



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико – механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики



КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕДУКТОРА

Выполнила:

студентка гр. 5040103/20301 И.Г. Прохоренкова

Руководитель:

Доцент ВШТМиМФ, к.ф-м.н. О.С. Лобода

Консультанты:

Руководитель НИЦ, ЦНИИ РТК А.Ю. Тамм

Ведущий инженер, АО "ЦКБ МТ "Рубин" А.И. Орлов

Введение

Волновой редуктор – ключевой компонент трансмиссии, применяется во многих областях :

- робототехника,
- машиностроение,
- авиакосмическая отрасль,
- панели солнечных батарей космических аппаратов,
- системы ориентации наземных и орбитальных телескопов.

Достоинства: возможность реализации большого передаточного отношения, при малом количестве деталей (от 80 до 360), высокий КПД (0.8 – 0.9), способность передавать высокие нагрузки, низкий шум, плавность при работе, возможность точного позиционирования.

Недостатки: малая долговечность гибкого колеса относительно передач с жесткими колесами, сравнительно малая жесткость на начальном участке нагружения, при высоких нагрузках возможность проскакивание зубьев при применении роликовых генераторов.

Введение: исходные данные

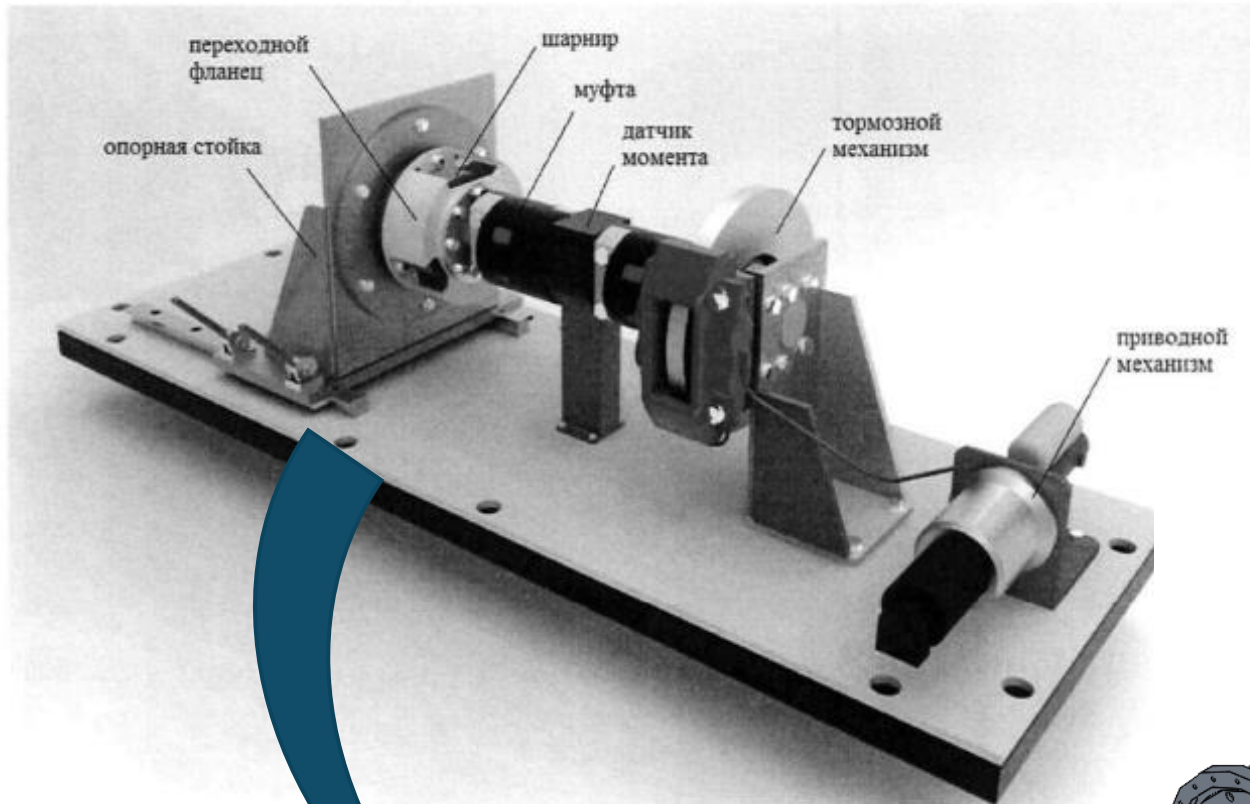


Рис. 1. Испытательный стенд

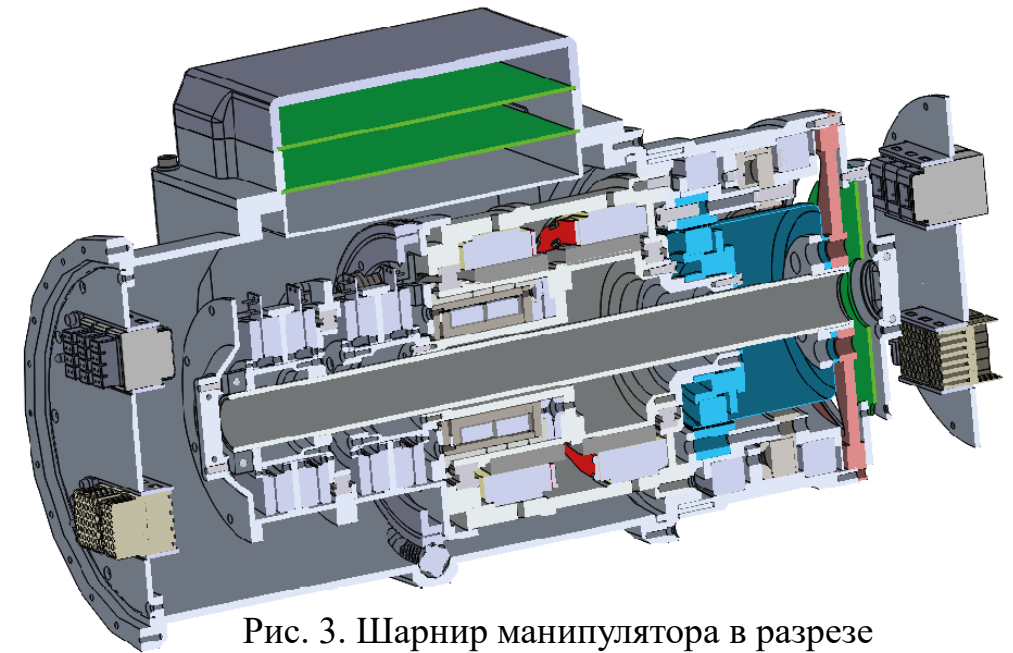


Рис. 3. Шарнир манипулятора в разрезе

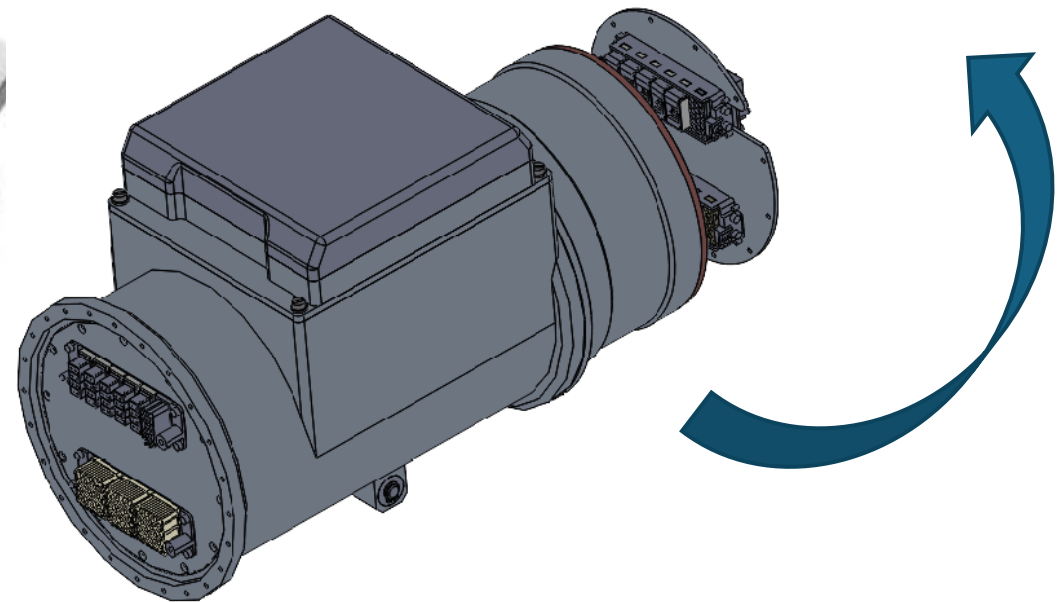


Рис. 2. Шарнир манипулятора

Введение: строение волнового редуктора

Генератор волн – элемент, создающий волну деформации в гибком элементе волновой передачи.

Гибкий элемент – элемент в виде цилиндрической трубы или оболочки, имеет зубчатый венец на наружной поверхности.

Жесткое колесо – кольцевой элемент, имеющий на внутренней поверхности зубчатый венец.

Зубья жесткого колеса или гибкого элемента входят в зацепление под действием генератора волн. Волновой редуктор обеспечивает преобразование и передачу движения за счет циклического возбуждения волн деформации в гибком элементе.

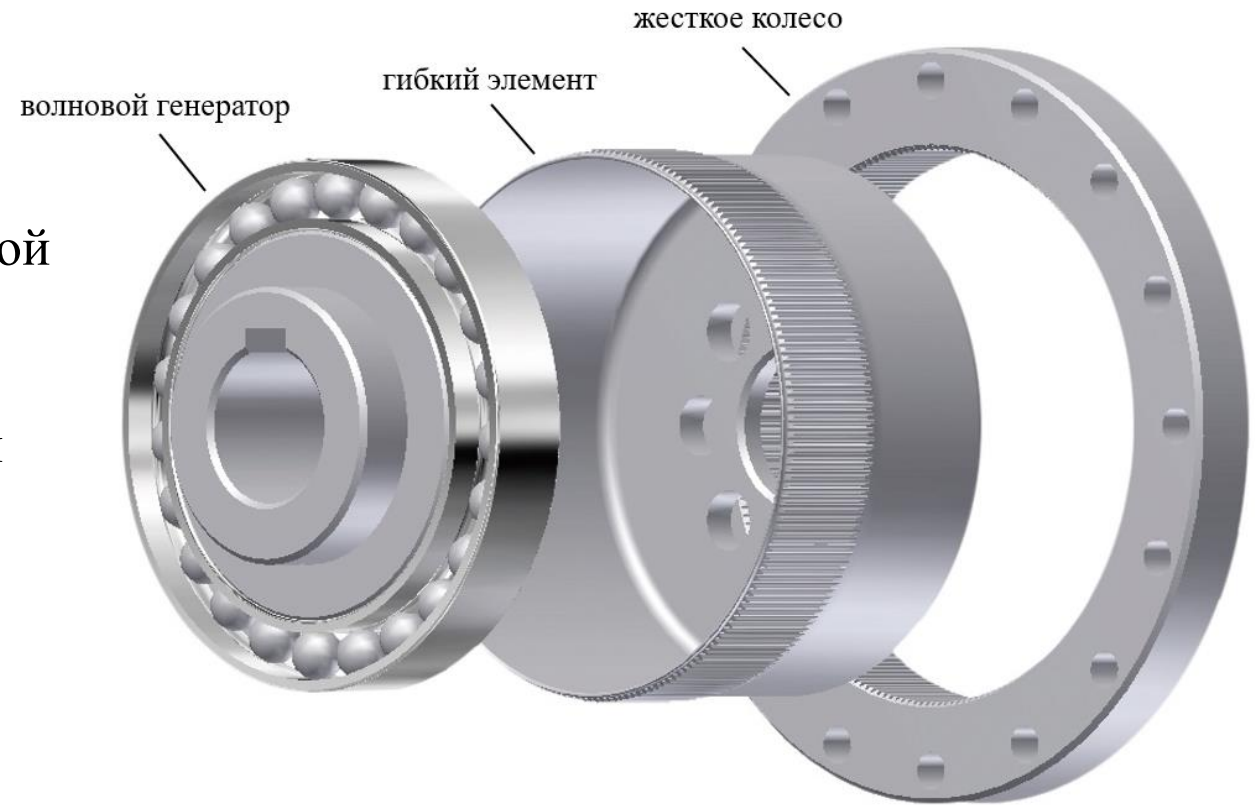


Рис. 4. Волновой редуктор

Проблематика обнаружения неисправности редуктора

1. Скрытые неисправности;
2. Сложная структура механизмов, в которые входит волновой редуктор;
3. Признаки неисправностей редуктора сложно отличимы от других проблем в механизме;
4. Сложность в диагностике и требования большого опыта и знаний для выявления неисправности.

Возможность заранее предугадать проблемы и «опасные точки» всей конструкции является важной задачей, позволяющей своевременно выявить и устранить проблемы, предотвращая серьёзные аварии и снижая затраты на ремонт и обслуживание оборудования

Постановка задачи

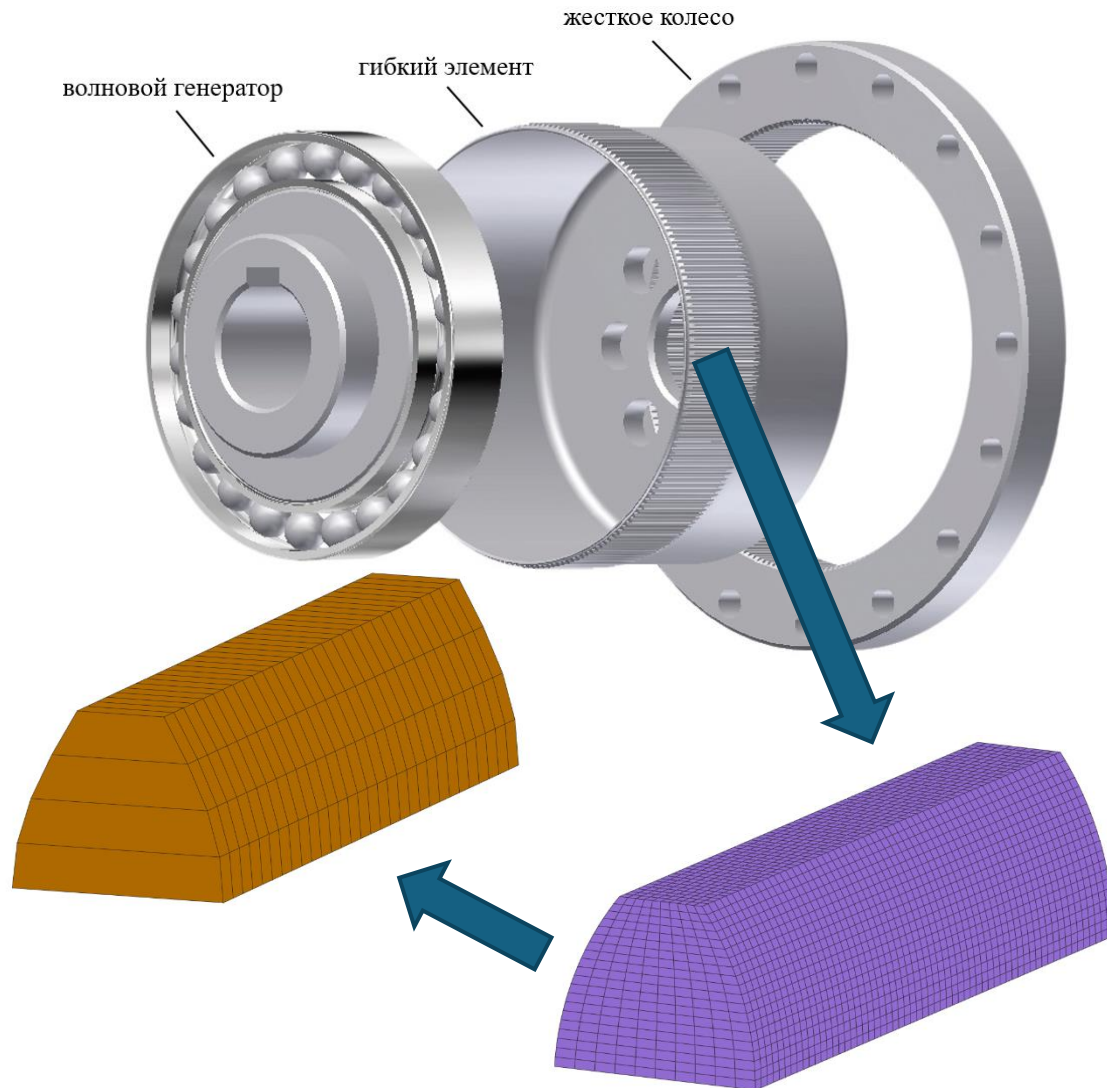


Рис. 5. Волновой редуктор

Цель исследования:

Разработка и сравнение различных методик моделирования зубьев, цилиндра и гибкого колеса волнового редуктора для возможности проведения комплексного виртуального испытания с использованием полноразмерной модели волнового редуктора

Задачи исследования:

1. Исследование методик моделирования зубьев;
2. Валидация модели гибкого колеса;
3. Разработка методики;
4. Моделирование гибкого колеса в составе редуктора.

Ожидаемые результаты:

Методика, обеспечивающая сокращение вычислительного времени полного виртуального испытания волнового редуктора, с условием обеспечения необходимых требований точности

Актуальность и новизна

Работы, связанные с исследованием волнового редуктора с применением МКЭ:

2D моделирование зубчатого зацепления - определение НДС спроектированной геометрии зуба

3D моделирование отдельных деталей редуктора с использованием: грубой гексаэдральной или мелкой тетраэдральной КЭ разбиений

Рассматривают статическое нагружение

Аналитическое решение:

- Не описывает полностью физику процесса
- Является более грубым решением в сравнении с КЭМ
- Не применима при рассмотрении всего механизма (шарнира манипулятора)



Моделирование динамического поведения полноразмерной модели редуктора



Колоссальные временные затраты при моделировании МКЭ с применением твердотельных элементов для деталей столь малых размеров. Размеры деталей в совокупности с возможным количеством зубьев волновой передачи ограничивают применение классических методов моделирования.



1. Исследование методик моделирования зубьев

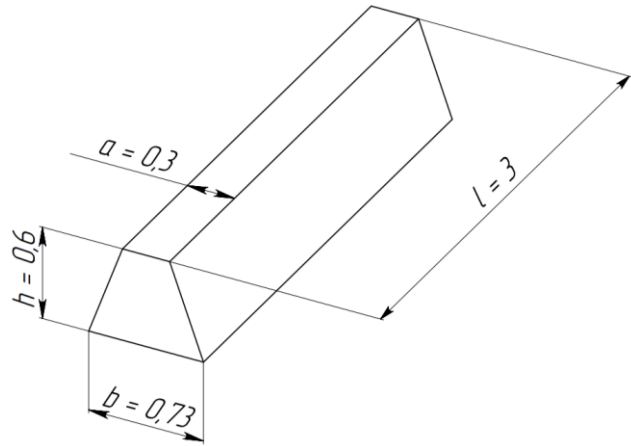


Рис. 6. Общий вид упрощенной геометрии зуба.

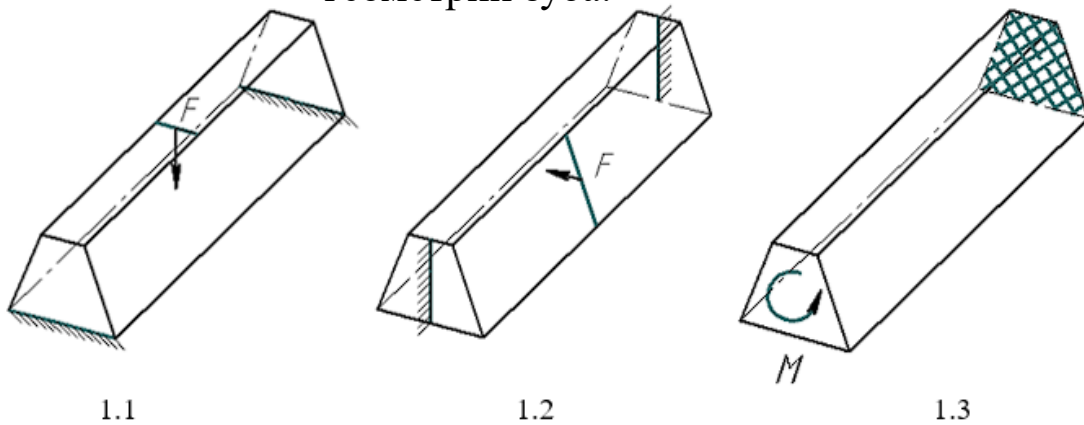


Рис. 7. Разработанные модели с примененными граничными условиями в твердотельной постановке

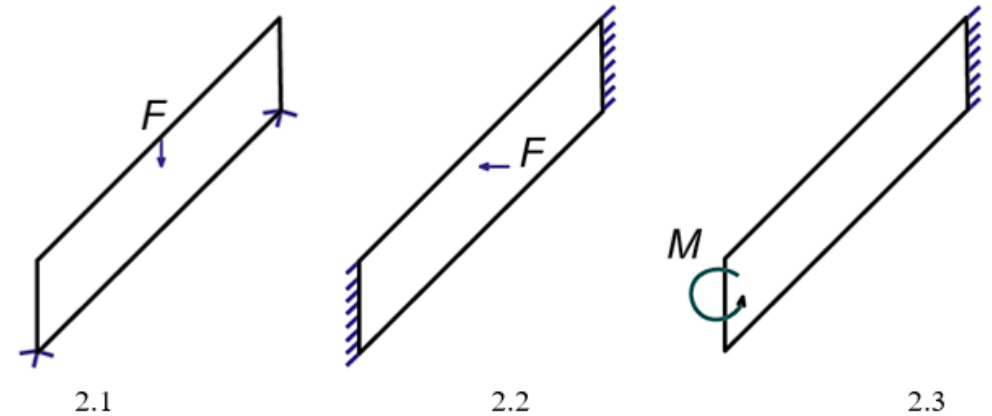


Рис. 8. Разработанные модели с примененными граничными условиями в оболочечной постановке

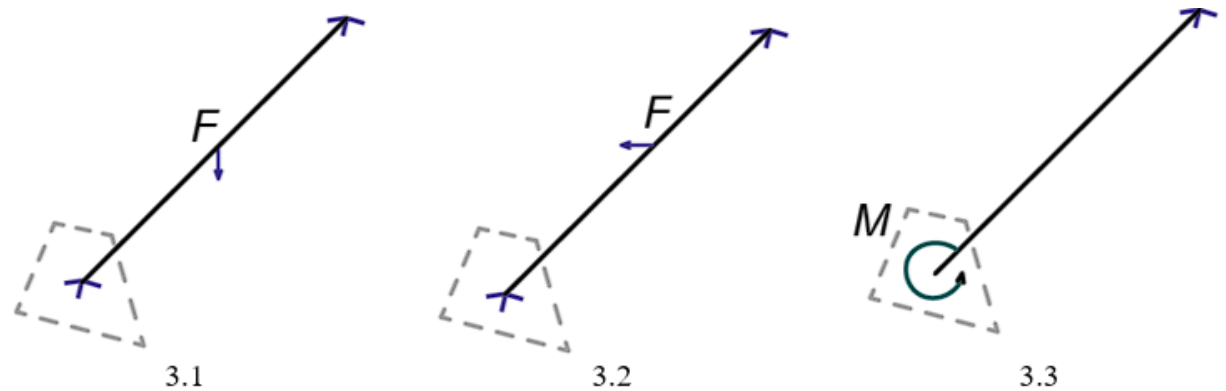


Рис. 9. Разработанные модели с примененными граничными условиями в балочной постановке

1.2 Валидация результатов КЭ моделирования для зубьев: первый тип нагружения

Изгибные напряжения в зависимости от длины зуба
рассчитываются по формуле

$$\sigma = -\frac{M_x}{J_x} y$$

M_x – изгибающий момент; J_x –
момент инерции; y – длина зуба.

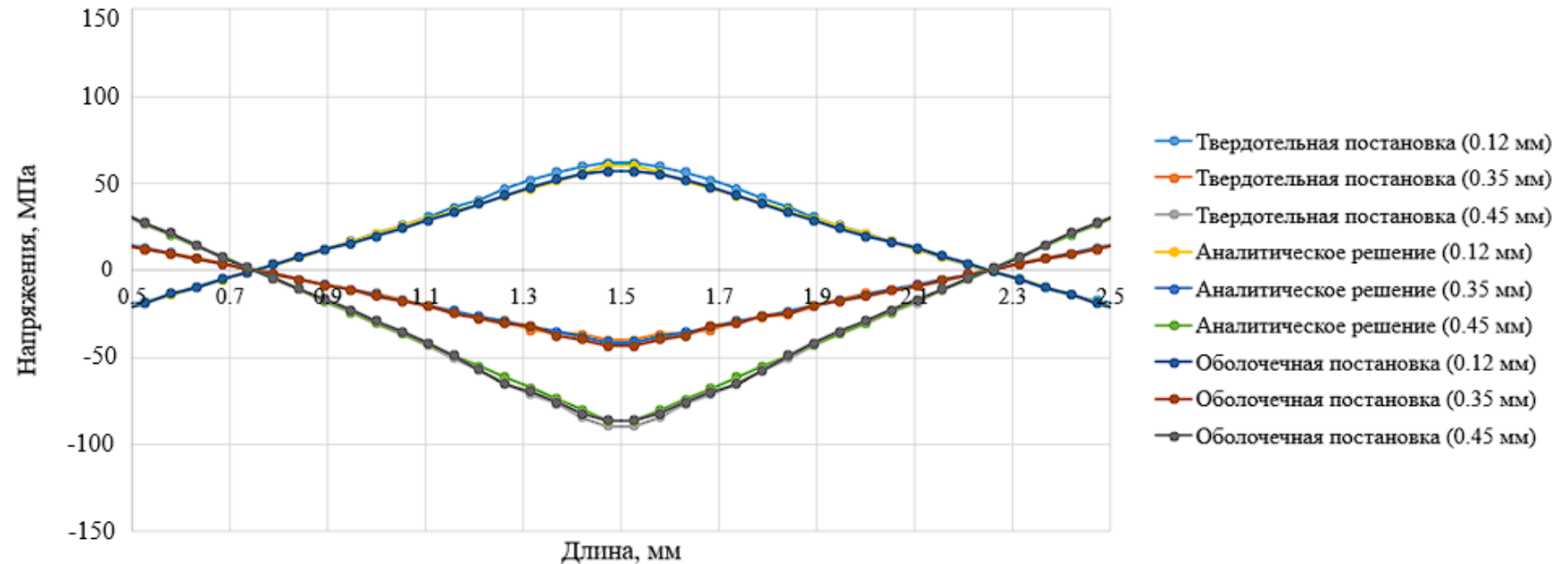
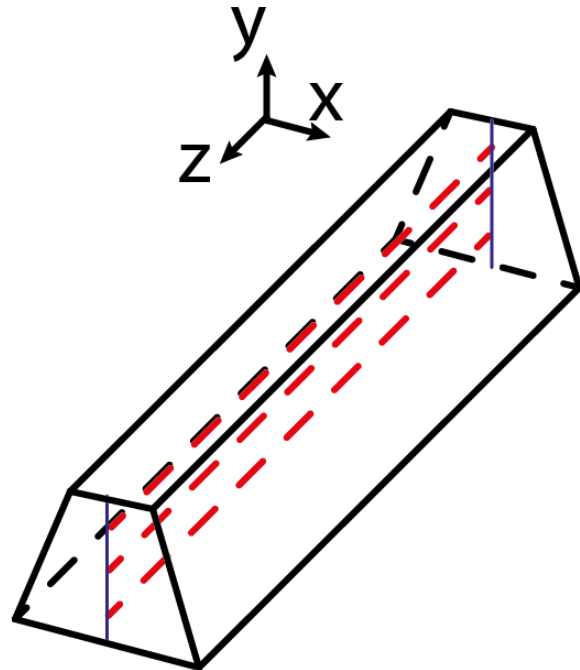


Рис. 10. Пути для отображения значений напряжений для первой постановки

Рис. 11. Зависимость напряжений от высоты зуба для случая нагружения п.1

1. Валидация результатов КЭ моделирования для зубьев: тип нагружения п.2 и п.3

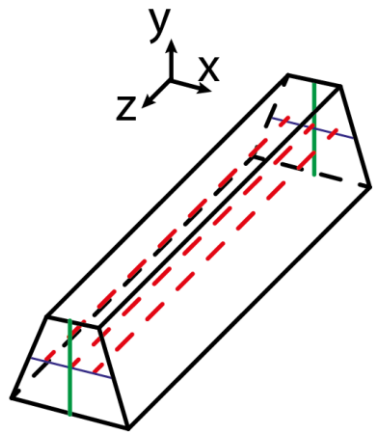


Рис. 12. Пути для отображения значений напряжений для второй постановки

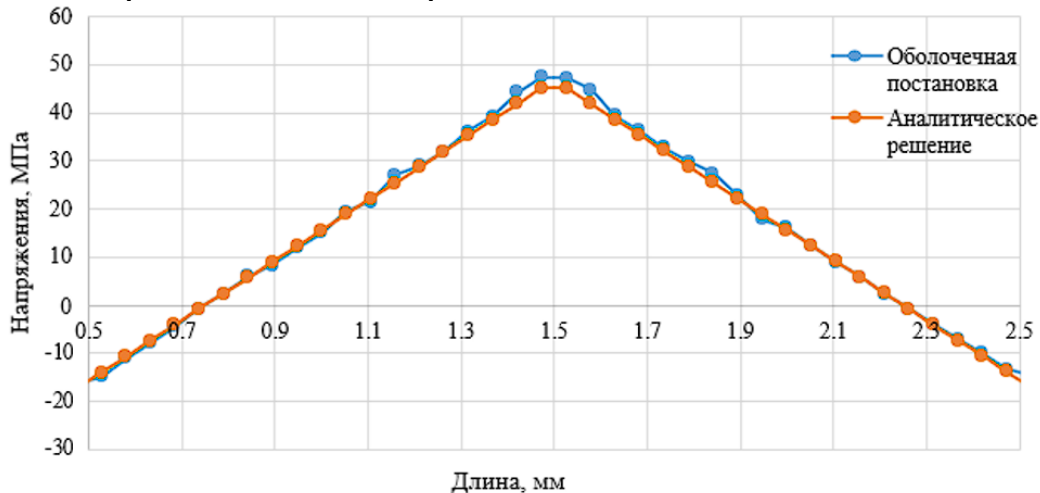


Рис. 14. Зависимость напряжений от высоты зуба для п.2 между оболочечным и аналитическим решениями

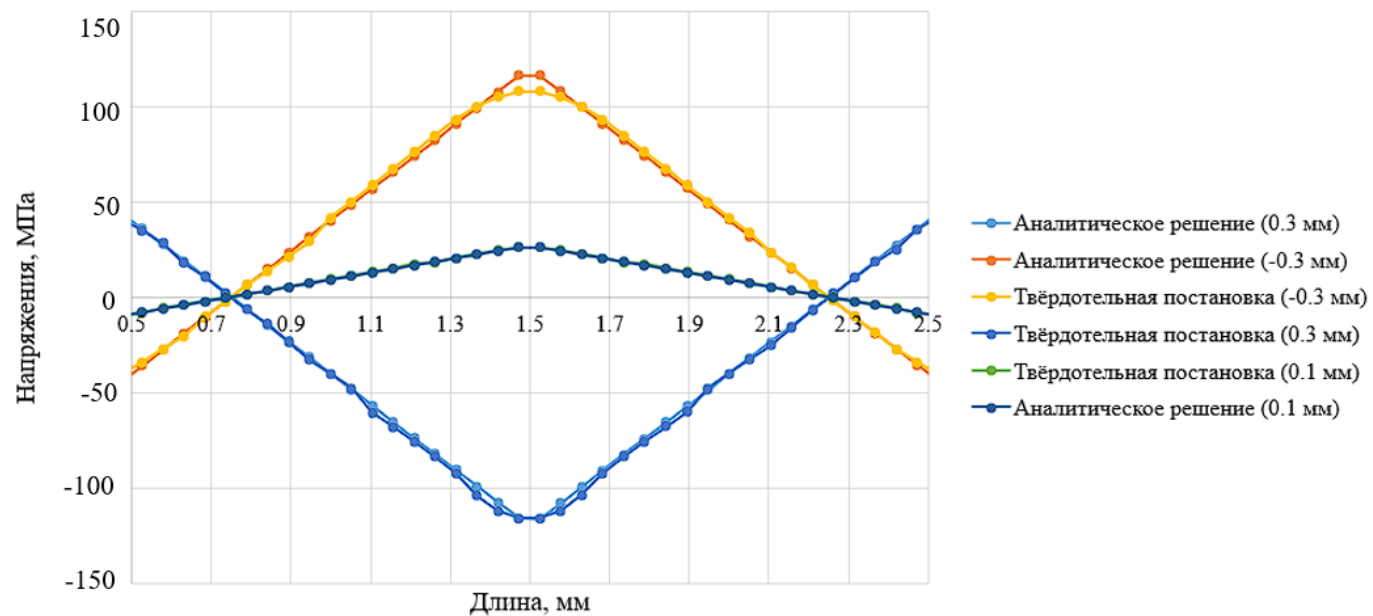


Рис. 13. Зависимость напряжений от высоты зуба для нагружения п.2 между твердотельной и аналитическим решениями

Для задачи п.3

Напряжения при кручении рассчитываются по формуле:

$$\tau_{max} = \frac{M_{кр}}{\alpha ab^2'}$$

Абсолютный угол закручивания по формуле:

$$\varphi = \frac{M_{кр} l}{G \beta ab^3'}$$

$M_{кр}$ – крутящий момент в сечении; a, b – длинная и короткая стороны эквивалентного прямоугольника; коэффициент α и β – выбираются из справочных таблиц.

1.2 Валидация результатов КЭ моделирования для зубьев: сравнение результатов

Показатель	Твердотельная постановка	Оболочечная постановка	Балочная постановка
Расчётное время п.1, сек	119	16	4
Расчётное время п.2, сек	98	7	2
Расчётное время п.3, сек	115	4	2.5
Ошибка решения в сравнении с аналитикой (не более), %	7.5	8	---
Ограничения вывода результатов	Возможен вывод всех результатов, во всех плоскостях измерений	Возможно полное представление НДС в одной плоскости. При настройке количества точек интегрирования по толщине, возможен вывод значений в 5 точках по толщине и более	Ограничение на вывод результатов, возможность просмотра только в одной оси

Таблица 1. Сравнительная таблица для зубьев

2. Валидация модели гибкого колеса



Рис. 15. Гибкое колесо в общем виде.

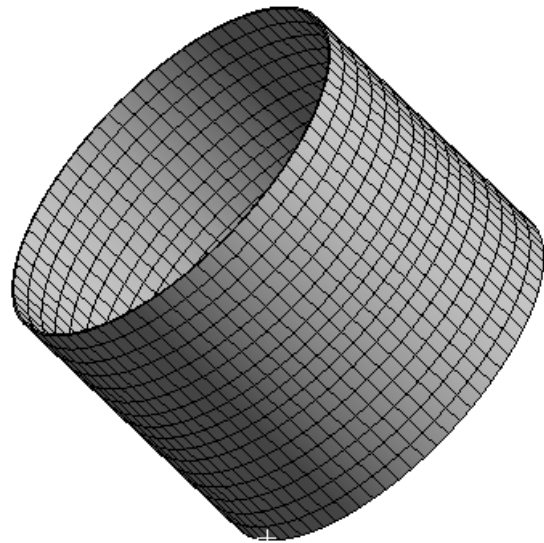


Рис. 16. Модель гибкого колеса для расчётов.

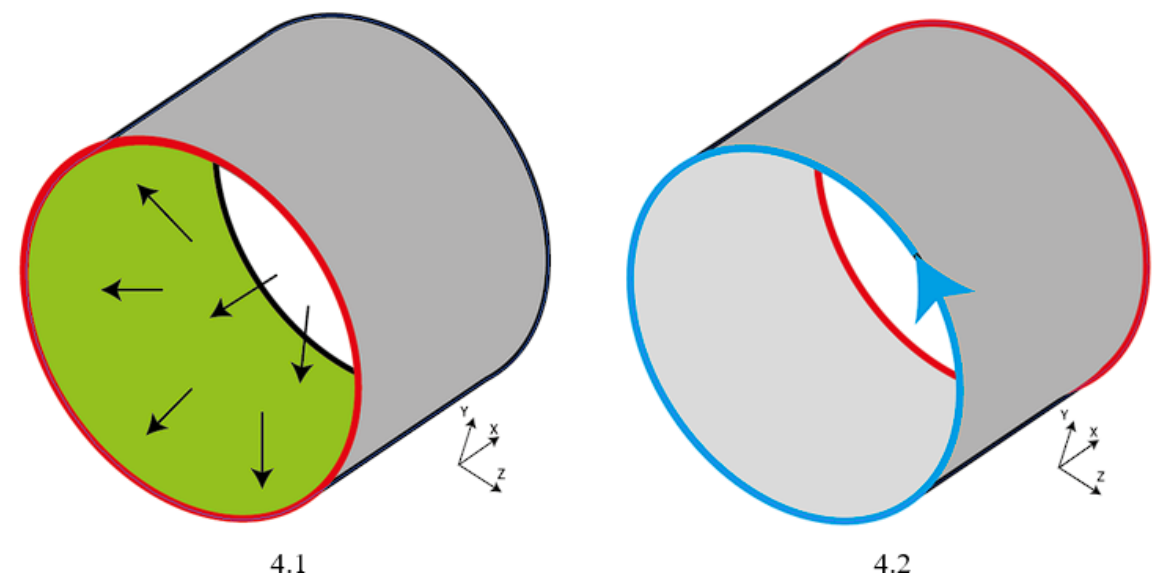


Рис. 17. Граничные условия для модели гибкого колеса для расчётов: 4.1 – расширение, 4.2 – кручение..

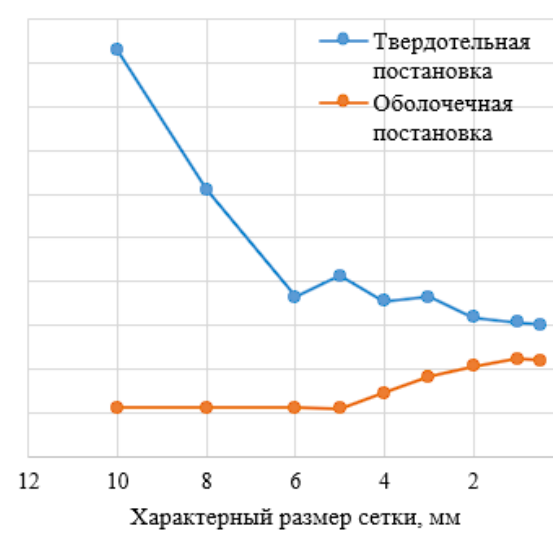


Рис. 18. График сходимости напряжений.

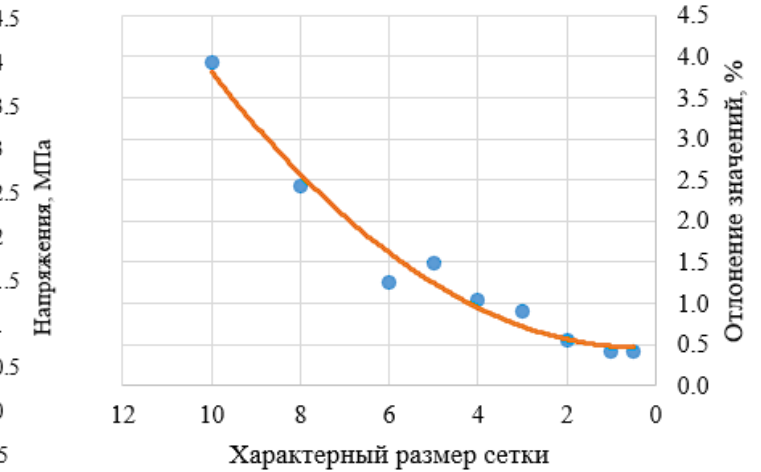
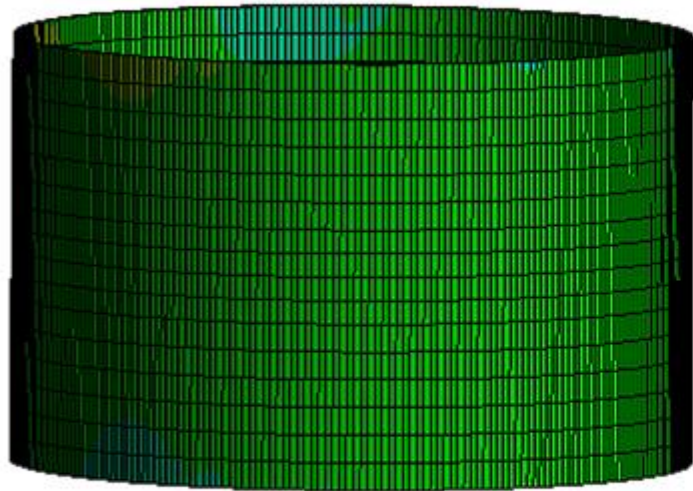
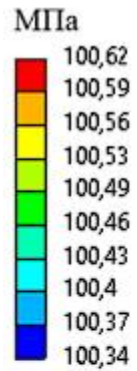


Рис. 19. График изменения процентного отклонения между твердотельной и оболочечной постановками для напряжений

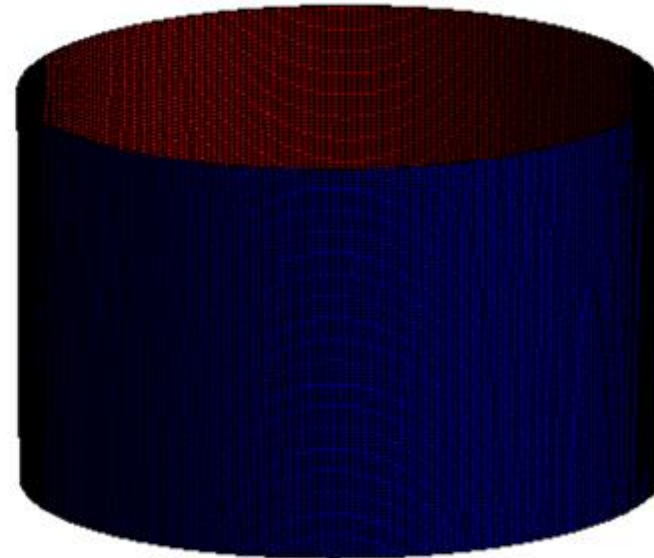
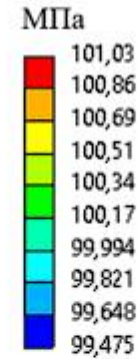
2.1 Валидация модели гибкого колеса

Кольцевые напряжения: $\sigma_{\theta} = \frac{pD_i}{2t}$

p – давление, D_i – внутренний диаметр, t – толщина цилиндра



а



б

Рис. 20. Кольцевые напряжения при КЭ расчёте в случае расширения: а – оболочечная постановка, б – твердотельная постановка

2.2 Валидация модели гибкого колеса

Максимальное напряжение сдвига: $\tau_{max} = \frac{M}{2A_0 t}$

A_0 – площадь поперечного сечения при среднем диаметре

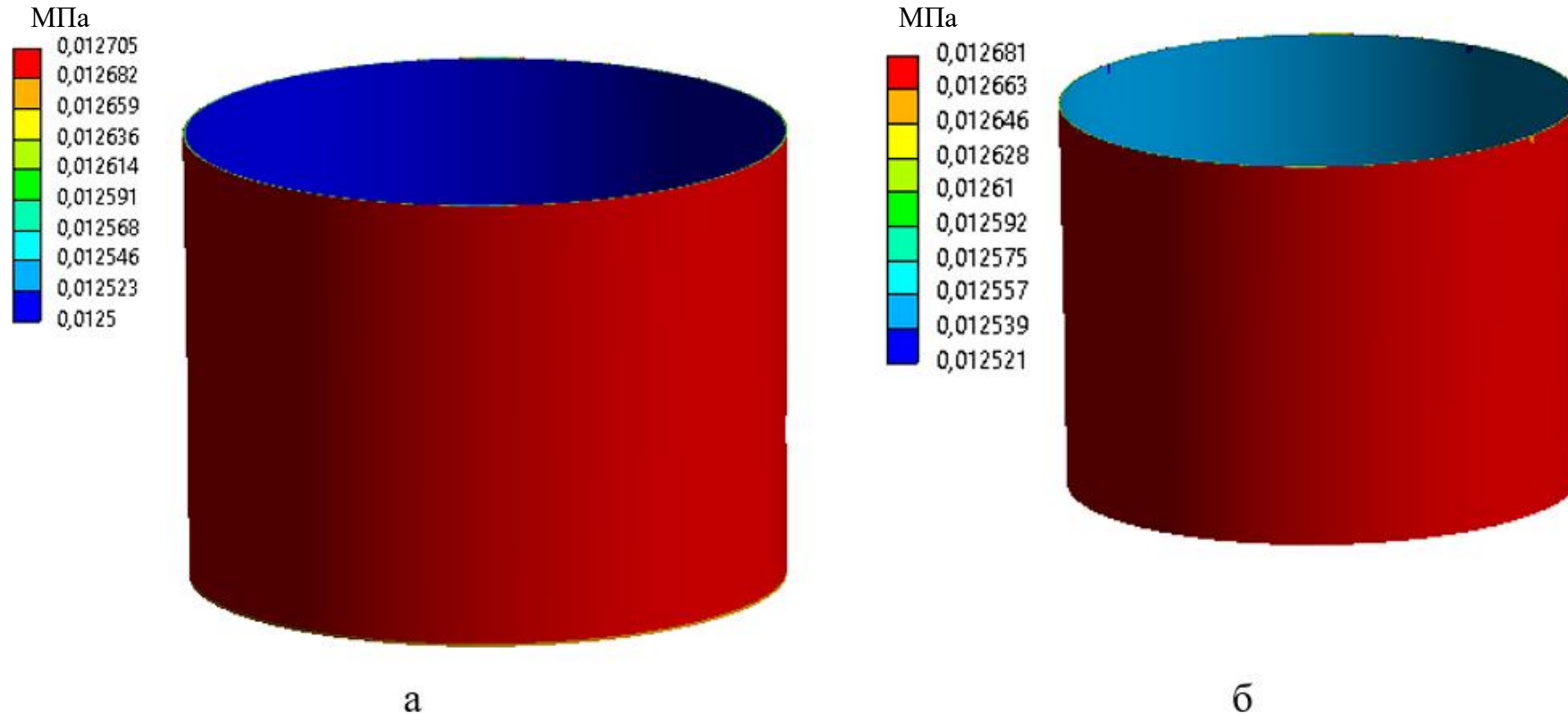


Рис. 21. Максимальное сдвиговое напряжения при КЭ расчёте в случае кручения: а – оболочечная постановка, б – твердотельная постановка

2.2 Валидация модели гибкого колеса

Показатель	Твердотельная постановка	Оболочечная постановка
Расчётное время, расширение, сек	8.5	0.7
Расчётное время, кручение, сек	2.6	0.6
Ошибка решения в сравнении с аналитикой, расширение (не более), %	1.1	0.3
Ошибка решения в сравнении с аналитикой, кручение (не более), %	0.75	1

Таблица 2. Сравнительная таблица для цилиндра гибкого колеса

Разработанная методика

- ✓ Использование оболочечных элементов в 3D постановке для моделирования зубчатого зацепления и цилиндрической части гибкого элемента
- ✓ Сокращение времени выполнения полноразмерного расчета
- ✓ Точность решения аналогична твердотельной постановке
- ✓ Подходит для объёмных и мелких сборок

3. Моделирование гибкого колеса в составе редуктора

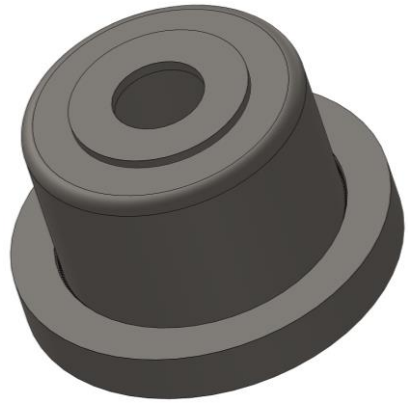


Рис. 22. Гибкое и жесткое колеса в общем виде

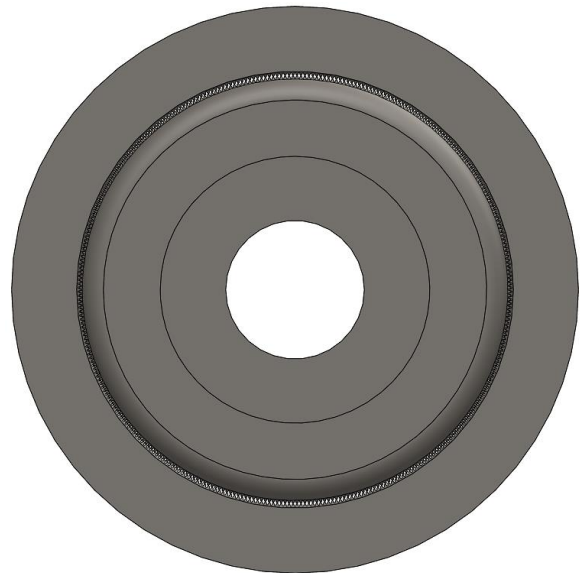


Рис. 23. Гибкое и жесткое колеса, вид сверху

Три постановки:

1. цилиндр гибкого колеса и зубья – твердотельные элементы;
2. цилиндр гибкого колеса и зубья оболочечные элементы;
3. цилиндр гибкого колеса – оболочечный элемент, зубья – балочные элементы.

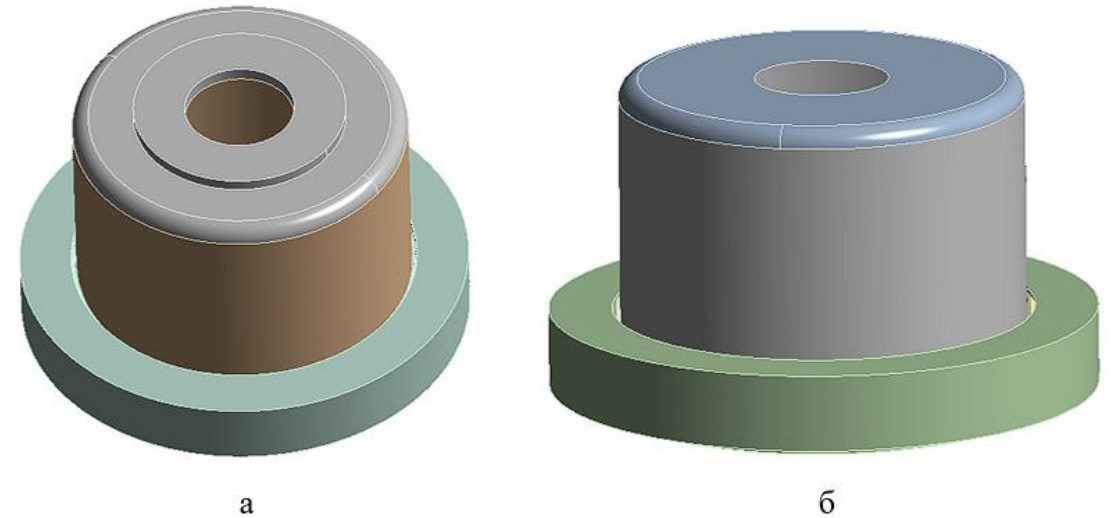


Рис. 24. Общий вид геометрии: а – постановка 1; б - постановки 2 и 3.

3. Моделирование гибкого колеса в составе редуктора

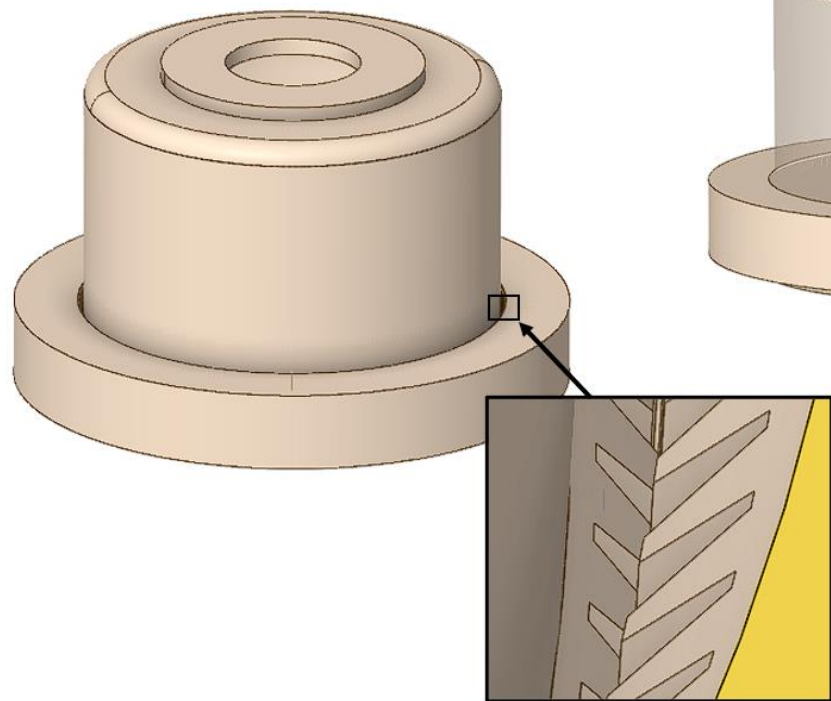


Рис. 25. Геометрия зубьев для твердотельной постановки.

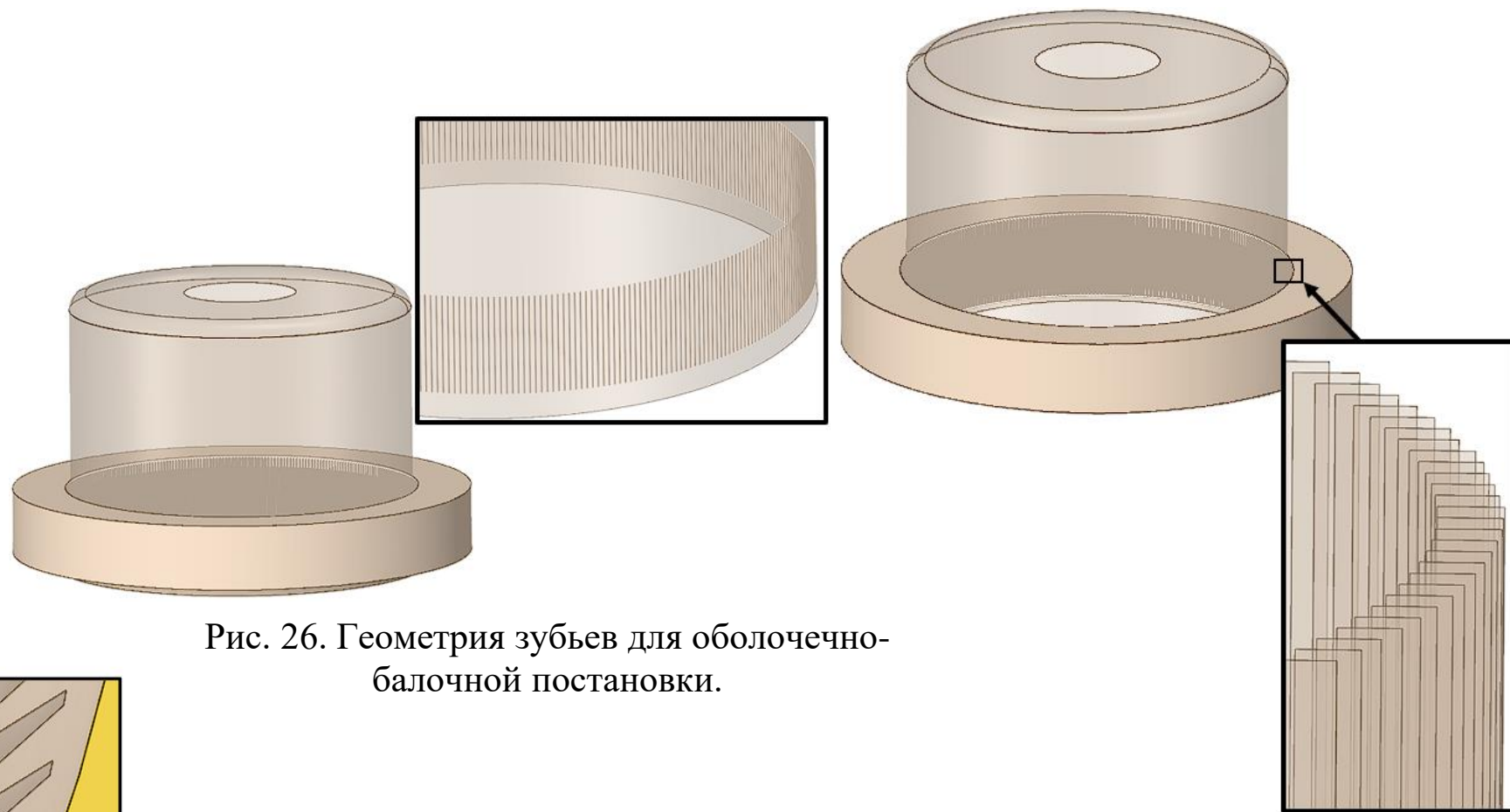


Рис. 26. Геометрия зубьев для оболочечно-балочной постановки.

Рис. 27. Геометрия зубьев для оболочечной постановки.

3. Моделирование гибкого колеса в составе редуктора

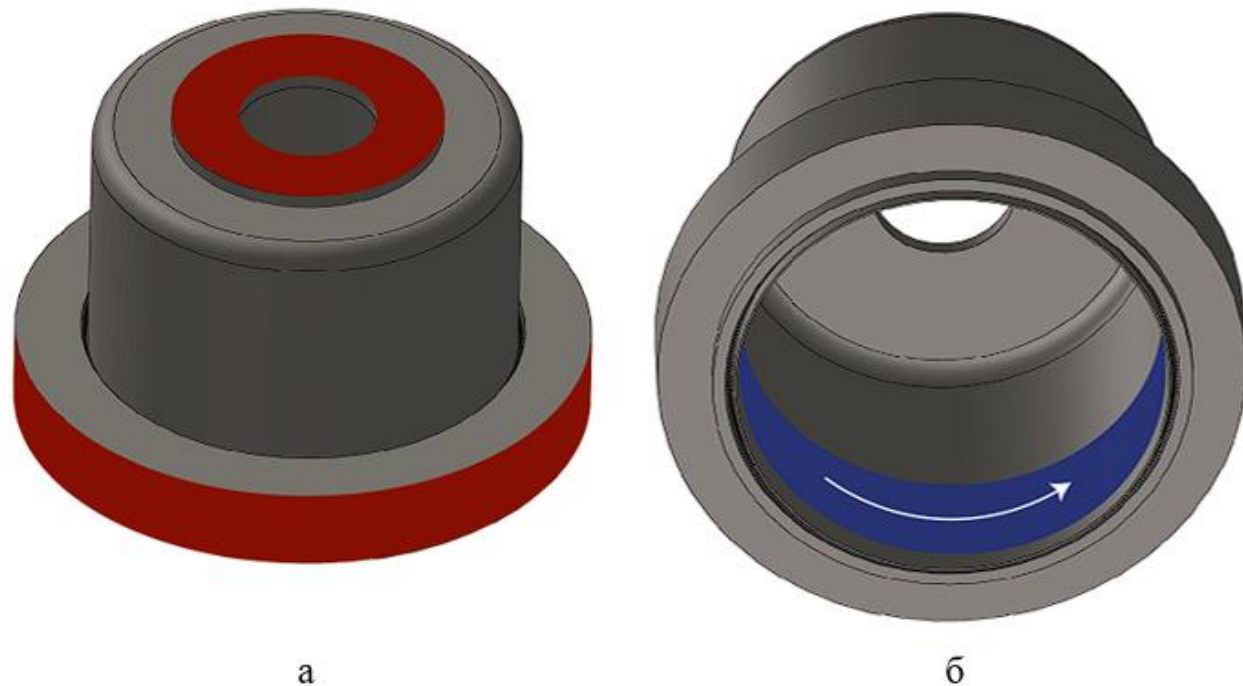


Рис. 28. Граничные условия для задачи моделирования гибкого колеса в составе редуктора: а – жесткая заделка (ограничение всех степеней свободы), б - момент.

- Для сравнения значений выбраны:
1. максимальные напряжения, возникающие в гибком элементе;
 2. максимальные деформации, возникающие в гибком элементе;
 3. сравнение напряжений в плоскости сечения, представленной на рис. 29, для гибкого колеса;
 4. время вычислений.

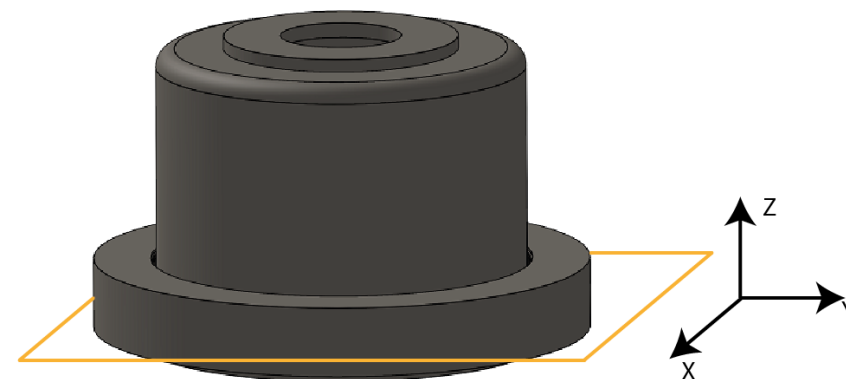


Рис. 29. Плоскость сечения для сравнения результатов

3.2 Моделирование гибкого колеса в составе редуктора

Постановка	Напряжения, МПа	Деформации	Время вычислений, сек
Твердотельная	78,659	1,4838	549
Оболочечная	76,452	1,5203	79
Оболочечно-балочная	74,392	1,6621	66

Таблица 3. Сравнительная таблица для модели гибкого колеса в составе редуктора

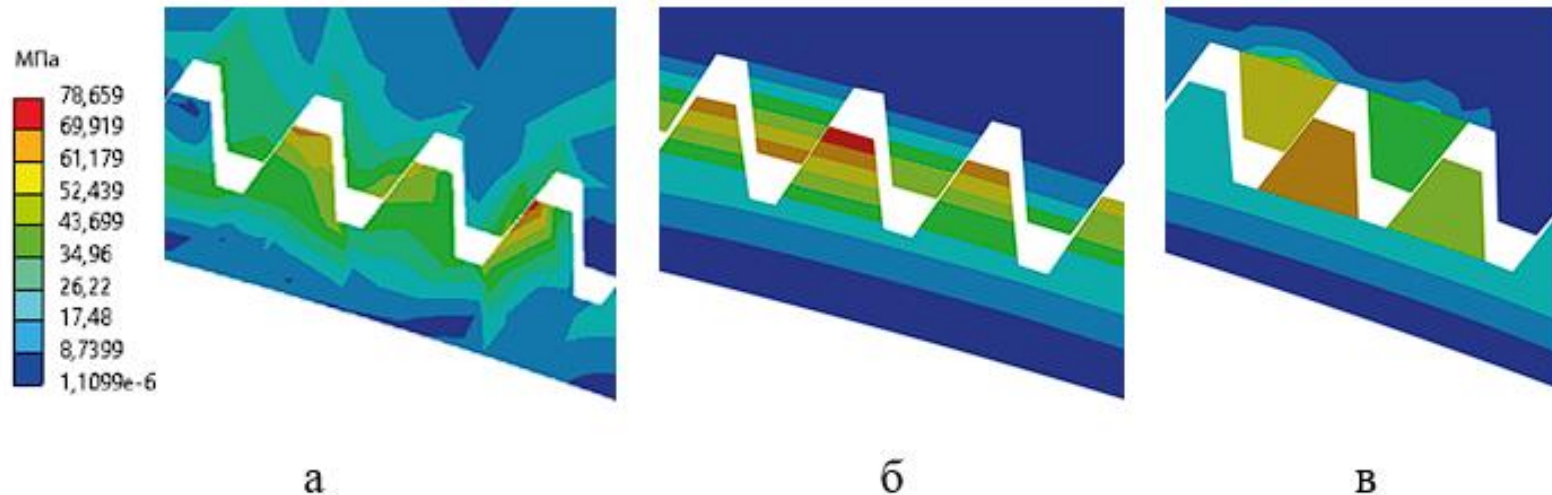


Рис. 30. Распределение напряжений для постановок: а – твердотельная; б – оболочечная; в – оболочечно-балочная

Постановка	5.1	5.2	5.3
Твердотельная	---	2.8%	5.4%
Оболочечная	2.5 %	---	2.7%
Оболочечно-балочная	12 %	9.3%	---

Таблица 4. Относительная ошибка одной постановки от другой (нумерация по горизонтали от вертикали) для напряжений (над центральной осью) и деформаций (под центральной осью)

1. цилиндр гибкого колеса и зубья – твердотельные элементы;
2. цилиндр гибкого колеса и зубья оболочечные элементы;
3. цилиндр гибкого колеса – оболочечный элемент, зубья – балочные элементы.

Заключение

Выпущена статья: *Кузьмин М.И., Тамм А.Ю., Прохоренкова И.Г.* Разработка методики моделирования зубчатого зацепления волнового редуктора с применением МКЭ // Труды 34-й международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника", Санкт-Петербург, Россия, 23-24 ноября 2023 г.

1. Проведено исследование методик моделирования зубьев:

Смоделировано поведение 3 типов элементов, проведено сравнение НДС и валидация на основе аналитических зависимостей. Для моделирования зубьев рациональной является оболочечная постановка.

2. Проведена валидация модели гибкого колеса:

Смоделировано поведение 2 типов элементов цилиндра гибкого колеса, проведено сравнение НДС и валидация на основе аналитических зависимостей. Для моделирования цилиндра гибкого колеса рациональной является оболочечная постановка.

Заключение

3. Разработана методика моделирования волнового редуктора:

- ✓ Использование оболочечных элементов в 3D постановке для моделирования зубчатого зацепления и цилиндрической части гибкого элемента
- ✓ Сокращение времени выполнения полноразмерного расчета
- ✓ Точность решения аналогична твердотельной постановке
- ✓ Подходит для объёмных и мелких сборок

4. Для подтверждения разработанной методики проведено моделирование гибкого колеса в составе редуктора:

- Смоделировано три случая, проведено сравнение НДС;
- При анализе подтверждено: для моделирования гибкого колеса в составе редуктора рациональной является оболочечная постановка цилиндра и зубьев гибкого колеса. В сравнении с твердотельной постановкой: отклонение результатов не превосходит 3%, время расчёта меньше в 7 раз.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!