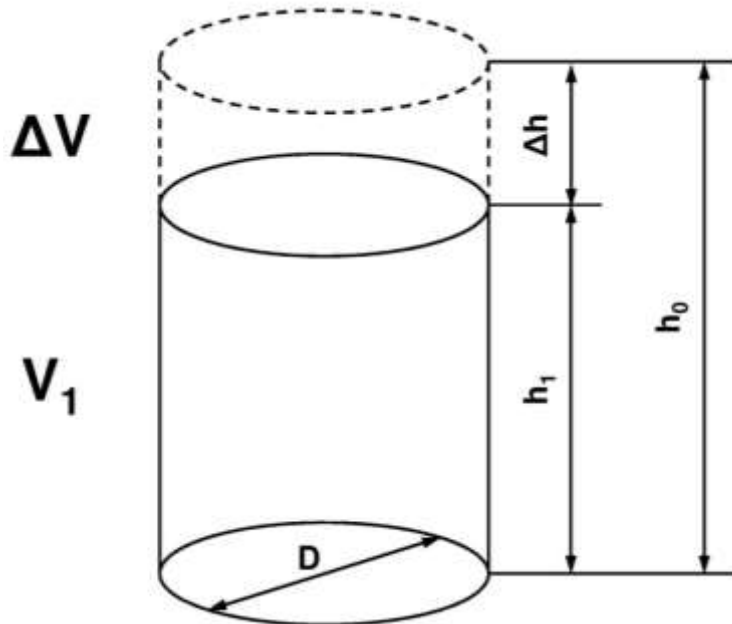


$$p = K\theta = K \frac{V_1 - V_0}{V_0} \quad (1)$$

$$|p| = \left| K \frac{V_1 - V_0}{V_0} \right| = \left| K \frac{\pi D^2 h_1 - \pi D^2 h_0}{\pi D^2 h_0} \right| = \quad (2)$$

$$= \left| K \frac{\pi D^2 (h_1 - h_0)}{\pi D^2 h_0} \right| = \left| K \frac{h_1 - h_0}{h_0} \right| = K \frac{\Delta h}{h_0}$$

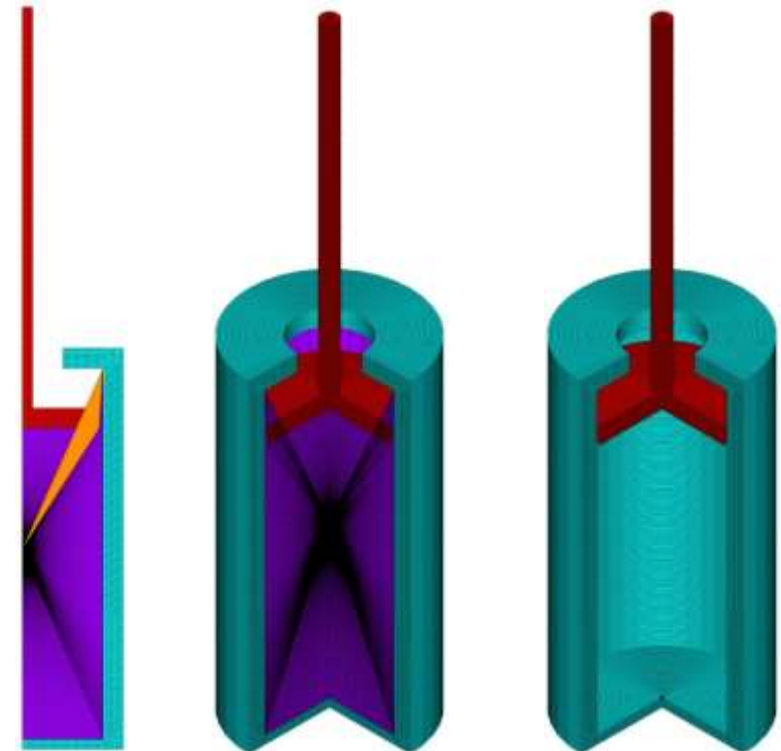
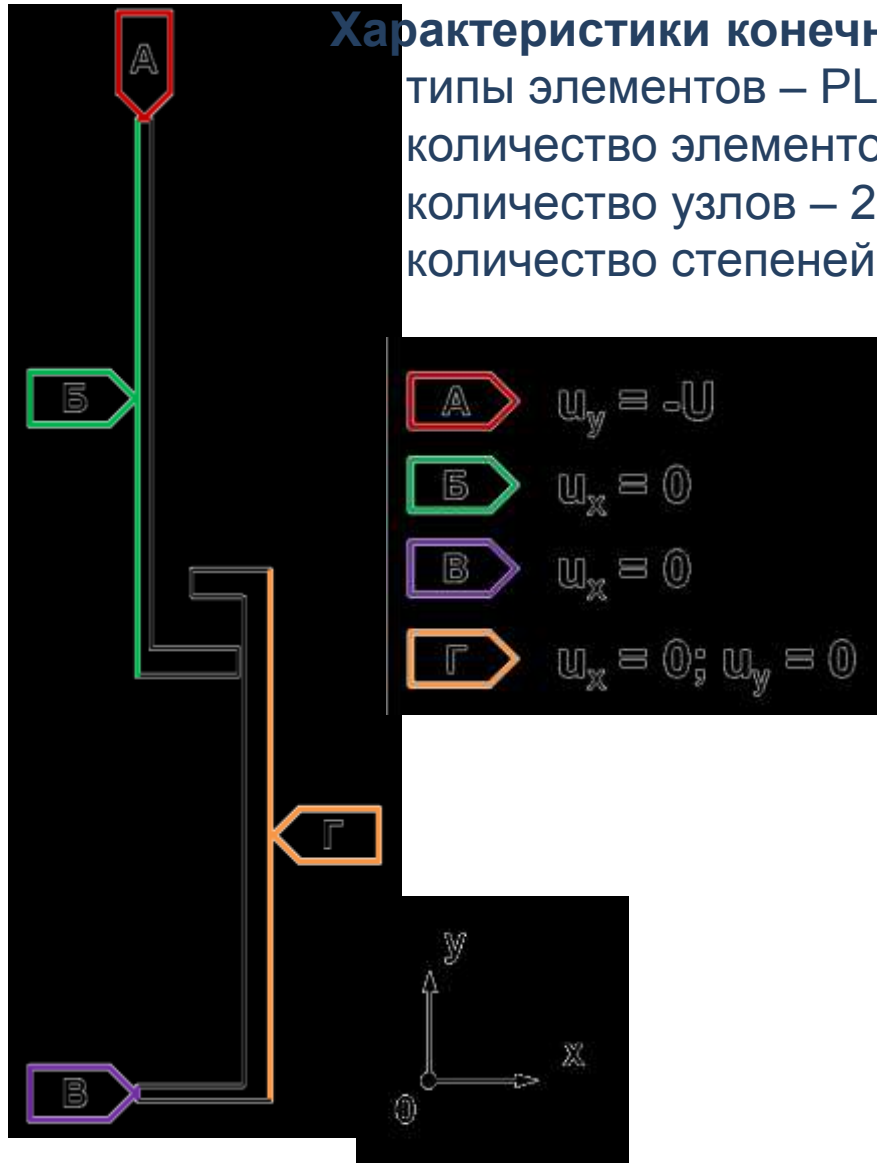
$$K_{\text{ж}} = 2 \cdot 10^8 \text{ (Па)} \quad (3)$$



Задача о гидростатическом сжатии жидкости

Характеристики конечно-элементной модели:

- типы элементов – PLANE182 и HSFLD241 (линейные);
- количество элементов – 2 762;
- количество узлов – 2 964;
- количество степеней свободы – 5 928.



Задача о гидростатическом сжатии жидкости

Специальный программный код на языке ANSYS Parametric Design Language (APDL).

Позволяет выполнять решение без непосредственного моделирования объекта с гидростатическим поведением, учитывая лишь его влияние на окружающие элементы конструкции.

$$p = K\theta = K \frac{V_1 - V_0}{V_0} \quad (4)$$

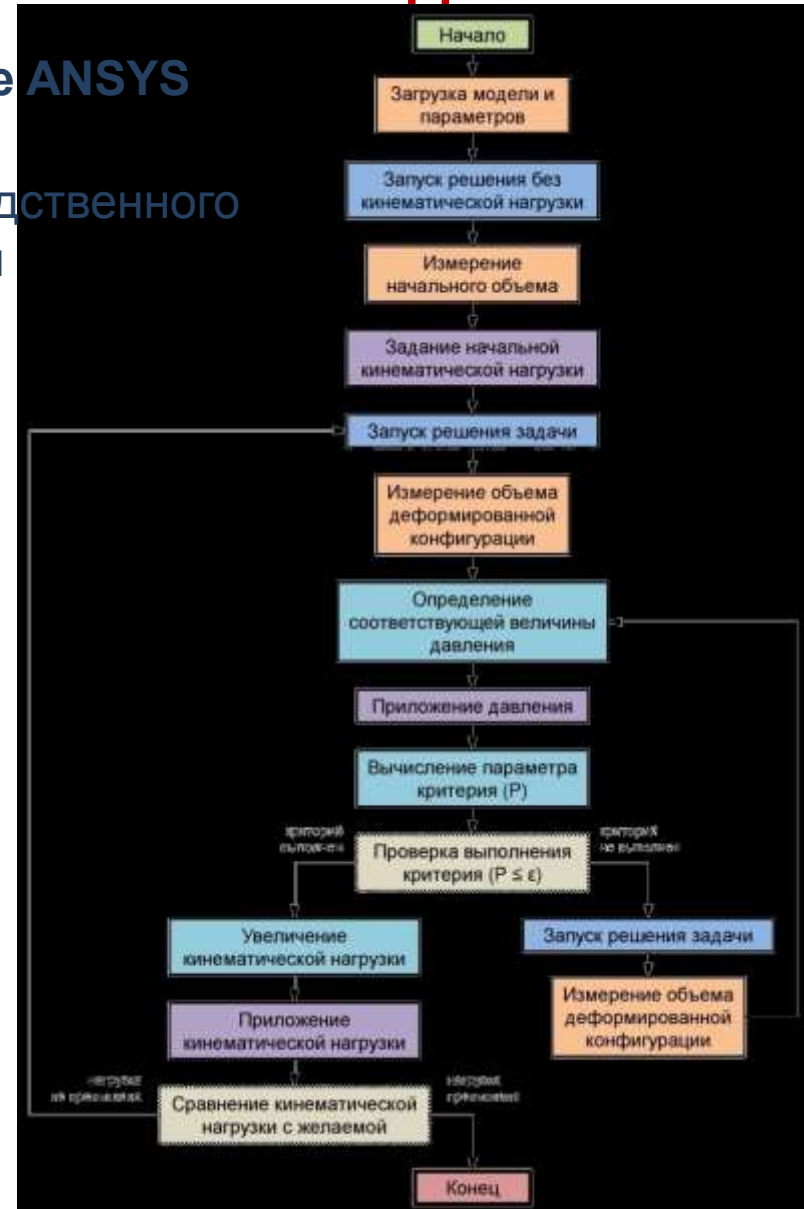
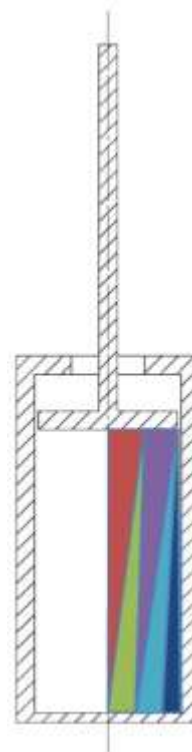
Вторая теорема Паппа-Гюльдена:

$$V = L_{ц.м.} S_{сеч.} = 2\pi R_{ц.м.} S_{сеч.} \quad (5)$$

Параметр критерия:

$$P = \left| \frac{V_n - V_{n-1}}{V_n} \right| \quad (6)$$

$$P \leq \varepsilon \quad (7)$$



Задача о гидростатическом сжатии жидкости

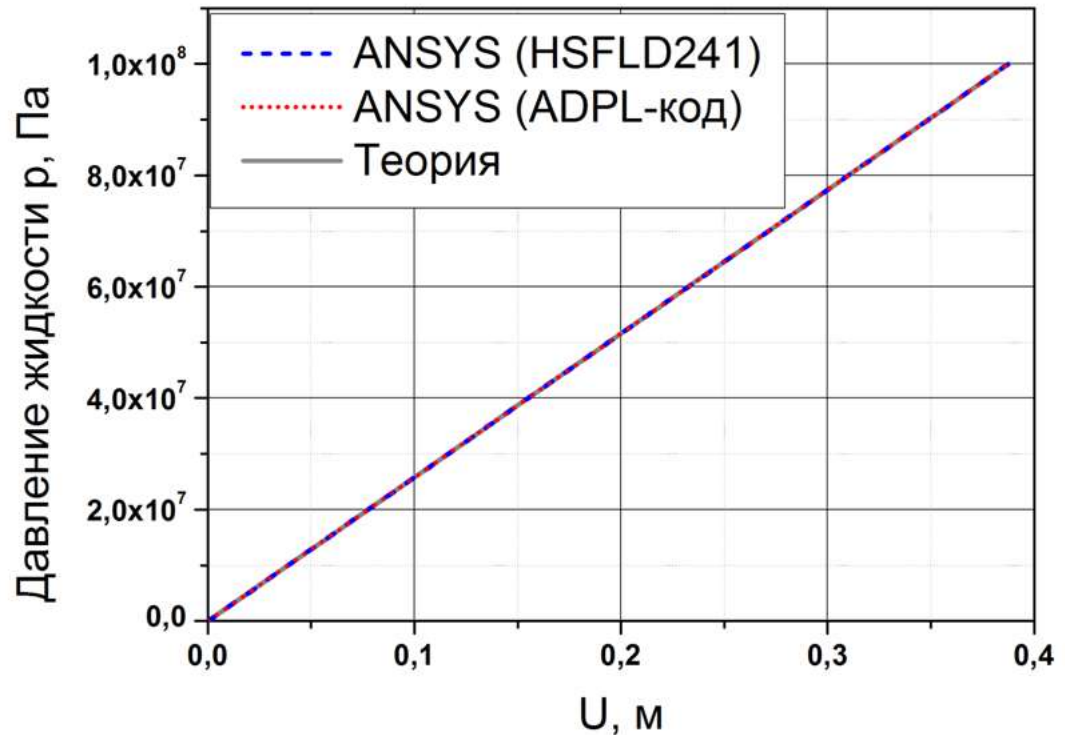
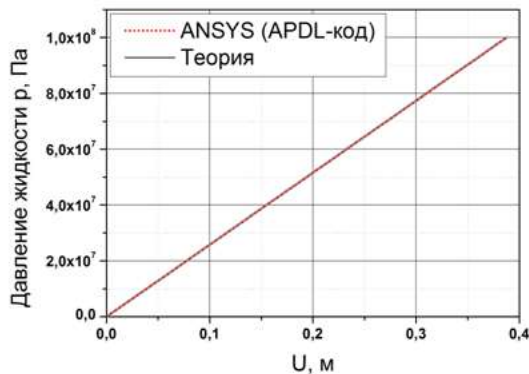
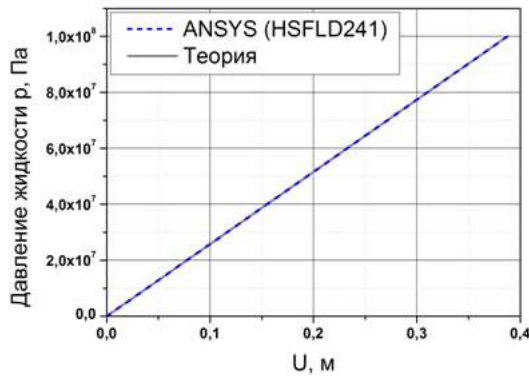
Затраты расчетного времени:

решение в ANSYS (HSFLD241) – 2 секунды;

решение в ANSYS (APDL-код) – 150 секунд.

Настройки APDL-кода: количество шагов – 40, погрешность – 0,01.

Модуль объемного сжатия жидкости: $K = 2 \cdot 10^8$ Па.

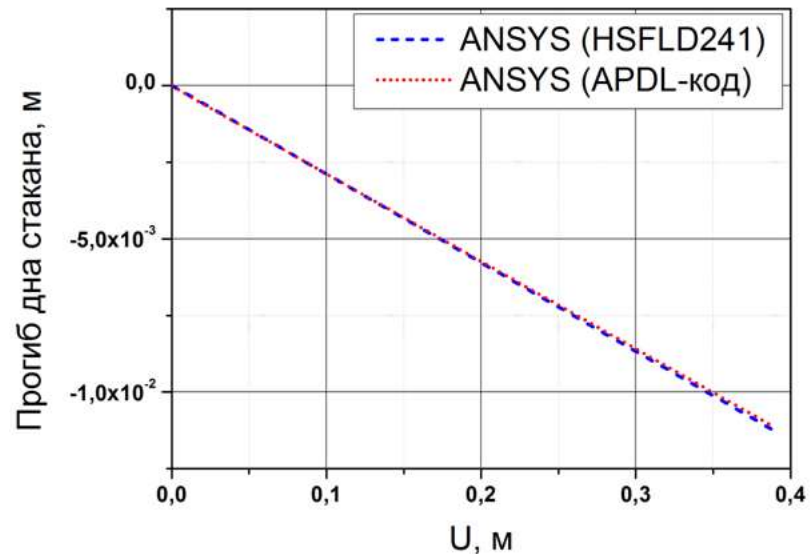
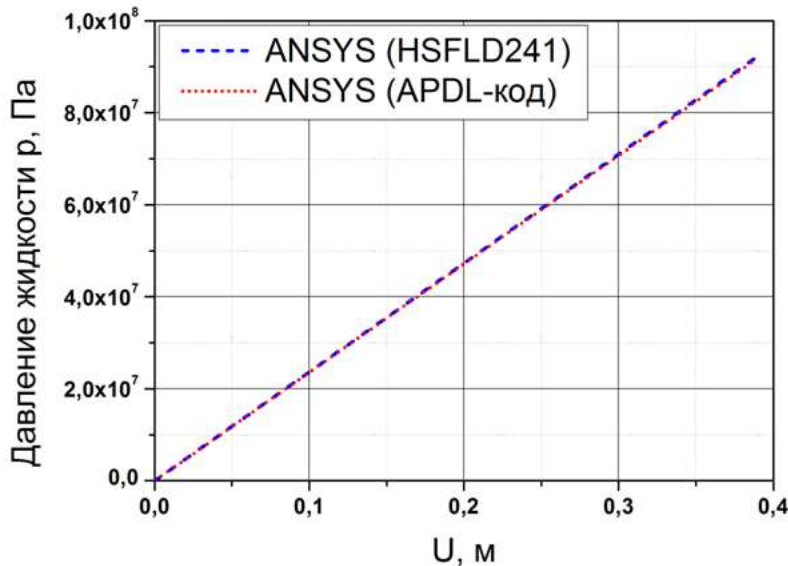
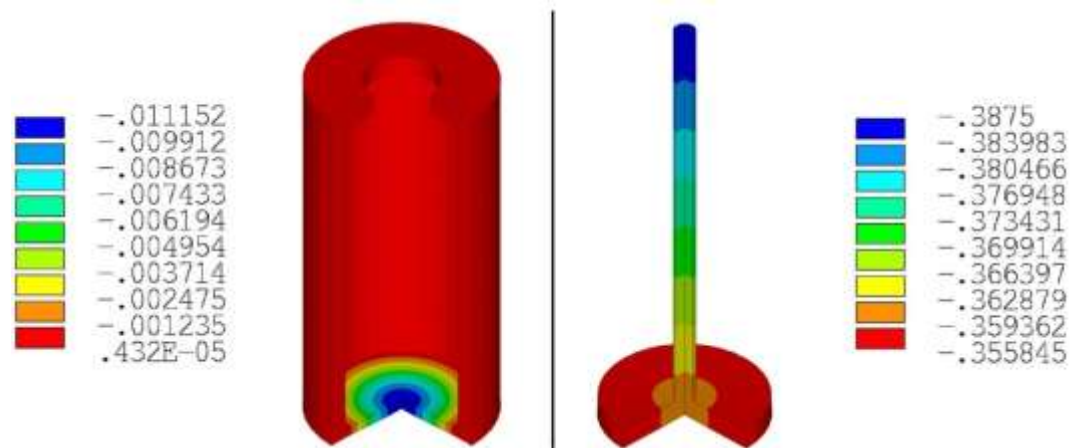


Задача о гидростатическом сжатии жидкости

Механические свойства стакана и поршня:

материал – сталь;
 $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$;
 $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$;
 $\nu = 0,3$.

Контролируется прогиб в точке
 дна, лежащей на его внешней
 стороне на оси цилиндрической
 поверхности стакана.



Задача о гидростатическом сжатии жидкости

Параметры алгоритма:

- количество шагов приложения кинематической нагрузки;
- допустимая погрешность вычисления объема жидкости (ϵ).

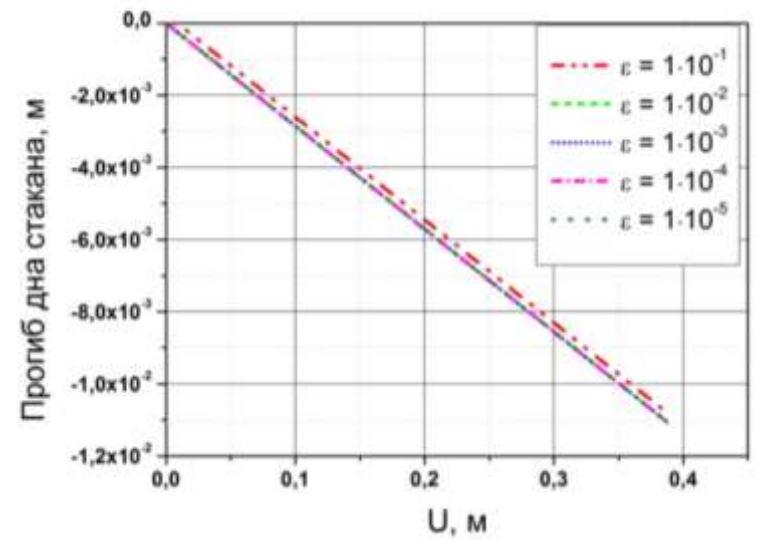
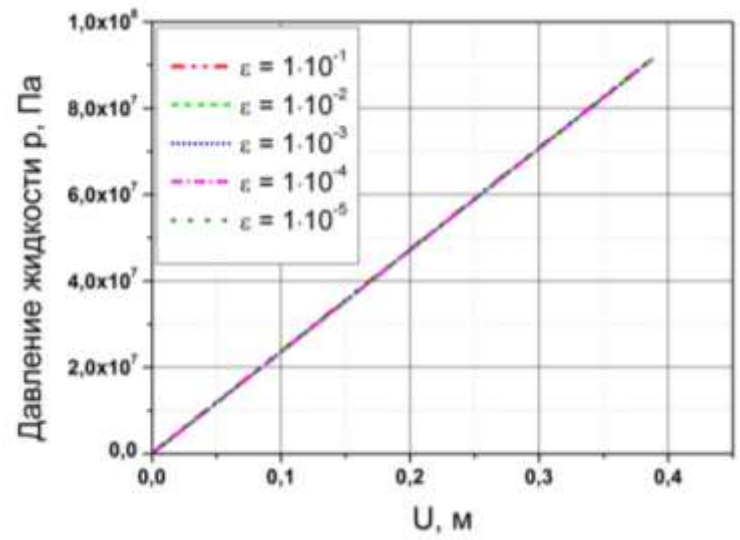
Цель: выяснить, каким образом меняется решение задачи о сжатии жидкости при варьировании каждого из параметров алгоритма. При варьировании одного параметра второй элиминирован.

Решено несколько серий задач.

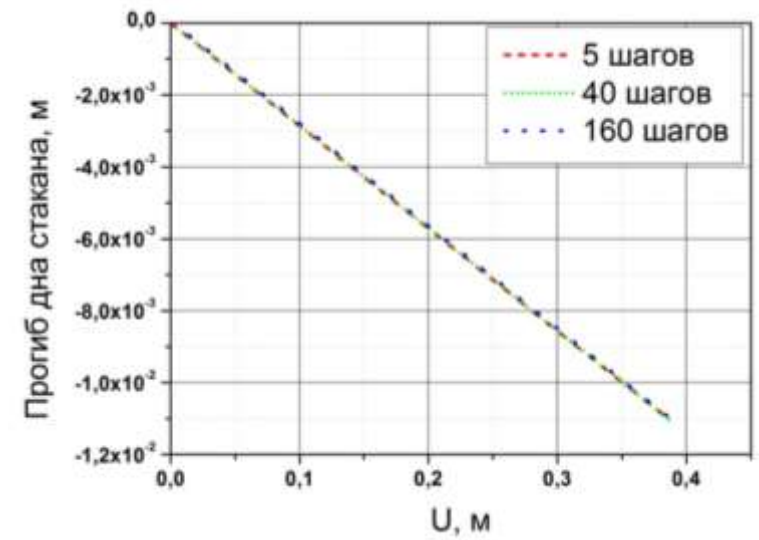
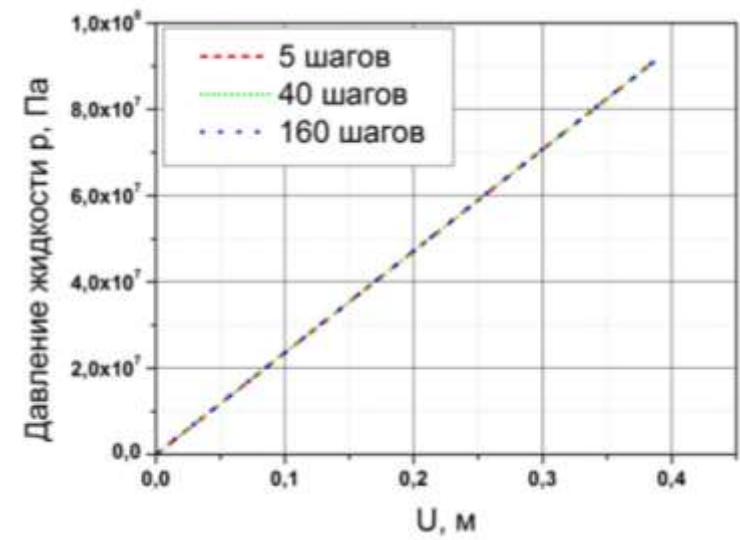
Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4
$N_{\text{шагов}} = \text{const}$	$N_{\text{шагов}} = \text{var}$	$N_{\text{шагов}} = \text{const}$	$N_{\text{шагов}} = \text{var}$
$\epsilon = \text{var}$	$\epsilon = \text{const}$	$\epsilon = \text{var}$	$\epsilon = \text{const}$
Жидкость с линейными свойствами		Жидкость с нелинейными свойствами	
$\epsilon = 1 \cdot 10^{-1}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-2}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-4}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-5}$	$N_{\text{шагов}} = 5$ $N_{\text{шагов}} = 40$ $N_{\text{шагов}} = 160$	$\epsilon = 1 \cdot 10^{-1}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-2}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-4}$ $\epsilon = 1 \cdot 10^{-5}$	$N_{\text{шагов}} = 10$ $N_{\text{шагов}} = 20$ $N_{\text{шагов}} = 40$ $N_{\text{шагов}} = 80$ $N_{\text{шагов}} = 160$

Оценка влияния параметров алгоритма

Серия 1

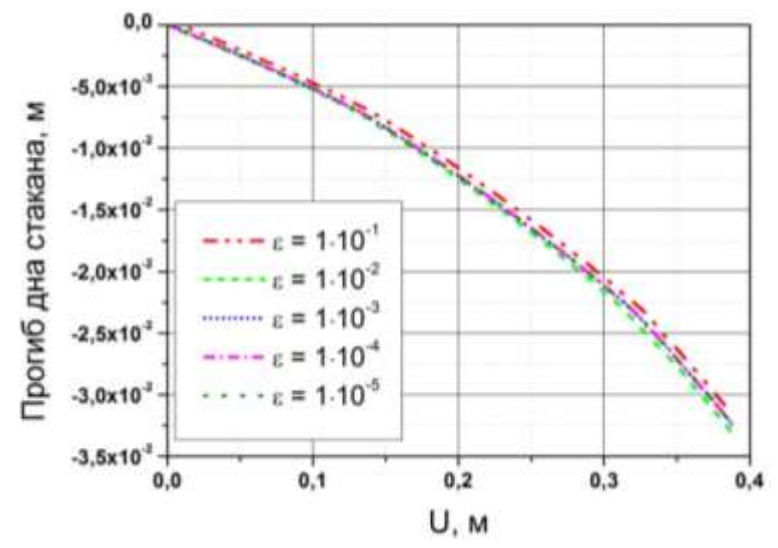
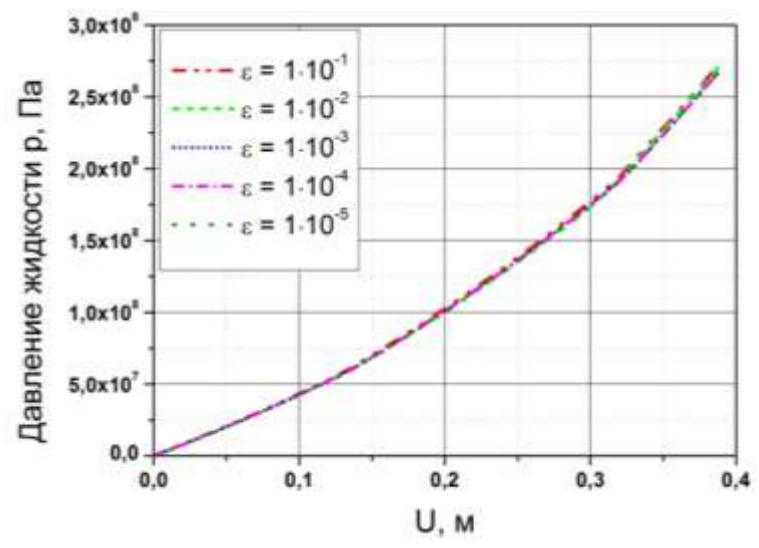


Серия 2

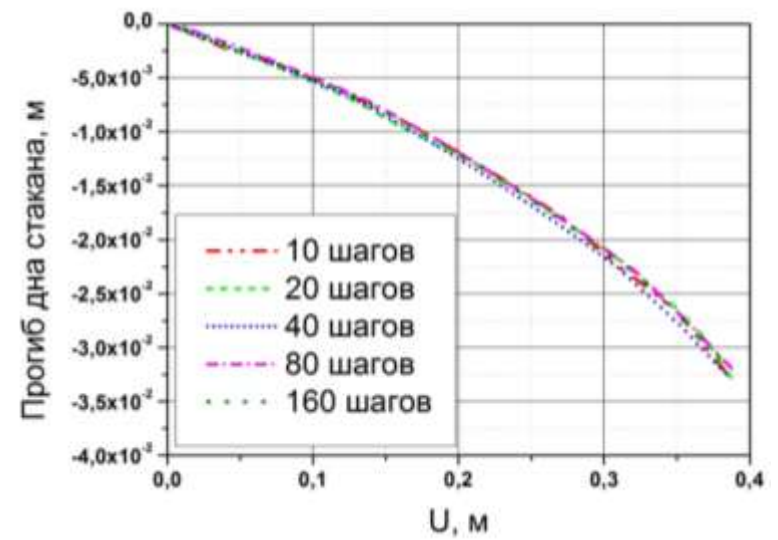
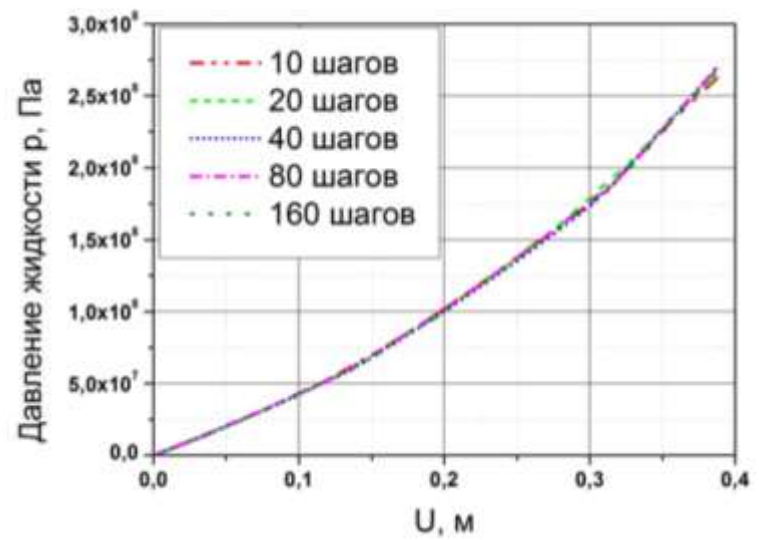


Оценка влияния параметров алгоритма

Серия 3

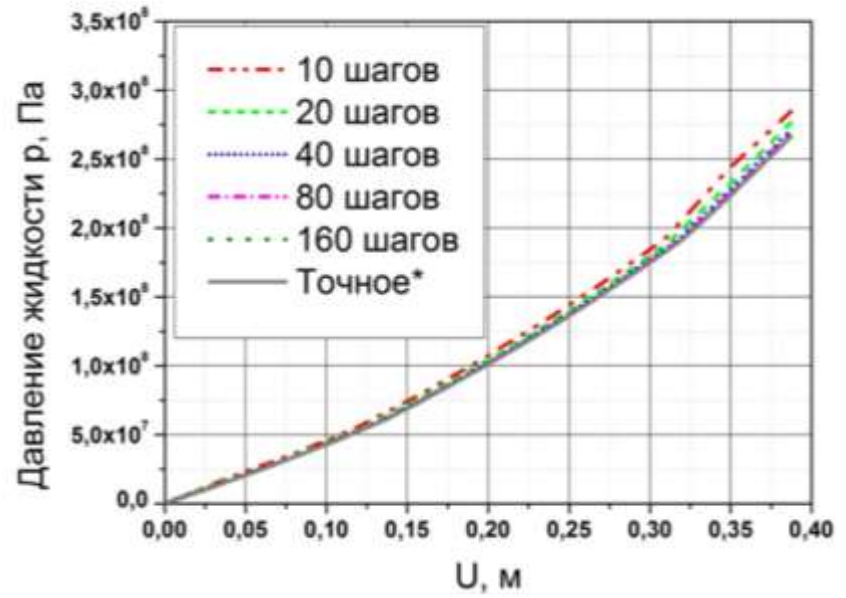
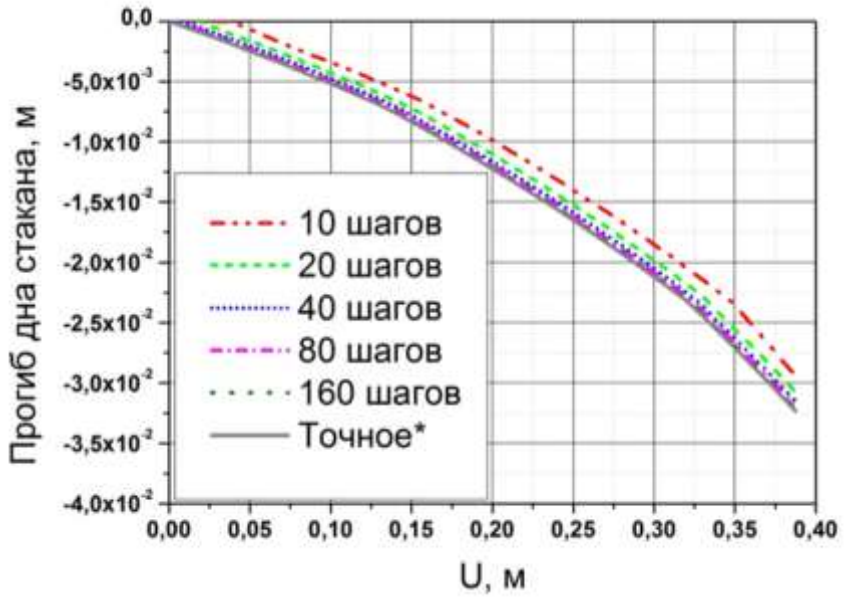


Серия 4



Оценка влияния параметров алгоритма

С целью возможного упрощения решения вопроса о выборе настроек алгоритма была проведена еще одна серия численных экспериментов. Задачи о сжатии жидкости в стакане были решены с применением программного кода, из которого исключен итерационный процесс, при различных величинах шага по кинематической нагрузке.

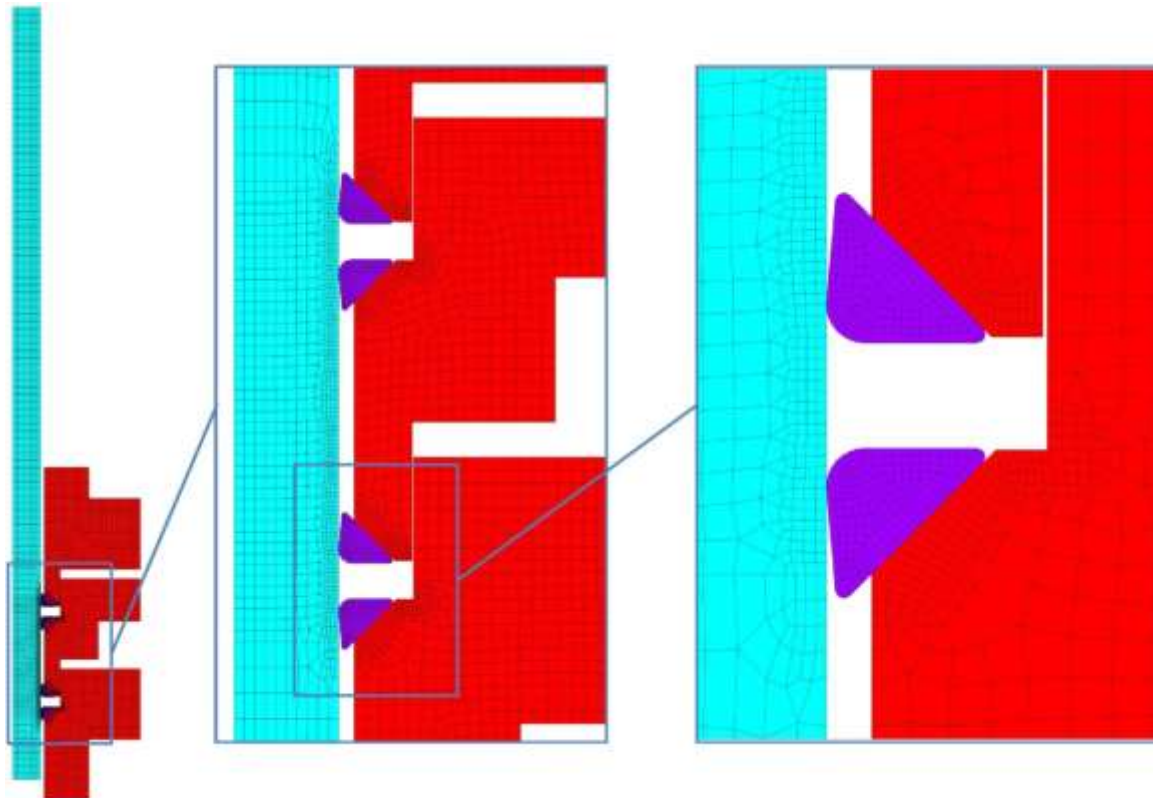


Применение APDL-кода без итерационного процесса при меньшей длительности решения не снижает качество получаемых результатов. Количество параметров алгоритма можно сократить до одного – величины шага по кинематической нагрузке.

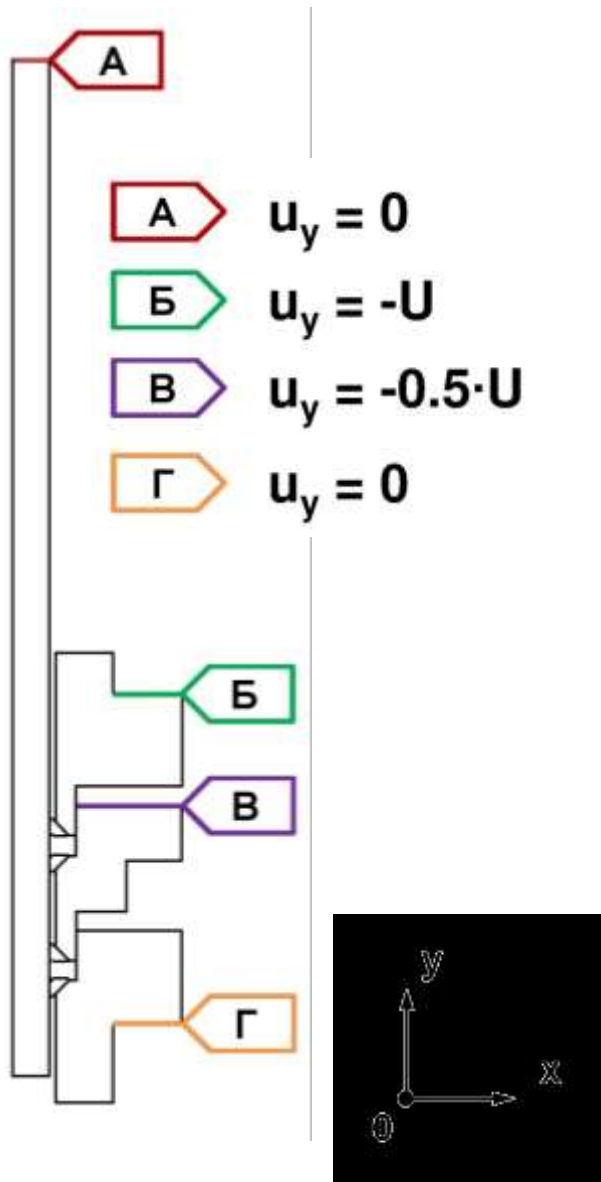
Моделирование соединительной муфты

Характеристики конечно-элементной модели:

- тип элементов – PLANE183 (квадратичный);
- количество элементов – 5 568;
- количество узлов – 16 620;
- количество степеней свободы – 33 240.

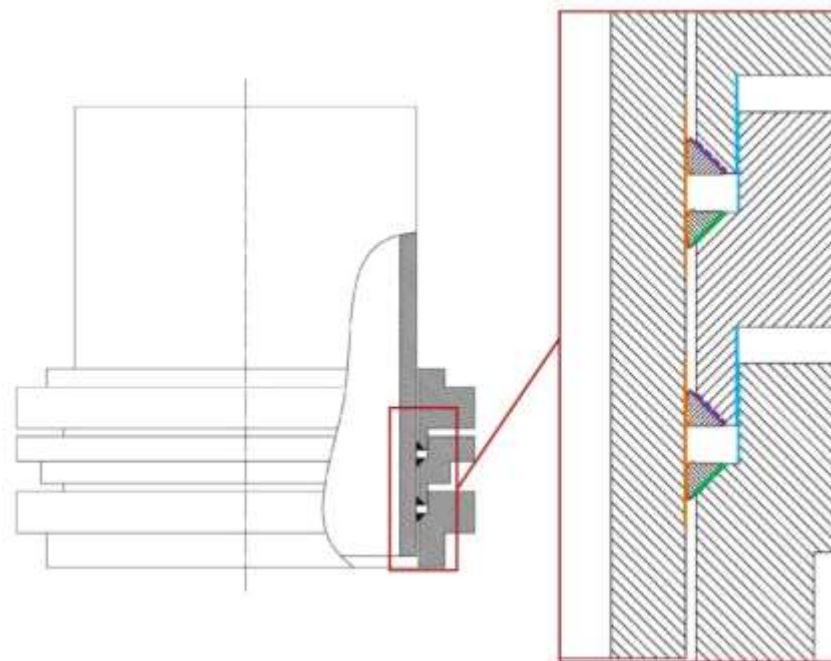


Моделирование соединительной муфты



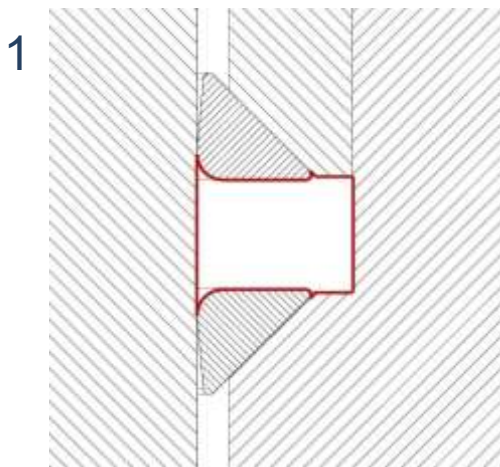
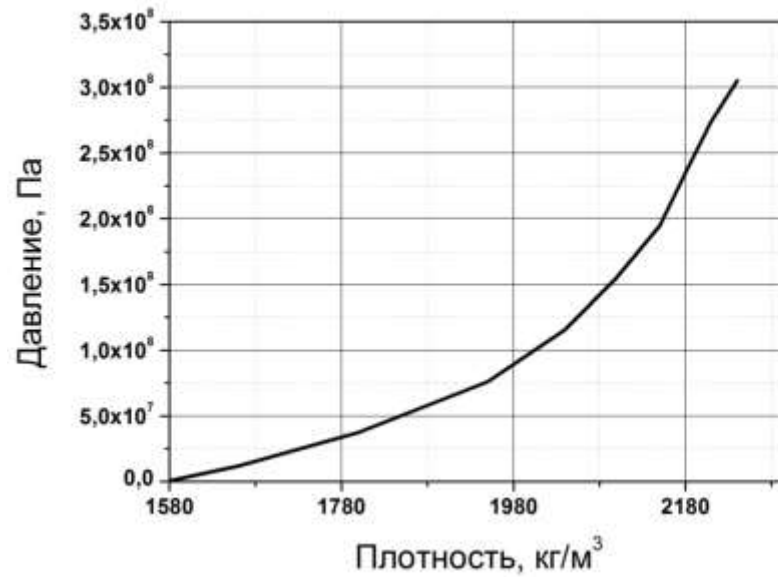
Название детали	Модель материала
АЭК	упругий
Корпус	упругий
Труба	упругопластический

Контактные пары

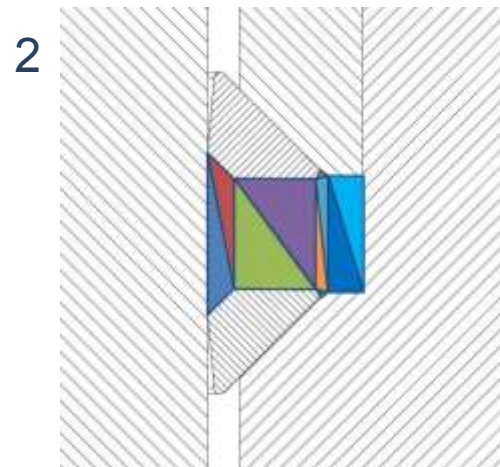


Коэффициент трения $\mu = 0,2$

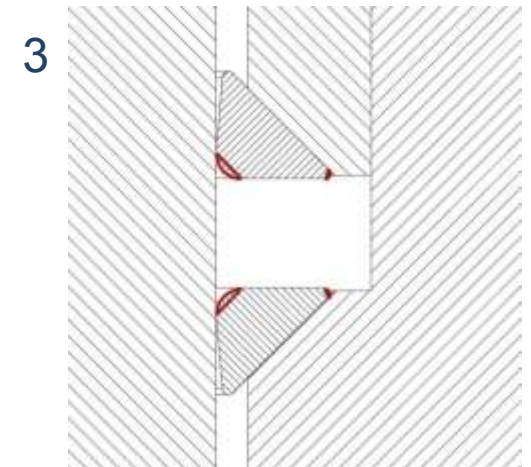
Моделирование соединительной муфты



Пространство, занимаемое графитом



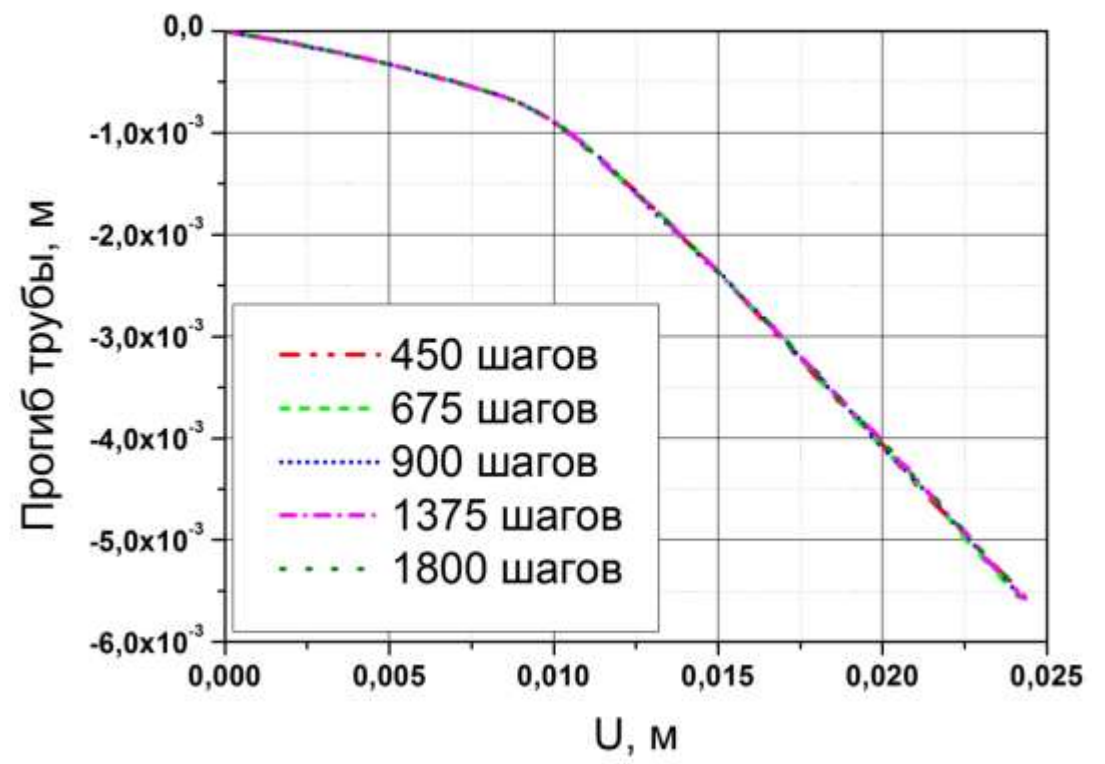
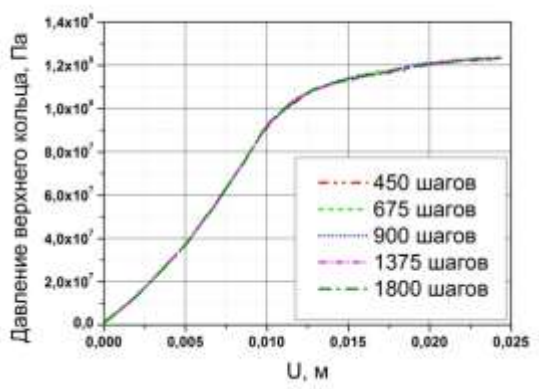
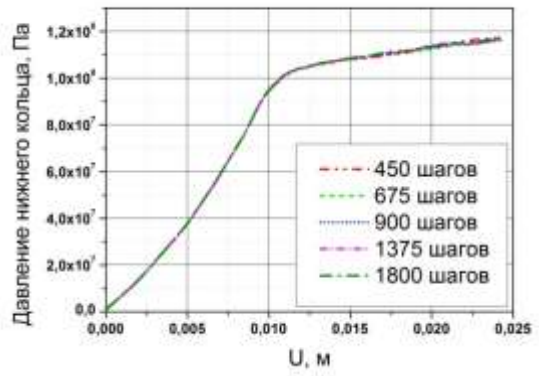
Разбиение сечения



Сегменты-пересечения

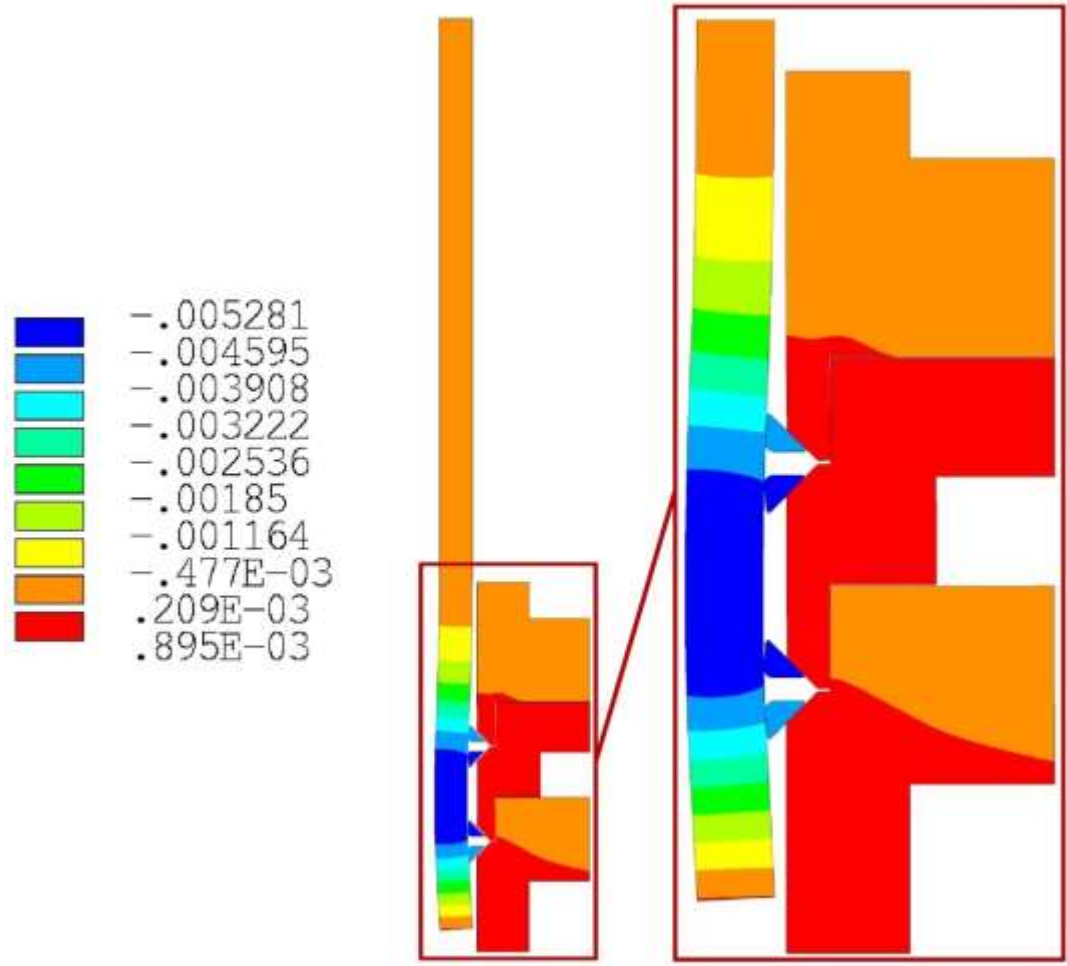
Задача о герметизации соединения

Была решена серия задач с различными настройками алгоритма – приложение кинематической нагрузки было разделено на 450, 675, 900, 1375 и 1800 шагов.

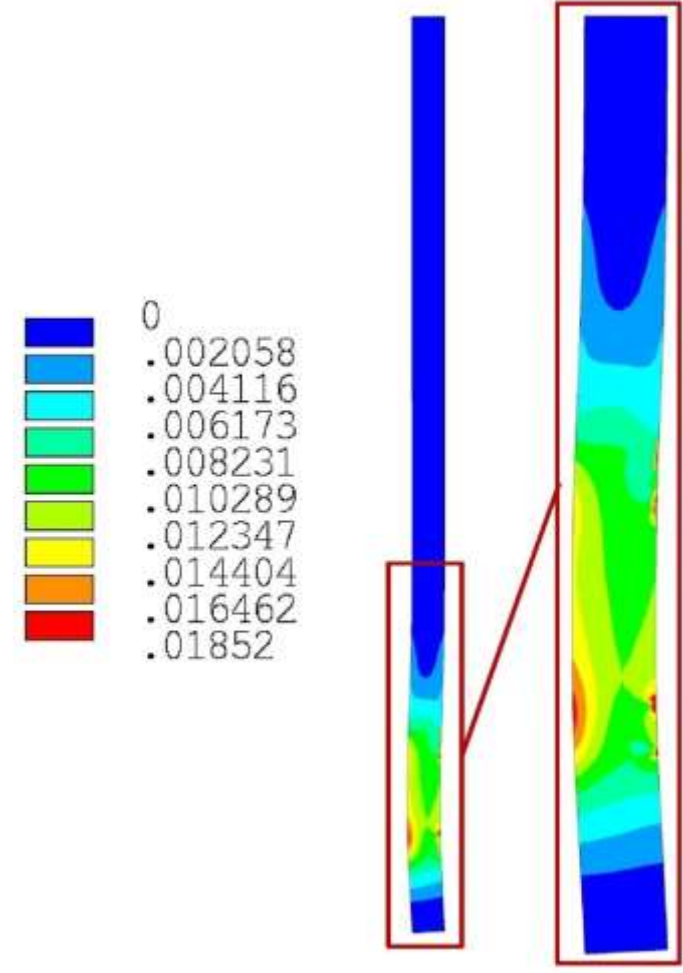


Задача о герметизации соединения

Радиальные перемещения, м



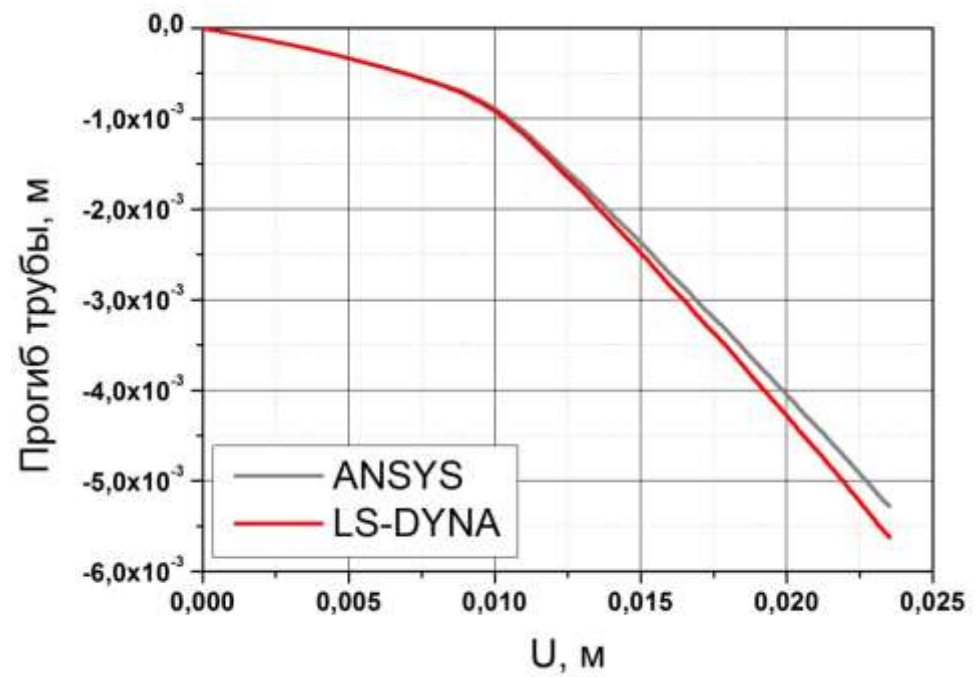
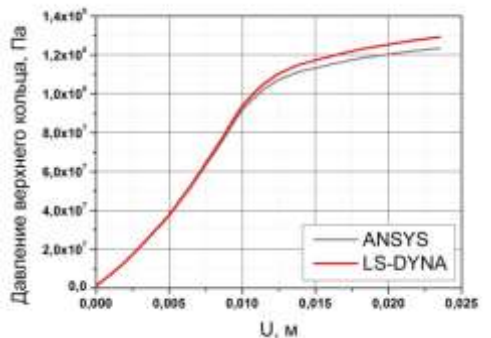
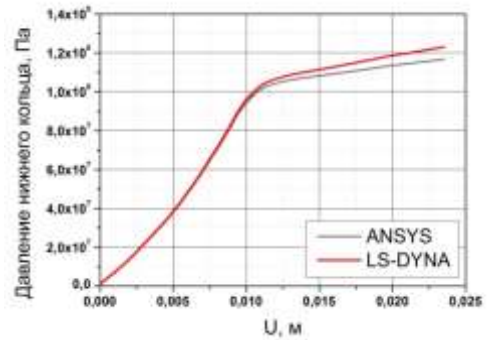
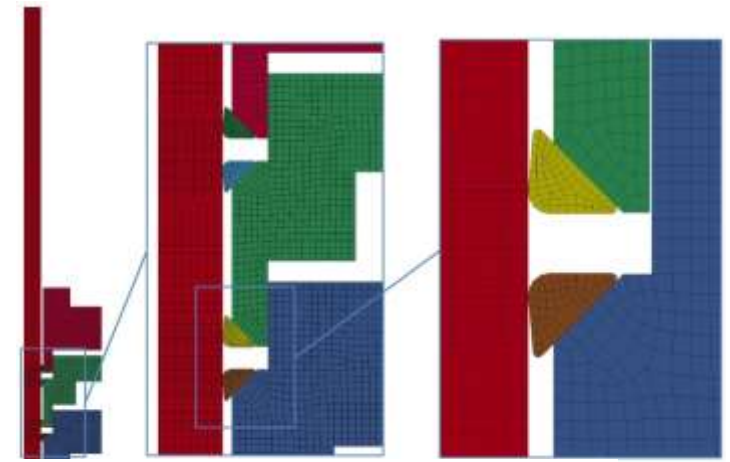
Эквивалентные по Мизесу пластические деформации



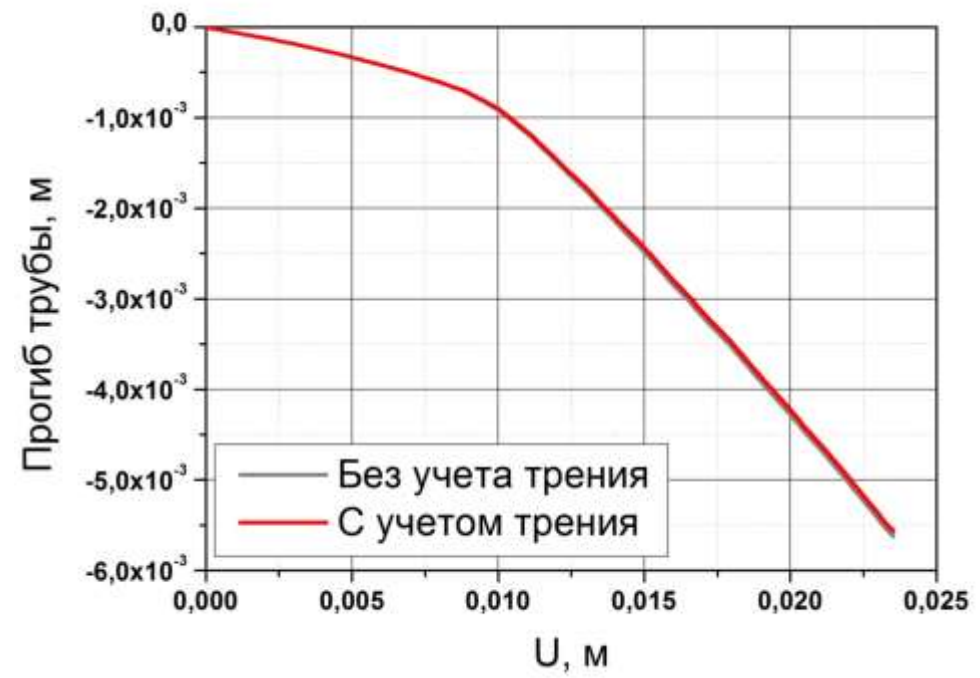
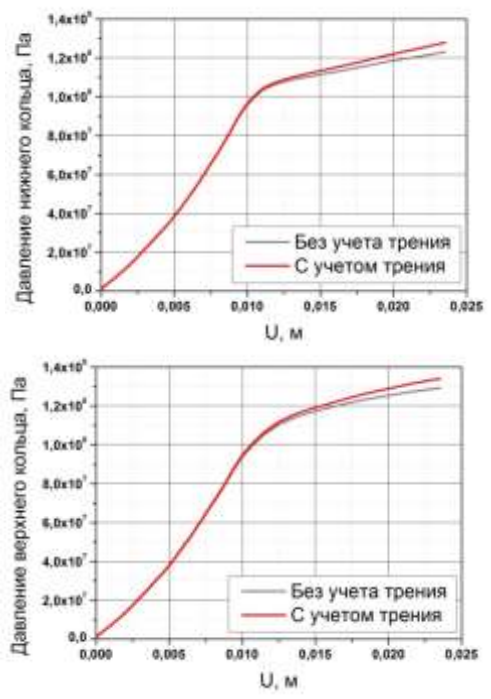
Сравнение решений ANSYS и LS-DYNA

Характеристики конечно-элементной модели:

- тип элементов – линейный;
- количество элементов – 4 753;
- количество узлов – 10 942;
- количество степеней свободы – 21 884.



Оценка влияния учета трения

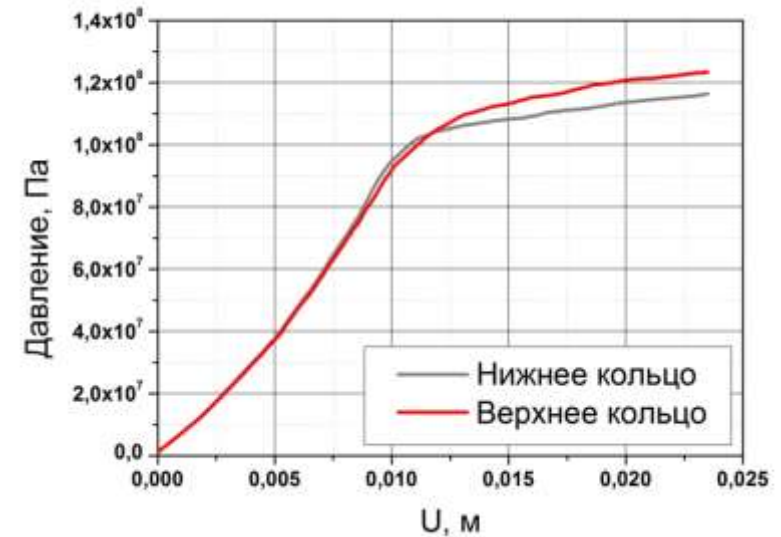
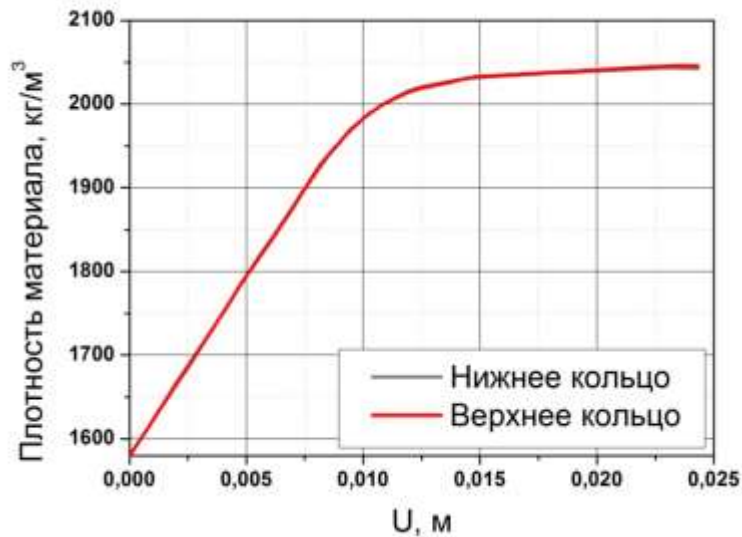
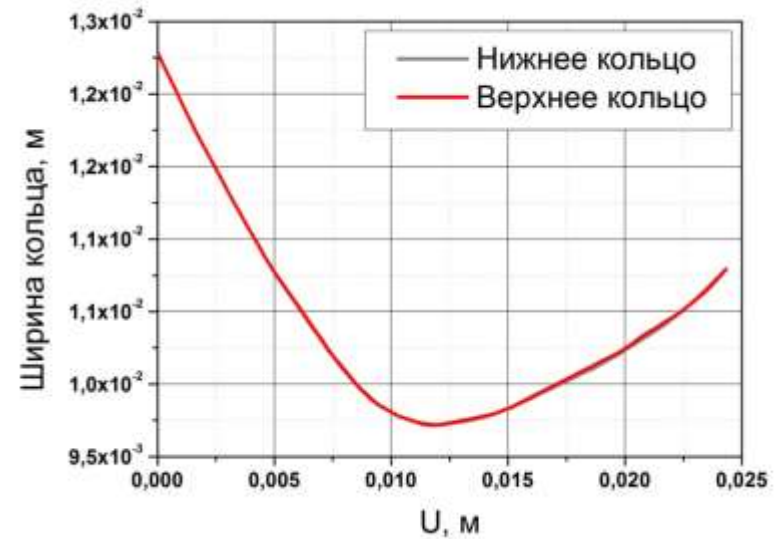
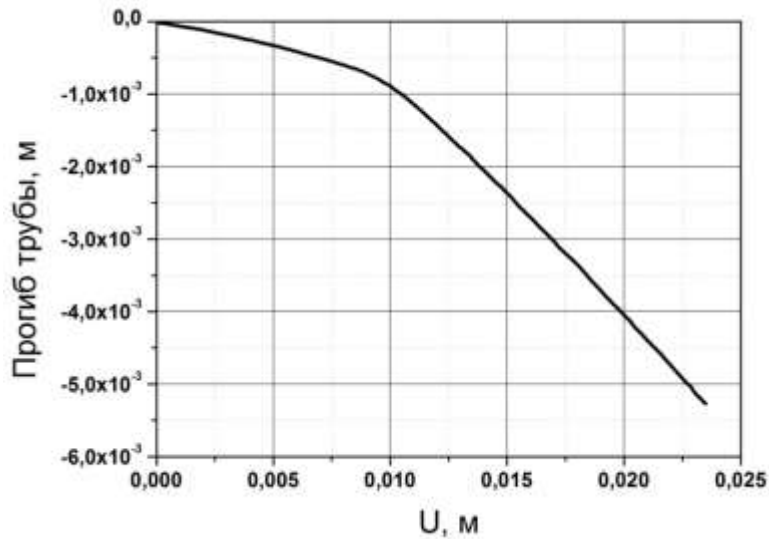


Проведение прочностных расчетов муфты без учета трения между деталями приводит к получению решения, незначительно отличающегося от решения для случая с учетом трения.

Наиболее заметным является отличие в давлениях графитовых колец на окружающие детали. Величины прогибов достаточно близки.

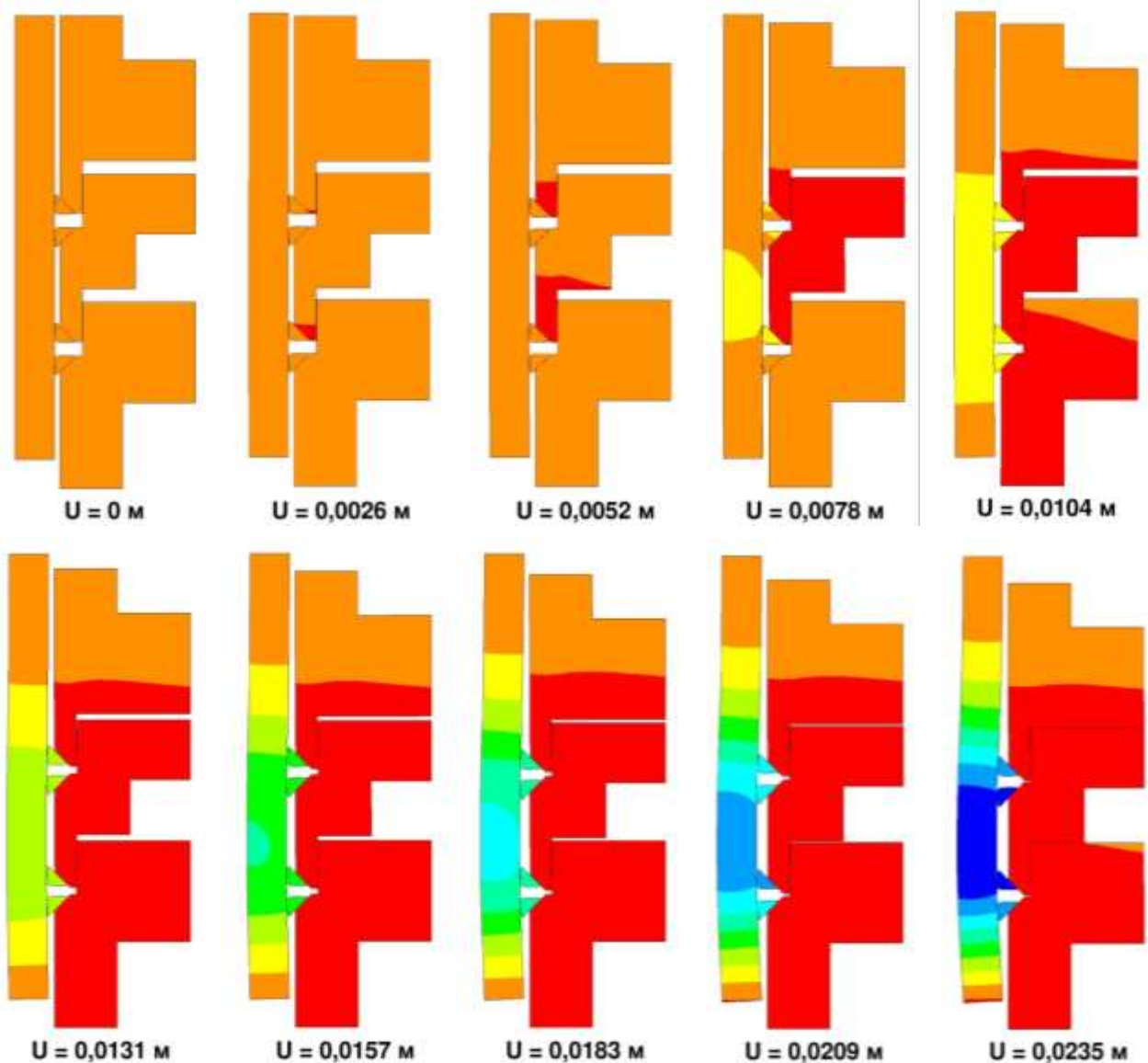
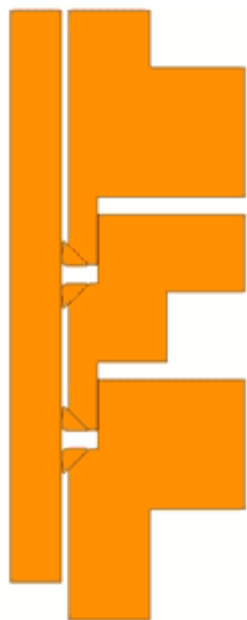
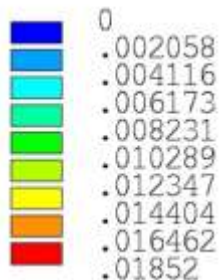
Учитывая отсутствие возможности выполнения решения полноценной задачи с учетом трения в ANSYS, решение, полученное в ANSYS без учета трения, вполне удовлетворяет имеющимся требованиям.

Анализ поведения графитовых уплотнений



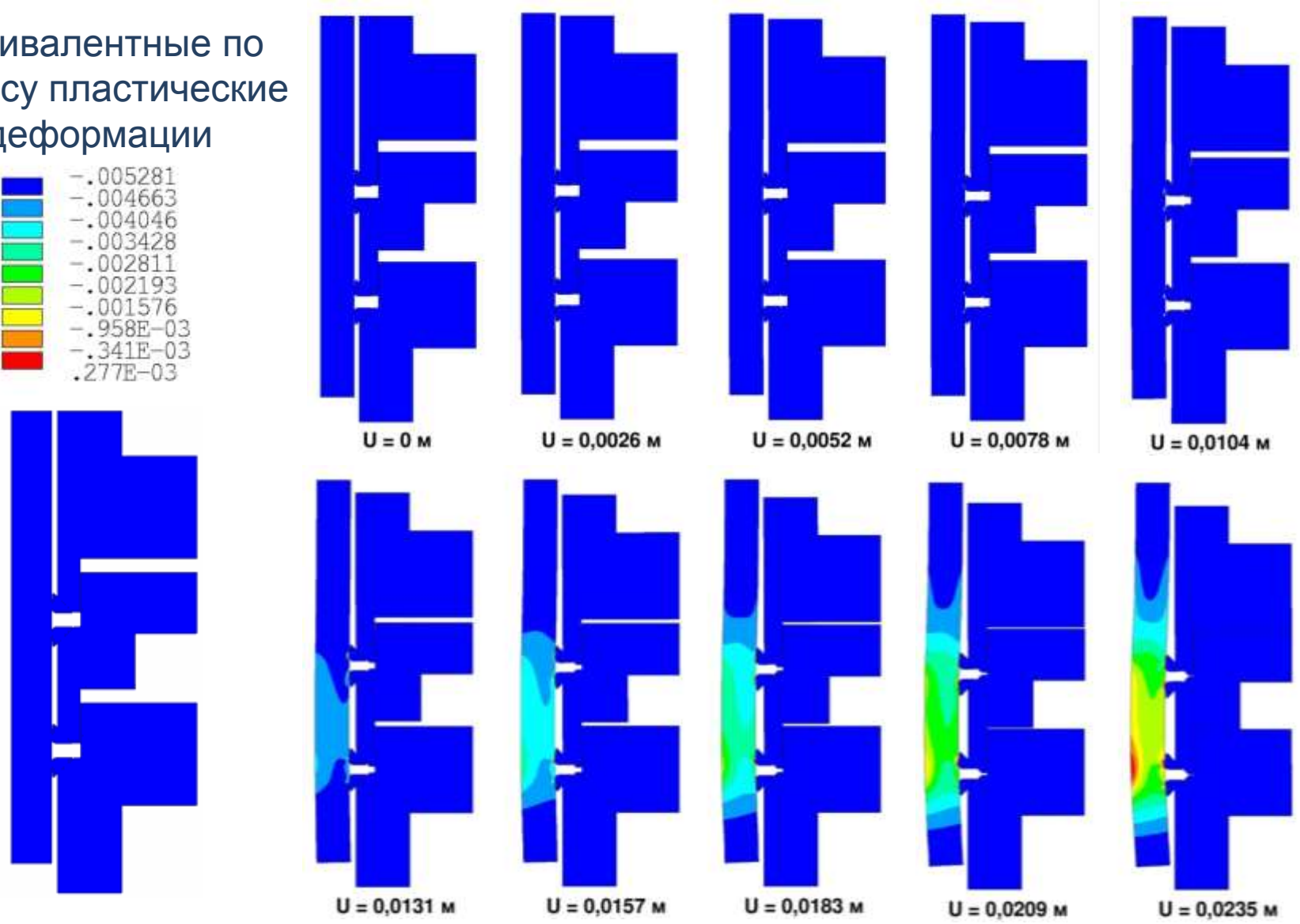
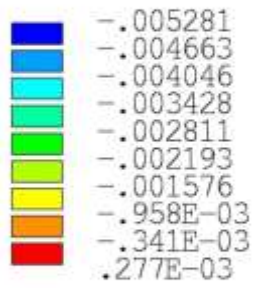
Анализ поведения графитовых уплотнений

Радиальные
перемещения, м



Анализ поведения графитовых уплотнений

Эквивалентные по Мизесу пластические деформации





Заключение и выводы

- 1. Охарактеризованы особенности рассматриваемой муфты.**
- 2. Решена серия вспомогательных задач о сжатии жидкости в стакане под воздействием поршня, оценено влияние параметров применяемого APDL-кода на результаты решения.**
Определен характер влияния параметров на результаты решения. За счет упрощения кода удалось ускорить процесс решения и сократить количество параметров.
- 3. Решена задача о герметизации соединения муфты и трубы большого диаметра, оценено влияние учета трения на результаты решения, проведен анализ поведения графитовых уплотнений и других элементов конструкции.**
Создана эффективная модель соединительной муфты, позволяющая за малое время получать требуемые показатели в процессе герметизации соединения муфты с трубой большого диаметра. Проведен анализ поведения графитовых уплотнений и других деталей муфты.

Результаты работы и подходы к моделированию и исследованию подобного класса устройств были применены при решении практической задачи по разработке инженерного программного обеспечения для проведения оптимизации графитовых уплотнений в бессварочных соединительных муфтах.