

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите

Директор ВШТМиМФ,

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____ А. М. Кривцов

«__» _____ 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Расчетное обоснование применимости композитных материалов в бандажных кольцах магистральных нефтепроводов

по направлению подготовки

01.03.03. «Механика и математическое моделирование»

Направленность

01.03.03_03 Математическое моделирование процессов нефтегазодобычи

Выполнил
Студент гр. 5030103/90301

В. Н. Галов

Руководитель
Доцент ВШТМиМФ, к.т.н.

Г. В. Ваганов

Санкт-Петербург

2023

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А.М. Кривцов

«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Галову Владиславу Николаевичу, гр. 5030103/90301

1. Тема работы: Расчетное обоснование применимости композитных материалов в бандажных кольцах магистральных нефтепроводов.
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 05.06.2023
3. Исходные данные по работе: актуальные научные публикации по теме исследования.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): создание геометрической и конечно-элементной моделей бандажного кольца и рабочего колеса насоса магистрального нефтепровода, исследование напряженно-деформированного состояния при эксплуатационных нагрузках и оценка прочности конструкции.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрено
6. Консультанты по работе: Д. Г. Васильева, инженер 1-й категории АО «ЦИФРА».
7. Дата выдачи задания 27.02.2023

Руководитель ВКР _____ Г. В. Ваганов, доцент ВШТМиМФ, к.т.н.

Задание принял к исполнению 27.02.2023

Студент _____ В. Н. Галов

РЕФЕРАТ

На 43 с., 32 рисунка, 3 таблицы

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС, РАБОЧЕЕ КОЛЕСО, КОМПОЗИТЫ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ.

В данной работе рассматривается прочностная задача бандажных колец центробежного насоса. Исследуется два типа материалов: Сталь 20ГЛ и композитный материал «Армотен».

Данная задача показывает, насколько современные и технологичные полимерные материалы превосходят стандартные металлы в конкретной области применения.

Создана геометрическая модель уплотнительных колец на рабочем колесе; заданы новые материалы с необходимыми для исследования свойствами; построена конечно-элементная модель конструкции; приложены к конструкции граничные условия и нагрузки, которым она будет подвергаться во время ее эксплуатации. Также проведено исследование напряженно-деформированного состояния конструкции и заданных материалов на усталостную прочность. Последним шагом выполнено сравнение полученных результатов для разных материалов.

ABSTRACT

43 pages, 32 pictures, 3 tables

CENTRIFUGAL PUMP, IMPELLER, COMPOSITES, MATHEMATICAL MODEL, FINITE ELEMENT ANALYSIS, STRESS-STRAIN STATE, STRENGTH ANALYSIS.

In this work, the strength problem of wear rings of a centrifugal pump is considered. Two types of materials are being studied: Steel 20GL and composite material "Armoten".

This task shows how modern and technologically advanced polymeric materials are superior to standard metals in a certain area of application.

A geometric model of the wear rings on the impeller will be created; new materials with the properties necessary for the study are specified; built of course - elemental model of the structure; applied to the structure are the boundary conditions and loads to which it will be subjected during its operation. A study of the stress-strain state of the structure and specified materials for fatigue strength was carried out. The last step is a comparison of the results that were obtained for different materials.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ.....	8
1.1 Схема работы центробежного насоса	8
1.2 Применение бандажных колец	9
1.3 Композитные материалы	13
1.4 Параметры исследуемых материалов	14
1.4.1 Сталь 20ГЛ.....	14
1.4.2 Композит «Армотен».....	15
1.4.3 Сравнение механических свойств Стали 20ГЛ и «Армотена».....	17
1.5 Формулировка задачи	19
ГЛАВА 2. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА, ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ.....	21
2.1 Конечно-элементный метод (КЭМ).....	21
2.2 Подготовка модели.....	22
2.2.1 Создание геометрии колец	22
2.2.2 Создание материалов исследуемой модели.....	23
2.2.3 Создание контактов.....	23
2.2.4 Создание конечно-элементной модели	24
2.3 Задание граничных условий и нагрузок	25
2.4 Результаты расчета для материала Сталь 20ГЛ.....	27
2.5 Результаты расчета для материала «Армотен»	32
2.6 Дополнительное исследование	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	42
--	----

ВВЕДЕНИЕ

К нефтегазовой промышленности относится не только непосредственная добыча ископаемых из недр земли, в нее также входят комплексы по очистке топлива и производство продуктов, используемых нами в повседневной жизни: ткани, пластмассы, краски, полимерные пленки и т. д. Как уже стало понятно, нефтегазовая отрасль очень тесно связана с остальными экономическими и производственными отраслями, что вкупе с огромными запасами РФ, делает ее в нашей стране одной из ключевых.

Одним из важных аспектов в данной промышленности – это транспортировка нефтепродуктов от мест добычи до пунктов их обработки. На сегодняшний день данный процесс осуществляется с помощью железнодорожного, водного, автомобильного и трубопроводного транспортов. Среди перечисленных наиболее экономически выгодным является трубопроводный способ. Иначе его можно назвать – магистральный нефтепровод, или нефтепродуктопровод.

Магистральный нефтепровод, или нефтепродуктопровод – единый производственно – технологический комплекс, состоящий из трубопроводов и связанных с ними перекачивающих станций, а также других технологических объектов, обеспечивающих транспортировку, приемку, сдачу нефти и нефтепродуктов. Само перемещение жидкостей по трубопроводу возможно за счет перекачивающих (нагнетательных) насосных станций, которые повышают давление в трубе, тем самым заставляю жидкую среду двигаться. С расстоянием давление вновь падает, поэтому такие нагнетательные станции устанавливаются через определенные интервалы. Как правило, эти интервалы варьируются в пределах 100–150 км [9]. Насосные станции являются своего рода сердцем нефтепроводов.

Чаще всего на подобных насосных станциях используются центробежные насосы. Именно благодаря им и происходит процесс

повышения давления в трубопроводе и дальнейшая перекачка жидкости. Чем выше КПД насоса, тем больше жидкости он способен перекачивать.

Как и любое другое оборудование, насосы тоже выходят из строя со временем эксплуатации. Для выявления неисправностей и осуществления ремонта их работа приостанавливается. В зависимости от неисправности время простоя оборудования и экономические затраты на его ремонт могут оказать существенное влияние на производство. Поэтому возникает необходимость в использовании качественных материалов и своевременного ремонта оборудования.

В центробежных насосах одними из критических мест, которые снижают его КПД, либо же полностью выводят его из строя являются: рабочее колесо насоса и щелевые уплотнения.

В данной работе будет проводиться исследование материалов тех самых щелевых уплотнений, которые представляют собой кольца из различных металлических сплавов или композитных материалов. Будут проведены исследования напряженно-деформированного состояния и усталостной прочности уплотняющих колец с помощью метода конечных элементов. Материалы колец к сравнению: Сталь 20ГЛ и композитный материал «Армотен».

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

1.1 Схема работы центробежного насоса

Как уже говорилось ранее, наиболее распространенным типом насосов на перекачивающих станциях магистральных нефтепроводов являются центробежные насосы [10]. Главными элементами центробежного насоса являются рабочее колесо, которое приводит в движение жидкость, и корпус, который позволяет подвести жидкость к рабочему колесу и отвести в напорный трубопровод. Рабочее колесо закреплено на валу, установленном на подшипниках. Вращение на вал передается от двигателя. При вращении вала вращается и рабочее колесо насоса. Лопатки, расположенные на колесе, воздействуют на жидкость и приводят ее во вращение. За счет механической энергии вращения, передаваемой жидкости, давление и кинетическая энергия перекачиваемой среды будут увеличиваться на нагнетательной стороне и выходить через нагнетательный патрубок. Со стороны всасывания жидкость вытесняется к периферии, от чего в центре образуется область пониженного давления, что помогает всасывать новый поток жидкости в систему. Разогнанные частицы жидкости поступают в спиральный отвод, который позволяет преобразовать часть скоростного напора в давление. Диаметр проходного сечения спирального отвода и выходного патрубка постепенно увеличивается. Скорость потока жидкости снижается, а давление, согласно закону Бернулли – увеличивается. За счет этого давления и происходит перемещение жидкости по трубам.

Сама схема работы (рисунок 1.1) центробежного насоса довольно простая и эффективная, но при этом не лишена недостатков. В первую очередь, такие насосы не могут работать при отсутствии жидкости в корпусе. Следовательно, прежде чем запускать, необходимо удостовериться, что на рабочее колесо поступает жидкость, поскольку, при ее отсутствии, из-за трения рабочего колеса о корпус без смазывающей жидкости происходит

сверхизнос компонентов, что снижает КПД насоса в дальнейшем, либо может привести к поломке.

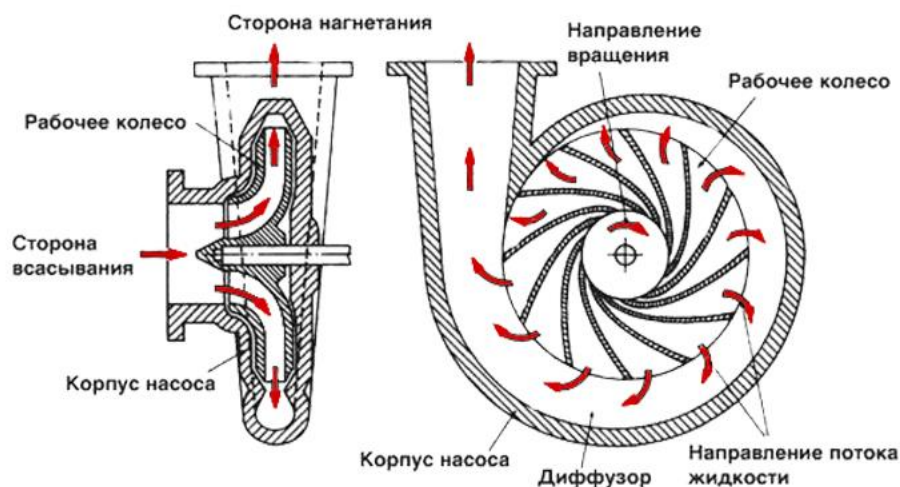


Рисунок 1.1 – Схема работы центробежного насоса.

1.2 Применение бандажных колец

Бандажные или уплотнительные кольца, также известные как уплотнительные прокладки или просто уплотнения, используются для создания герметичного соединения между двумя или более поверхностями. Они предназначены для предотвращения утечек жидкостей, газов или пыли из пространства между соединяемыми поверхностями. В зависимости от применения и условий работы, уплотнительные кольца могут быть изготовлены из различных материалов. Некоторые распространенные материалы для уплотнительных колец включают:

— Резина:

Резиновые уплотнительные кольца обладают хорошей эластичностью и гибкостью, что позволяет им обеспечивать герметичность в широком диапазоне условий. Резина может быть силиконовой, нитриловой и другими видами, в зависимости от требований по стойкости к химическим веществам, температуре и другим факторам.

— Плотные материалы:

Некоторые уплотнительные кольца изготавливаются из плотных материалов, таких как графит, тефлон или фторопласт. Эти материалы обладают высокой стойкостью к химическим веществам и высоким температурам, что делает их идеальными для применения в агрессивных средах.

— Металлы:

В некоторых случаях уплотнительные кольца могут быть изготовлены из металлов, таких как алюминий или нержавеющая сталь. Металлические уплотнения обычно используются в высокотемпературных или средах с высоким давлением, где требуется высокая прочность и стойкость к коррозии.

Уплотнительные кольца могут иметь различные формы и конструкции, включая круглые прокладки, прокладки с углублениями и другие. Их размеры и формы выбираются в соответствии с требованиями конкретного применения и конструкции соединяемых поверхностей.

При установке уплотнительных колец важно обеспечить правильное сжатие, чтобы достичь надлежащего герметичного соединения. Это может достигаться с помощью специальных уплотнительных устройств, таких как болты с заданным моментом затяжки или специальные уплотнительные прокладки.

Общими применениями уплотнительных колец являются соединения в трубопроводах, прокладки в двигателях и насосах, герметичность в контейнерах и упаковках, а также во многих других областях, где требуется обеспечить надежную уплотненность.

В данной задаче рассматриваются уплотнительные кольца на рабочих колесах центробежных насосов.

Уплотнительные кольца насоса представляют собой простые компоненты, но они оказывают огромное влияние на надежность,

эффективность и безопасность насоса. Большинство конструкций центробежных насосов включают сменные вращающиеся изнашиваемые кольца на рабочем колесе (уплотнительные кольца рабочего колеса) и дополнительно неподвижные изнашиваемые кольца внутри корпуса (уплотнительные кольца корпуса) (рисунок 1.3).

Уплотнительные кольца в насосе служат трем основным целям:

- Создание зоны контакта между вращающимися и неподвижными частями внутри насоса.
- Уменьшение внутренней рециркуляции от стороны нагнетания насоса к стороне всасывания насоса или между его ступенями.
- Создание гидравлических сил, стабилизирующих ротор насоса.

За счет перечисленных действий можно повысить КПД центробежного насоса от 2 до 5%. Рабочий зазор уплотнительного кольца влияет на давление нагнетания насоса, расход, эффективность, потребляемую мощность, вибрацию и кавитацию. Чем этот зазор меньше, тем выше КПД насоса, а его оптимальная величина выбирается исходя из параметров контактирующих материалов и непосредственно перекачиваемой среды [8].

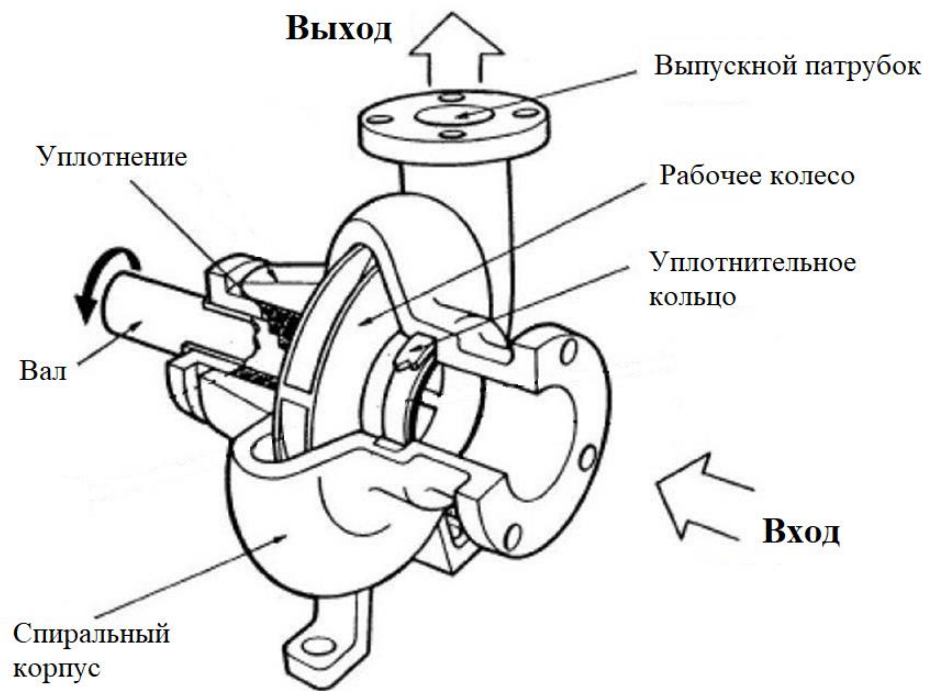


Рисунок 1.2 – Пример расположения уплотнительного кольца.

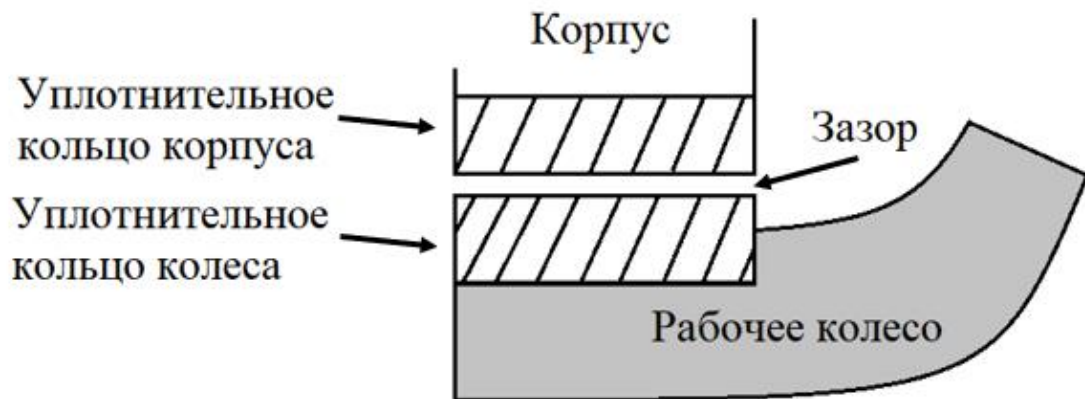


Рисунок 1.3 – Пример уплотнительных колец в разрезе.

Обычно уплотнительные кольца изготавливаются из материалов, которые обладают хорошей стойкостью к износу, а также к химическим и термическим воздействиям среды. Некоторые распространенные материалы, используемые для изготовления уплотнительных колец, включают углерод, керамику, фторопласты и резину.

Уплотнительные кольца должны быть правильно подобраны и установлены, чтобы обеспечить надежное уплотнение между рабочим колесом

и корпусом насоса. Неправильный выбор или повреждение уплотнительных колец может привести к утечкам и снижению эффективности работы насоса.

1.3 Композитные материалы

Во введении уже упоминалось, что в данной работе будут использоваться два материала: сталь 20ГЛ и композитный материал Армотен. Сталь – довольно известный материал, в то время как композиты еще только начинают свое развитие, поэтому стоит рассказать о них немного подробнее.

Композитные материалы представляют собой материалы, состоящие из двух или более различных компонентов, которые объединены вместе с целью создания материала с оптимальными свойствами [11]. Эти компоненты могут быть разных типов, таких как волокна, матрицы и наполнители. Композиты обычно имеют лучшие свойства, чем отдельные компоненты в отдельности. Одним из наиболее распространенных типов композитов являются волоконно-армированные композиты, в которых волокна, такие как стекловолокно, углеволокно или арамидное волокно, встроены в матрицу, обычно полимерную. Волокна обеспечивают прочность и жесткость материала, а матрица служит для передачи нагрузки и защиты волокон от внешних воздействий.

Преимущества композитных материалов включают:

Высокая прочность и жесткость:

Волокна в композитах обеспечивают высокую прочность и жесткость, что позволяет им выдерживать большие нагрузки и давление.

Низкая плотность:

Композиты обладают низкой плотностью по сравнению с многими традиционными материалами, такими как металлы, что делает их

легкими и удобными для применения в авиации, автомобилестроении и других отраслях, где вес имеет значение.

Коррозионная стойкость:

Некоторые композиты, такие как углепластик, обладают высокой стойкостью к коррозии, что делает их привлекательными для применения в условиях, где важна долговечность и устойчивость к химическим средам.

Дизайн и форма:

Композиты позволяют создавать сложные формы и конструкции, которые трудно реализовать с использованием других материалов. Они обладают отличной способностью формования и подгонки под нужные геометрические параметры.

Композитные материалы широко используются в авиационной, автомобильной, судостроительной, аэрокосмической, энергетической и других отраслях промышленности. Они применяются для изготовления легких и прочных структур, таких как корпуса самолетов и автомобилей, лодки, вертолетные лопасти, спортивные снаряды и многое другое.

1.4 Параметры исследуемых материалов

1.4.1 Сталь 20ГЛ

Является легированной углеродистой сталью, которая обладает определенными характеристиками и применяется в различных отраслях промышленности.

Химический состав: Сталь 20ГЛ содержит около 0,2% углерода, что делает ее углеродистой сталью. Она также содержит легирующие элементы,

такие как марганец (Mn), кремний (Si), фосфор (P) и серу (S). Эти элементы могут быть в различных пропорциях в зависимости от стандарта и требований.

Механические свойства: Сталь 20ГЛ обладает хорошей прочностью и ударной вязкостью. Механические свойства могут варьироваться в зависимости от условий термической обработки и способа проката.

Применение: Сталь 20ГЛ широко используется в различных отраслях промышленности. Она может применяться для изготовления трубопроводов, соединительных элементов, фланцев, фитингов, крепежных деталей и других конструкций. Эта сталь может быть использована в различных секторах, включая нефтегазовую промышленность, химическую промышленность, энергетику и строительство.

Свариваемость: Сталь 20ГЛ обладает хорошей свариваемостью. Она может быть сварена различными методами сварки, включая дуговую сварку, контактную сварку и другие. Однако при сварке рекомендуется соблюдать соответствующие технологические рекомендации и нормы.

Важно отметить, что конкретные характеристики стали 20ГЛ могут различаться в зависимости от производителя, стандарта и спецификаций.

1.4.2 Композит «Армотен»

Композитный материал «Армотен», другое название – Полифениленсульфид с 30% наполнением специальным стекловолокном, представляет собой высокопрочный и легкий материал, который потенциально может использоваться в различных областях, включая авиацию, автомобилестроение, защиту и другие промышленные приложения [12].

Структура: «Армотен» обычно состоит из матрицы, которая может быть полимерной или металлической, и армирования в виде волокон. Волокна могут быть изготовлены из различных материалов, таких как углеволокно, арамидное волокно или, как в нашем случае, стекловолокно.

Прочность и жесткость: «Армотен» обладает высокой прочностью и жесткостью благодаря армированию волокнами. Волокна предоставляют материалу высокую механическую прочность и способность противостоять различным нагрузкам.

Легкость: Одним из преимуществ «Армотен» является его низкая плотность, что делает его легким материалом. Это особенно важно в авиационной и автомобильной отраслях, где вес материала имеет большое значение для эффективности и экономии топлива.

Устойчивость к коррозии: В зависимости от используемых материалов матрицы и армирования, «Армотен» может обладать хорошей устойчивостью к коррозии. Например, армирование углеволокном обычно обладает высокой коррозионной стойкостью, что делает материал подходящим для применения в агрессивных средах.

Применение: Полифениленсульфиды широко используется для изготовления компонентов и деталей, требующих высокой прочности и легкости. Это может включать крылья и фюзеляжи самолетов, кузова автомобилей, защитные панели, медицина, электротехника, нефтехимия и многое другое. Они также могут использоваться в бронировании и защите, так как обладает высокой прочностью и способностью поглощать энергию при ударе.

1.4.3 Сравнение механических свойств Стали 20ГЛ и «Армотена»

Таблица 1.1

Механические свойства материалов

Наименование показателя	Единицы измерения	Сталь 20ГЛ	Армотен
Плотность	кг/м ³	7850	1480
Модуль Юнга	ГПа	200	10
Коэффициент Пуассона	-	0.3	0.34
Предел текучести на растяжение	МПа	350	115
Предел текучести на сжатие	МПа	350	138

На рисунках 1.4–1.5 представлены графики усталости (кривые Велера) материалов в логарифмическом масштабе, другими словами – сколько примерно циклов выдержит материал при определенной нагрузке.

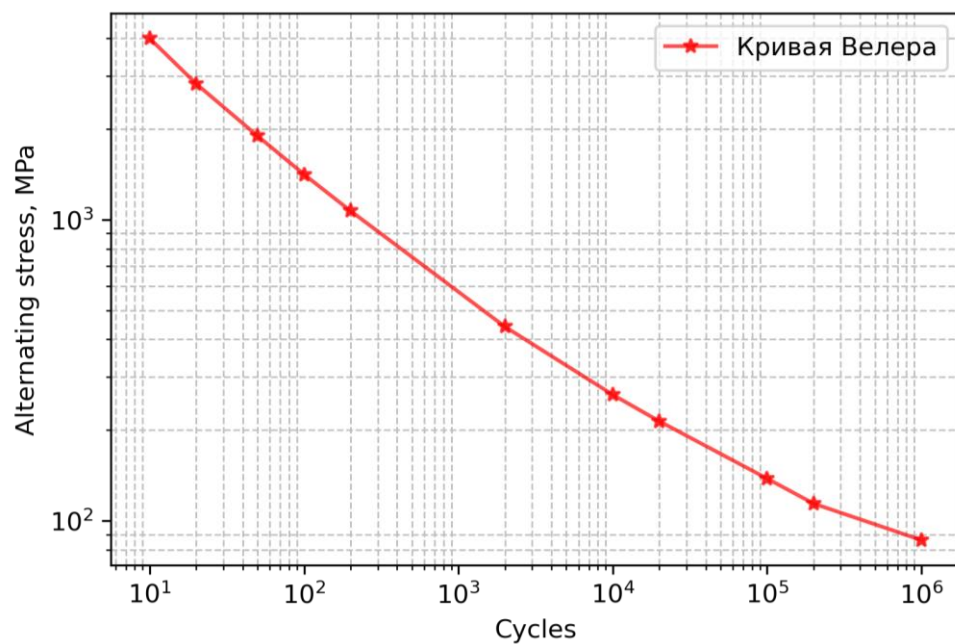


Рисунок 1.4 – Кривая Велера для Стали 20ГЛ.

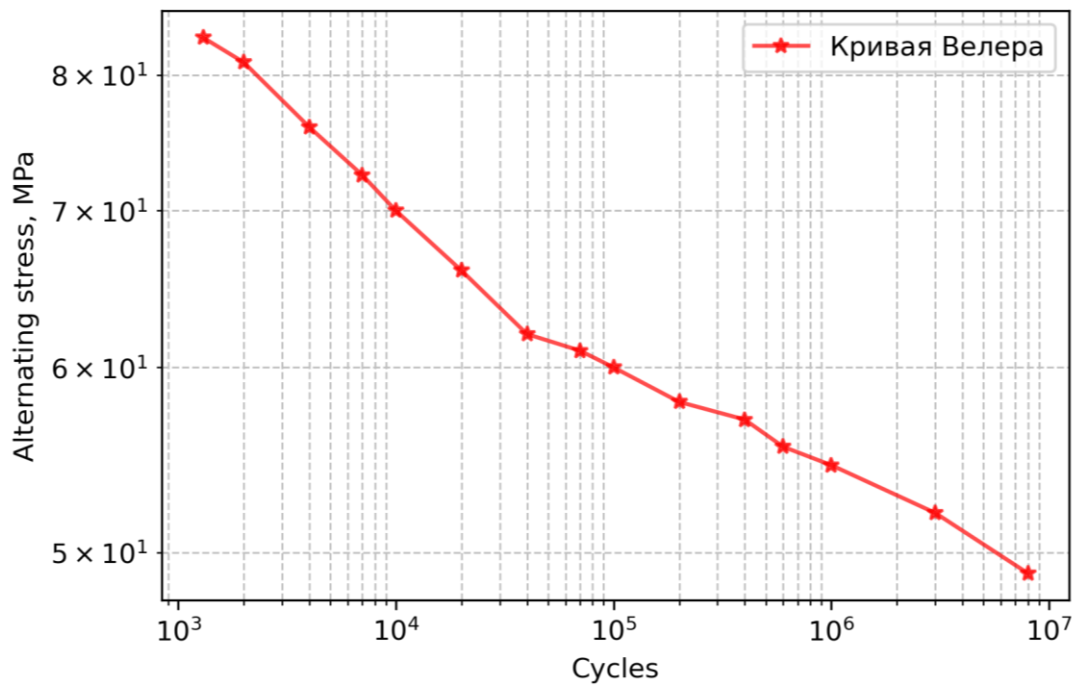


Рисунок 1.5 – Кривая Велера для композита «Армотен».

1.5 Формулировка задачи

Для данной работы была предоставлена геометрия 3D модели рабочего колеса закрытого типа центробежного насоса (рисунок 1.6).

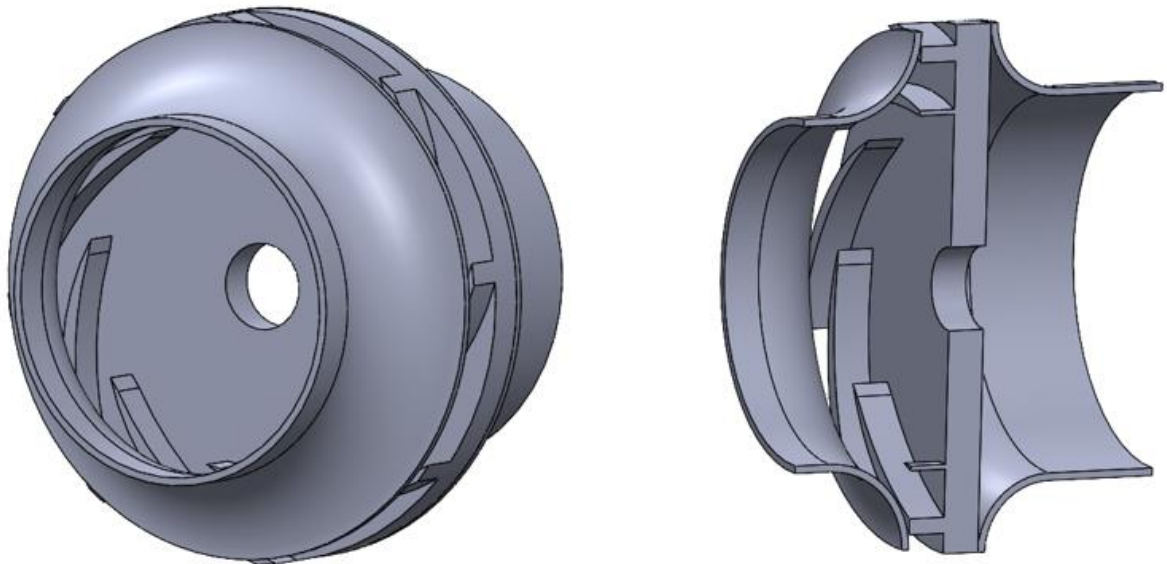


Рисунок 1.6 – Геометрия рабочего колеса насоса.

Необходимо:

1. Создать для выделенных областей – мест контакта рабочего колеса с корпусом насоса уплотнительные кольца (рисунок 1.7).
2. Задать новые материалы с определенными свойствами (п.1.4.3).
3. Построить конечно-элементную модель конструкции.
4. Приложить к конструкции граничные условия и нагрузки, которым она будет подвергаться во время ее эксплуатации.
5. Провести исследование напряженно-деформированного состояния конструкции.
6. Исследовать заданные материалы уплотнительных колец на усталостную прочность и сравнить результаты.

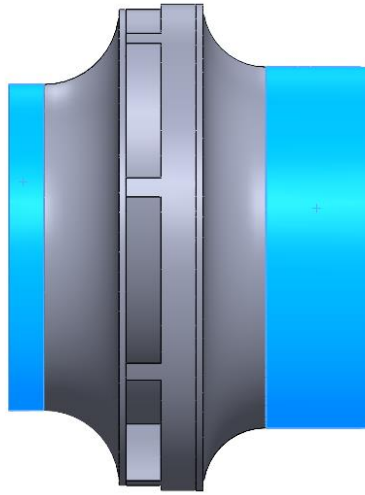


Рисунок 1.7 – Места расположения уплотнительных колец.

ГЛАВА 2. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА, ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ

Для решения поставленной задачи был использован программный пакет ANSYS Mechanical, использующий конечно-элементный метод для анализа [1]. Данный инструмент подходит для широкого спектра задач механики деформируемого твердого тела с линейными или нелинейными материалами, пластичностью и контактным взаимодействием, а также для задач линейной или нелинейной динамики.

2.1 Конечно-элементный метод (КЭМ)

Метод конечных элементов является методом приближенного численного решения физических задач. В его основе лежит два шага: разбиение тела (исследуемого объекта) на конечное число элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций [2].

После разбиения объекта на конечные элементы (далее по тексту КЭ) получается сетка из границ этих элементов. Места их пересечения называются узлами. Совокупность всех КЭ и узлов и является конечно-элементной моделью. Эта модель должна как можно более полно покрывать область объекта. Тип элемента, его размеры и форма определяются из формы исследуемого объекта и его напряженно-деформированного состояния.

Вид аппроксимирующей функции в каждом элементе выбирается произвольно, при этом за пределами своего элемента эта функция равна нулю. Для нахождения коэффициентов аппроксимирующей функции пользуются условием равенства значений функций на границах соседних элементов, то есть в узлах. Далее коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов и составляется система линейных алгебраических уравнений.

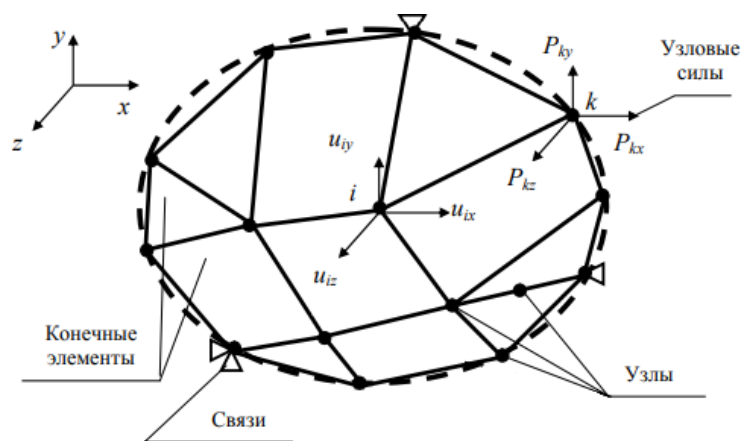


Рисунок 2.1 – Пример конечно-элементной модели.

2.2 Подготовка модели

2.2.1 Создание геометрии колец

В первую очередь в программном комплексе САПР SolidWorks создается геометрия исследуемых в будущем уплотнительных колец (выделены цветом). Для этого использовалась вкладка *Эскиз*, затем полученная окружность вытягивалась, и создавалось твердое тело, которое уже добавлялось в сборку к рабочему колесу.

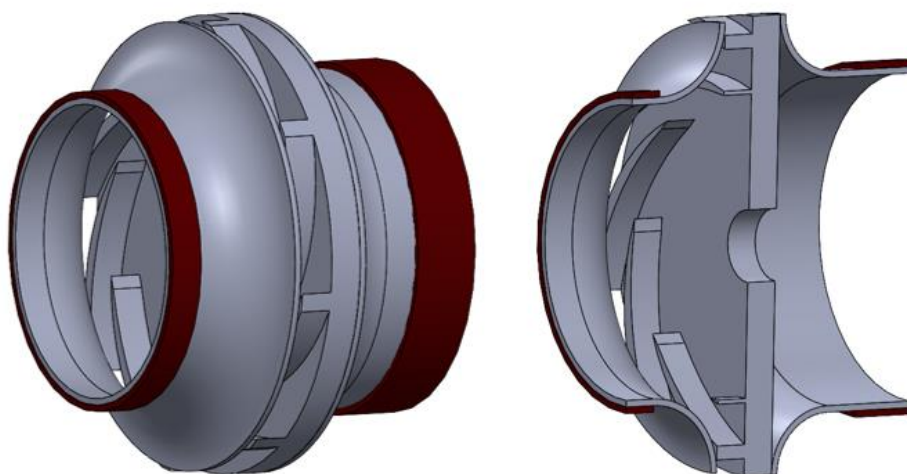


Рисунок 2.2 – Создание геометрии уплотнительных колец.

2.2.2 Создание материалов исследуемой модели

Создание новых материалов происходит во вкладке *Engineering Data*. Сначала создается имя материала, далее подгружаются и задаются интересующие нас свойства.

Как уже было сказано ранее, для исследования понадобятся материалы: Сталь 20ГЛ и композит «Армотен». Рабочее колесо будет во всех случаях из марки Сталь 20ГЛ, в то время как уплотнительные кольца будут в одном случае из стали, в другом из «Армотена». Интересующие нас свойства, необходимые к заданию, указаны в главе 1.4.

2.2.3 Создание контактов

В данной задаче, наибольший интерес для нас представляют контакты между рабочим колесом и уплотнительными кольцами.

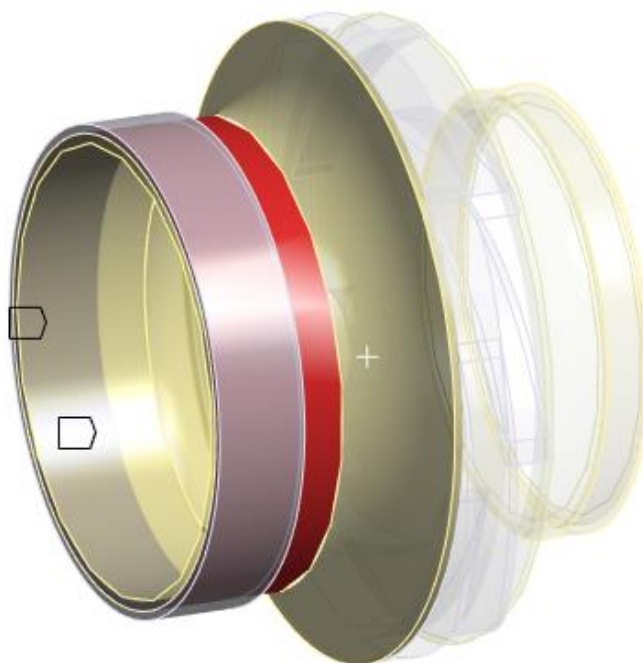


Рисунок 2.3 – Пример контактирующей поверхности.

Тип контакта задается *Bonded*, запрещающий перемещения поверхностей относительно друг друга (равносильно сварке деталей), поэтому задача будет линейной.

2.2.4 Создание конечно-элементной модели

Далее дополненная геометрия импортируется в ANSYS, где в дальнейшем в блоке *Static Structural* для нее создается конечно-элементная модель. Данный блок был использован по причине его удобства в проведении статического прочностного анализа. Несмотря на то, что исследуемая конструкция вращается вокруг оси, в первую очередь интерес для нас представляют напряжения и деформации, возникающие в ней.

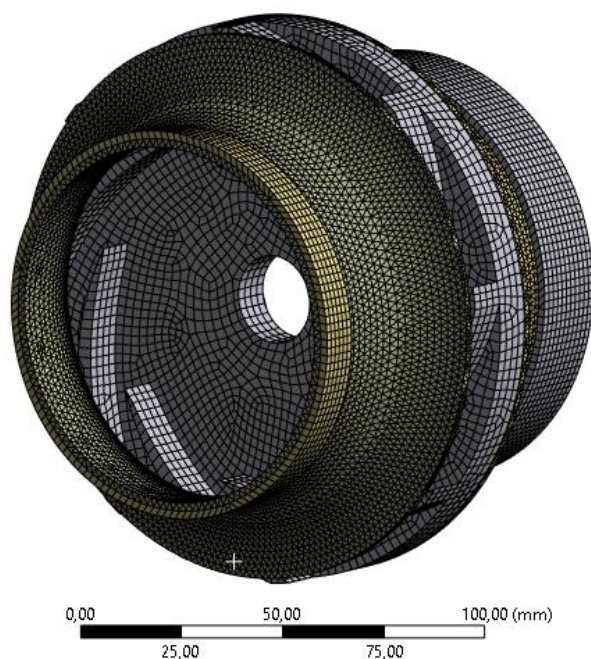


Рисунок 2.4 – Конечно-элементная модель рабочего колеса.

По мере возможности создавалась гексаэдрическая сетка для получения более точных результатов. С этой целью использовался метод построения сетки *Hex Dominant*. Там, где это было невозможно – использовались тетраэдры в качестве КЭ [3].

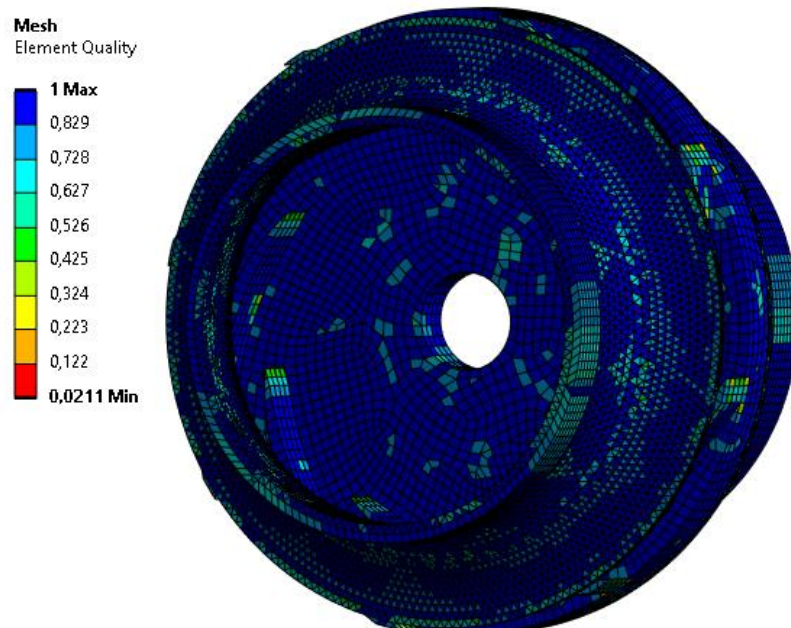


Рисунок 2.5 – Качество конечно-элементной сетки.

Как видно из рисунка 2.4, для примерно 90% элементов качество самих элементов превышает значение 0.83, что соответствует довольно качественной сетке для такой сложной геометрии.

Таблица 2.1

Данные полученной конечно-элементной сетки

Размер элемента	2–2.5 мм
Количество узлов	227842
Количество элементов	89692

2.3 Задание граничных условий и нагрузок

В качестве граничного условия принимается тип *Displacement*. В нем прописывается запрет перемещений по осям X и Z. Для удобства была также введена цилиндрическая система координат, где ось Y отвечает за повороты и была оставлена свободной. В качестве поверхности граничного условия было

выбрано место контакта или, говоря другими словами, «натяга» рабочего колеса насоса с вращающим его валом, а также задано натяжение при надевании колеса на вал в 0,05 мм (рисунок 2.5 слева).



Рисунок 2.6 – Задание граничных условий.

В качестве инерционной рабочей нагрузки была выбрана скорость вращения через команду *Rotation Velocity* (рисунок 2.5 справа). Скорость была выбрана как средний показатель среди центробежных насосов нефтепромышленной отрасли и равна 3000 оборотов в минуту. Для более точного моделирования поведения колец, конечно, можно было бы добавить поток перекачиваемой среды, дабы создать ее рециркуляцию через зазор из области повышенного давления со стороны нагнетания в зону пониженного давления со стороны всасывания. Но для этого потребуется провести гидродинамический расчет потока и построить модель самого корпуса насоса целиком, что сильно усложнит поставленную задачу, поэтому ограничимся лишь его раскручиванием до рабочих скоростей и рассмотрим задачу в упрощенной постановке.

2.4 Результаты расчета для материала Сталь 20ГЛ

После задания граничных условий и нагрузок были получены следующие результаты:

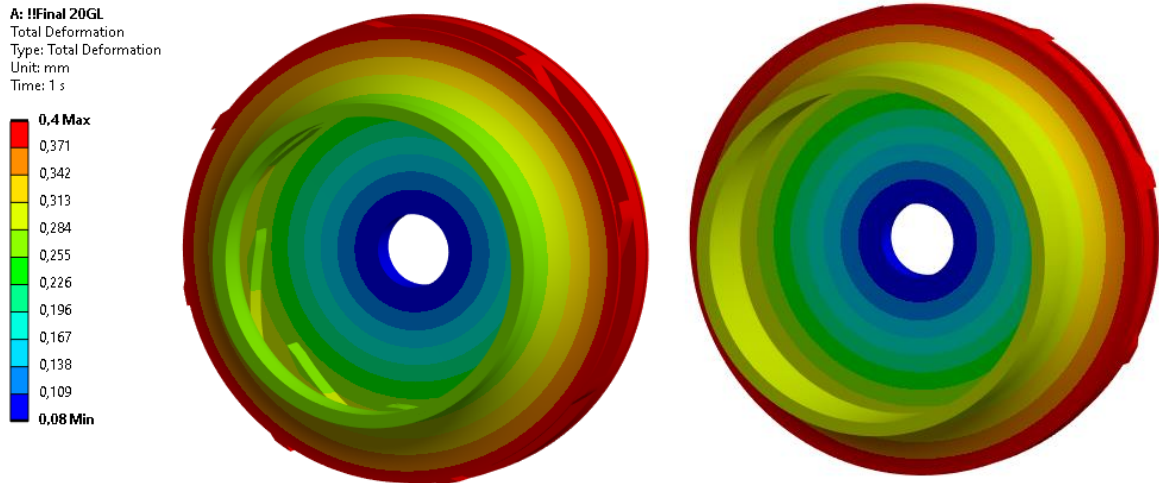


Рисунок 2.7 – Перемещения всей модели для материала Сталь 20ГЛ.

Из рисунка 2.7 видно, что максимальные перемещения достигают 0.4 мм, что соответствует физичности решения.

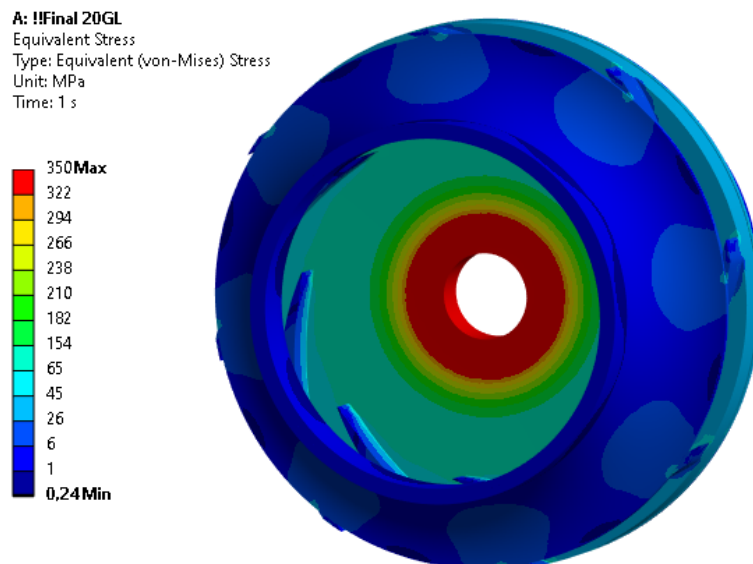


Рисунок 2.8 – Напряжения по Мизесу в модели для материала Сталь 20ГЛ.

По рисунку 2.8 видно, что около зоны натяга возникли напряжения, соответствующие пределу текучести материала, вследствие воздействия пластической деформации. Данное явление имеет название – нагартовка. В результате чего происходит упрочнение металла, из которого изготовлено рабочее колесо.

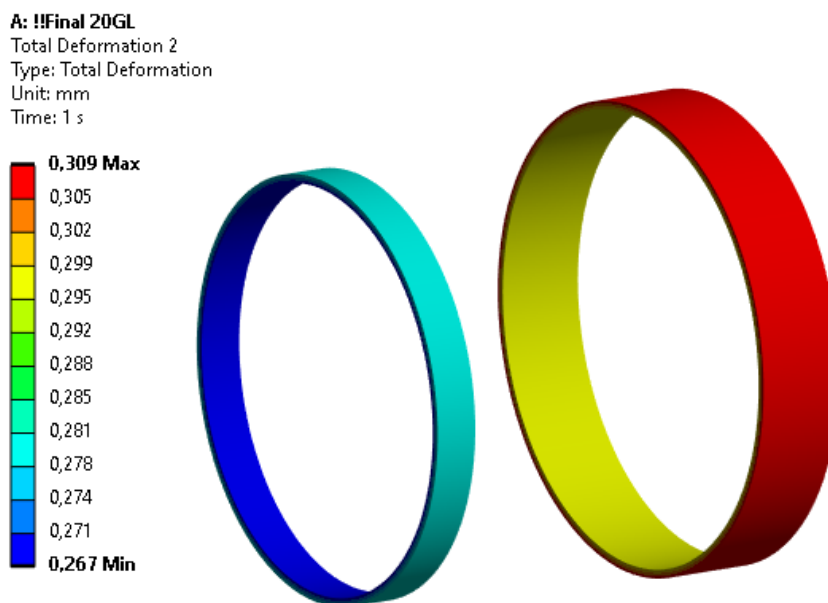


Рисунок 2.9 – Перемещения в уплотнительных кольцах из Стали 20ГЛ.

Для уплотнительных колец максимальные перемещения достигают отметки в 0.309 мм, что также соответствует физичности процесса при текущих граничных условиях и нагрузках.

Что касается напряжений в уплотнительных кольцах (рисунок 2.10), то здесь они гораздо меньше, чем во всей конструкции в целом, связано это с тем, что кольца находятся в отдалении от места натяжения колеса на вал и не подвергаются воздействию пластической деформации, следовательно, скачка напряжений не происходит.

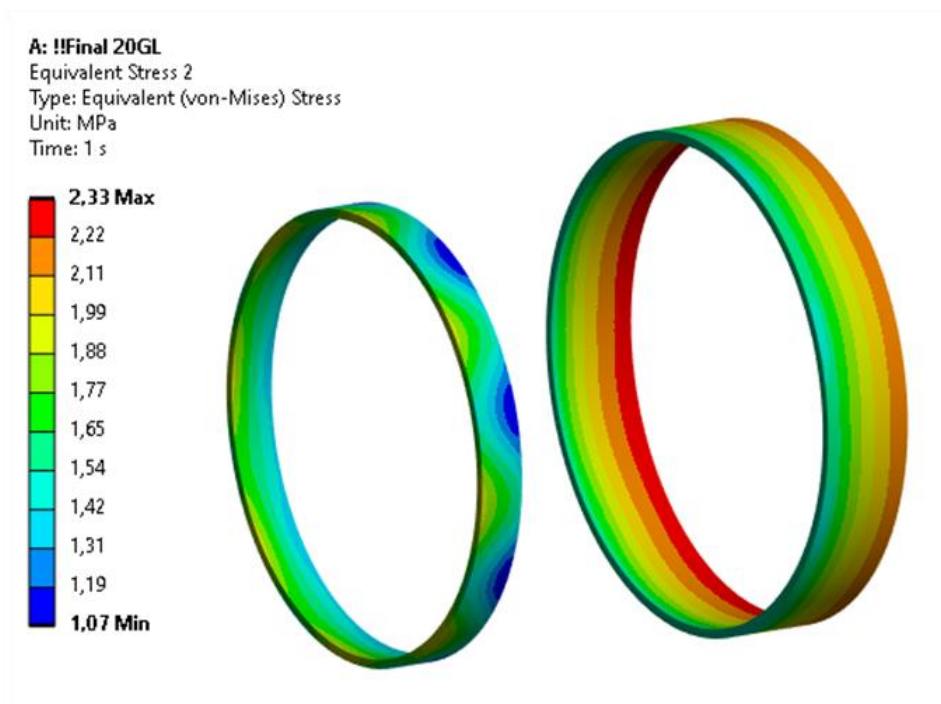


Рисунок 2.10 – Напряжения по Мизесу в уплотнительных кольцах из Стали 20ГЛ.

Для исследования на усталостную прочность подгружается модуль *Fatigue Tool* и выбираем интересующие нас элементы модели. Тип нагрузки выбирается *Zero-Based*, тогда результат будет отображать количество циклов запуска части конструкции при текущих нагрузках. Что касается жизненного цикла рабочего колеса (рисунок 2.11), то, судя по графику, в месте натяжения на вал количество циклов запуска 833, но для более точного результата необходимо посчитать среднее число циклов для точек, отстоящих от места натяга на 2 элемента. Взятые точки отображены на рисунке 2.12, и среднее значение для них получилось 7500 циклов.

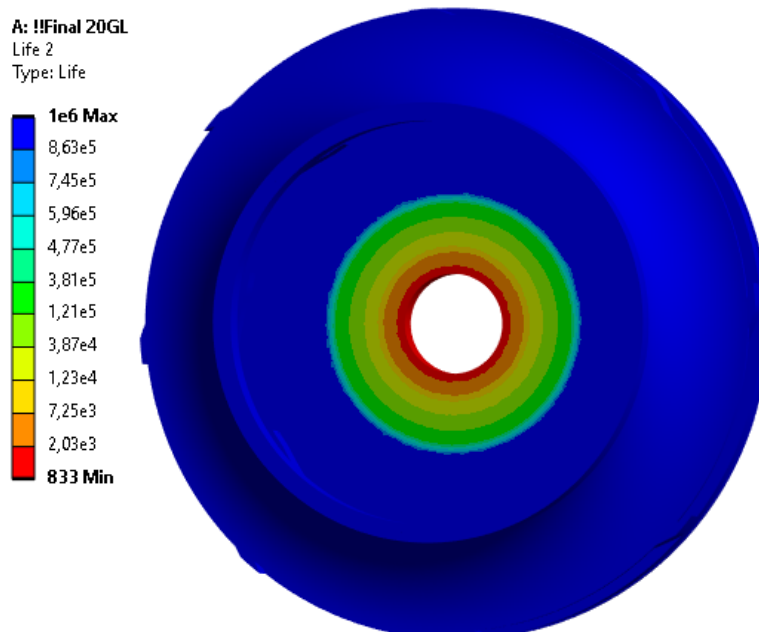


Рисунок 2.11 – Жизненный цикл рабочего колеса (Саль 20ГЛ).

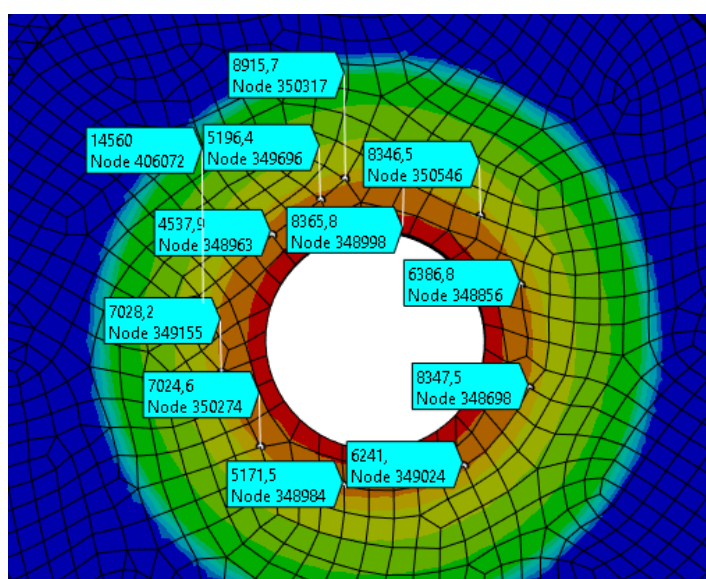


Рисунок 2.12 – Осреднение количества циклов (Сталь 20ГЛ).

Но больший интерес для нас, конечно, представляют уплотнительные кольца. Результат исследования на усталостную прочность для колец представлен на рисунке 2.13 [4]. Как видно из графика, при таких малых напряжениях, которые возникают при текущих заданных нагрузках, количество циклов достигает максимальных значений.

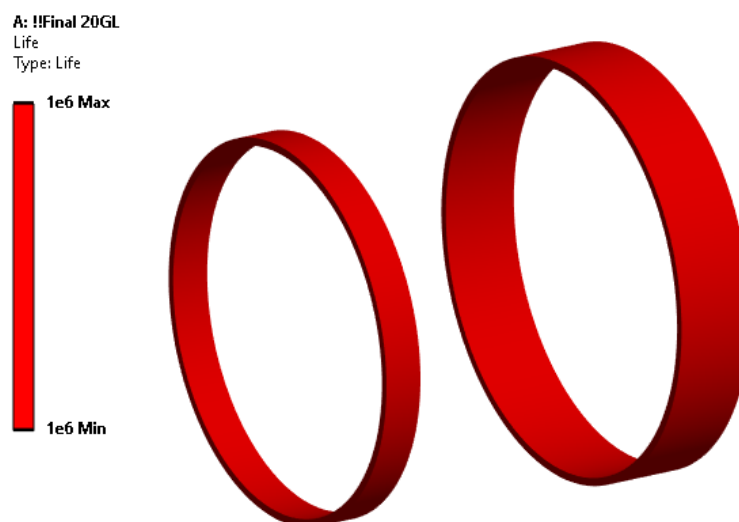


Рисунок 2.13 – Жизненный цикл уплотнительных колец (Сталь 20ГЛ).

Далее проведем анализ свободных колебаний конструкции рабочее колесо – уплотнительные кольца в модуле *Modal*. При упомянутом анализе к конструкции не прикладываются нагрузки. Число исследуемых мод зададим равным 6. Результаты представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Собственные колебания

Мода	Собственная частота, Гц
1	0
2	1112,7
3	1112,8
4	1288,5
5	2070,5
6	2070,6

Из представленных результатов можно сказать, что данную часть конструкции можно свободно использовать для частот до 1000 Гц.

2.5 Результаты расчета для материала «Армотен»

Для материала «Армотен» максимальные перемещения составляют 2.6 мм, что соответствует заданным граничным условиям и нагрузкам. По сравнению с результатами предыдущего материала показатели перемещений увеличились на порядок. Стоит также еще раз упомянуть, что материал рабочего колеса Сталь 20ГЛ, из «Армотена» выполнены только уплотнительные кольца.

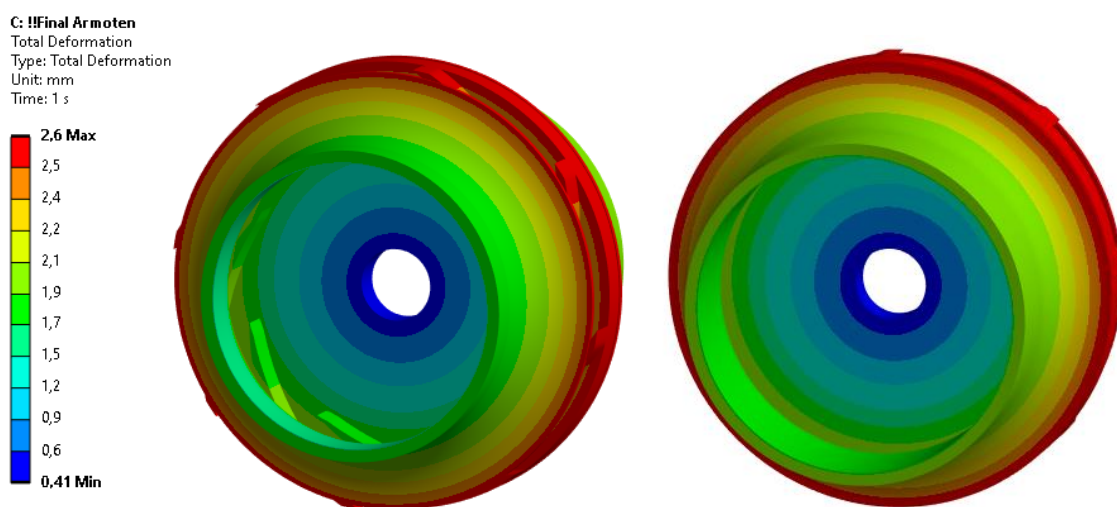


Рисунок 2.14 – Перемещения всей модели для материала «Армотен».

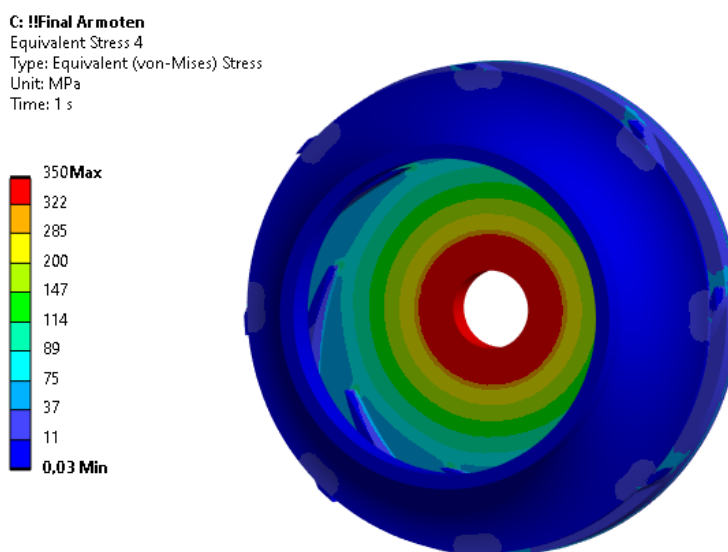


Рисунок 2.15 – Напряжения по Мизесу в модели для материала «Армотен».

Для напряжений во всей модели (рисунок 2.15), несмотря на другой материал уплотнительных колец, картина почти не изменилась, ввиду отдаления места установки колец от места натяга колеса на вал. Все также наблюдается явление нагартовки.

Для уплотнительных колец максимальные перемещения примерно 2 мм, что физично для текущих нагрузок (рисунок 2.16). Как было отмечено ранее данный показатель возрос на порядок в сравнении с материалом Сталь 20ГЛ.

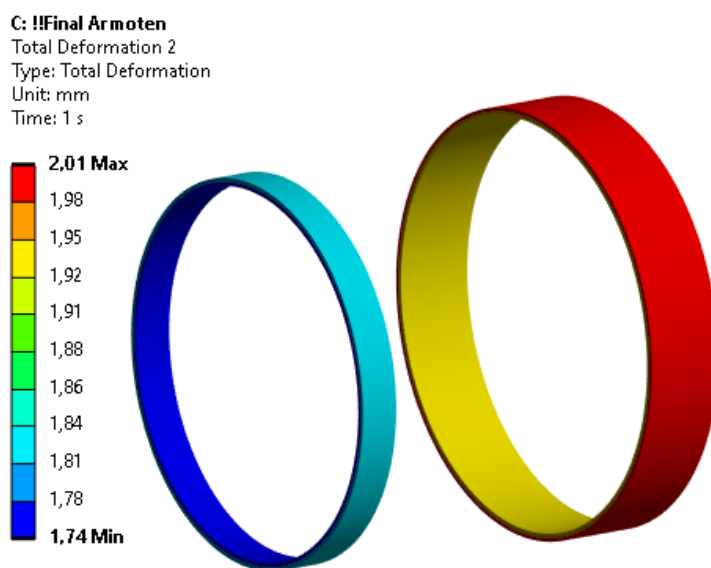


Рисунок 2.16 – Перемещения уплотнительных колец из «Армотена».

Снова переходя к напряжениям в кольцах, стоит отметить, что в отличие от перемещений, картина для напряжений изменилась в другую сторону. Для «Армотена» напряжения на порядок меньше в сравнении со Сталью 20ГЛ. Максимальные значения «Армотена» достигают отметки всего 0.147 МПа против 2.33 МПа стали.

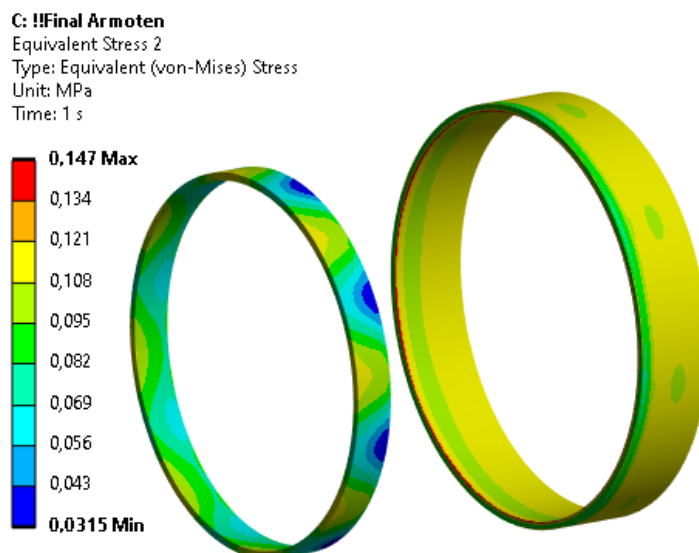


Рисунок 2.17 – Напряжения по Мизесу в уплотнительных кольцах из «Армотена».

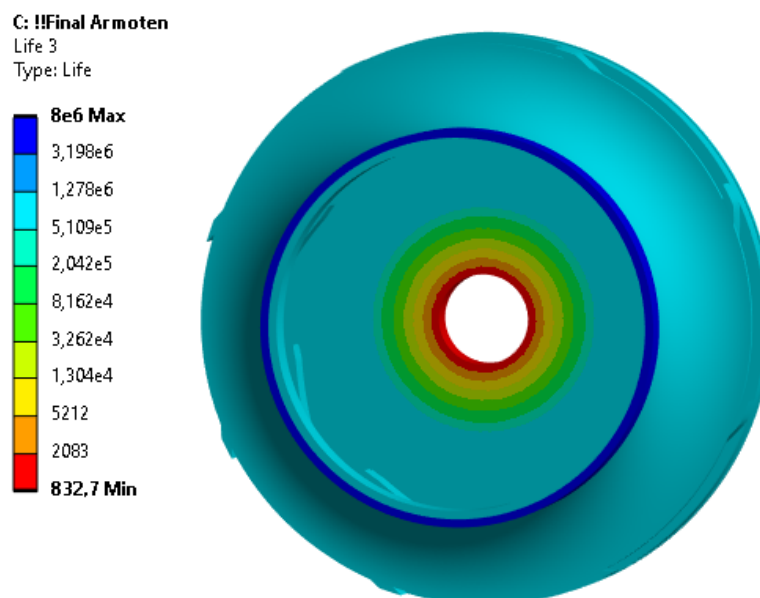


Рисунок 2.18 – Жизненный цикл рабочего колеса (Армотен).

Для жизненного цикла рабочего колеса с кольцами из «Армотена» (рисунок 2.18) проводим те же действия. Выбираем значения в точках, отстоящих от места контакта с валом на два элемента, и считаем среднее значение. Взятые точки отображены на рисунке 2.19, и среднее значение для

них получилось 7600 циклов. Вполне очевидно, что отличий от предыдущего опыта практически не будет, поскольку материал рабочего колеса остался неизменным – Сталь 20ГЛ.

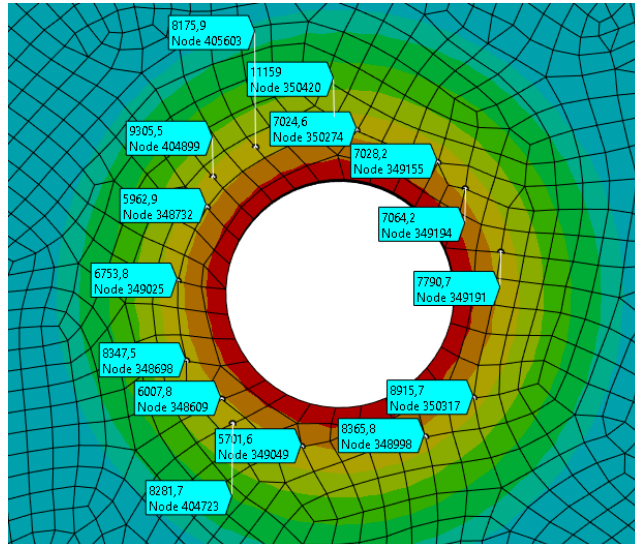


Рисунок 2.19 – Осреднение количества циклов (Армотен).

Теперь перейдем к анализу на усталостную прочность непосредственно колец (рисунок 2.20). Видно, что при получившихся малых напряжениях количество циклов, которое способны выдержать кольца, становится максимальным.

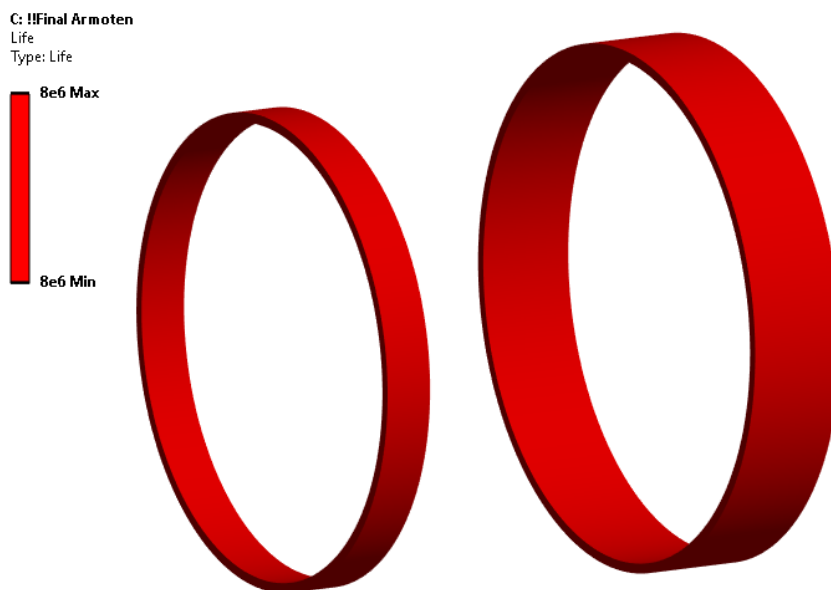


Рисунок 2.20 – Жизненный цикл уплотнительных колец (Армотен).

Далее также проводится анализ свободных колебаний конструкции. Число исследуемых мод все также оставляем равными 6. Результаты представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Собственные колебания

Мода	Собственная частота, Гц
1	0
2	1206,1
3	1206,2
4	1382,4
5	2147,5
6	2147,6

Из полученных результатов можно сказать, что безопасные частоты работы части конструкции с кольцами из «Армотена» остаются примерно

такими же, как и в случае с кольцами из Стали 20ГЛ – до 1000Гц. Но все равно стоит отметить незначительный рост в показателях частоты.

2.6 Дополнительное исследование

Как видно по результатам, представленным в п. 2.4–2.5, при исследовании жизненного цикла уплотнительных колец ввиду малых, возникших в конструкции, напряжениях сравнить жизненные циклы не удастся, поскольку при заданных нагрузках число циклов для обоих видов колец – максимально. Поэтому будет проведено еще одно исследование.

При текущих рабочих нагрузках показатель максимального количества циклов был достигнут ввиду упрощенной задачи. Не было учтено давление потока среды, его контакт с поверхностью рабочего колеса и рециркуляция жидкости через зазор между корпусом и уплотнительными кольцами. Все эти факторы несомненно играют роль в долговечности используемых деталей. Поэтому ввиду компенсации перечисленных внешних воздействий будет увеличена текущая нагрузка, а конкретно – скорость вращения рабочего колеса. Изначально этот показатель был равен 3000 оборотов в минуту. Для проведения дополнительного исследования был взят показатель в 30000 оборотов в минуту. Это уже не рабочая нагрузка, но выбор данной скорости обосновывается тем, чтобы как можно сильнее увеличить напряжения во вращающейся конструкции, с целью уменьшить количество жизненных циклов. Результаты можно наблюдать на рисунках 2.20–2.23.

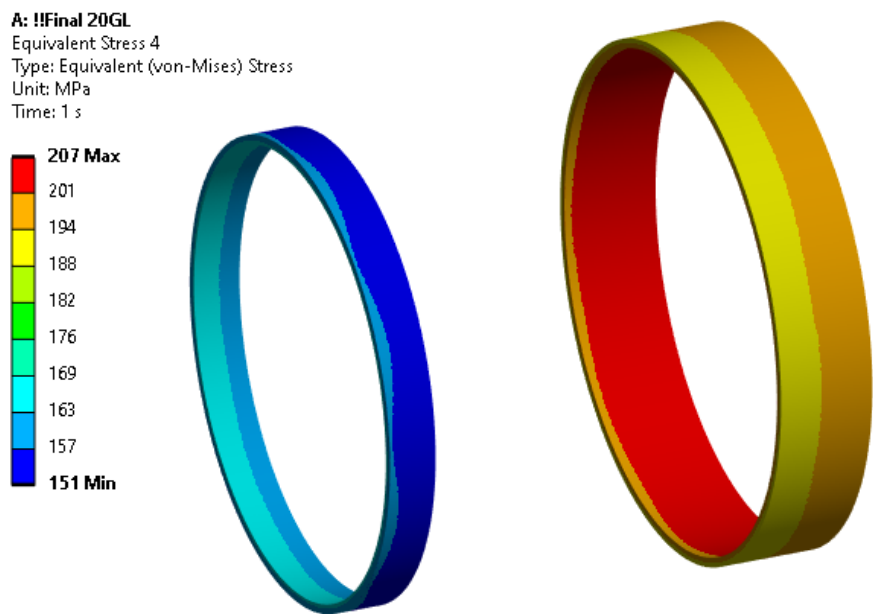


Рисунок 2.21 – Напряжения по Мизесу в уплотнительных кольцах на скорости 30000 об/мин (Сталь 20ГЛ).

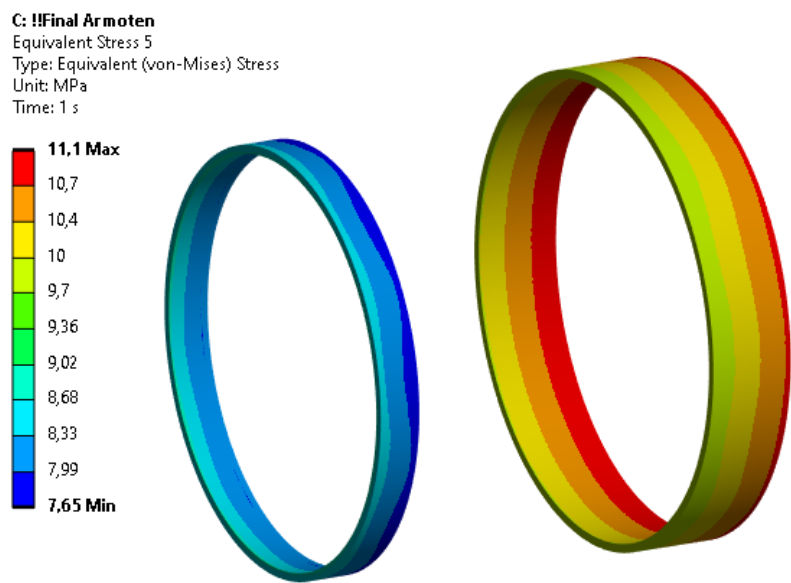


Рисунок 2.22 – Напряжения по Мизесу в уплотнительных кольцах на скорости 30000 об/мин (Армотен).

Как можно видеть из рисунков 2.21 – 2.22 напряжения в уплотнительных кольцах из «Армотена» почти в 20 раз меньше, чем в кольцах их стали (11МПа против 207 МПа).

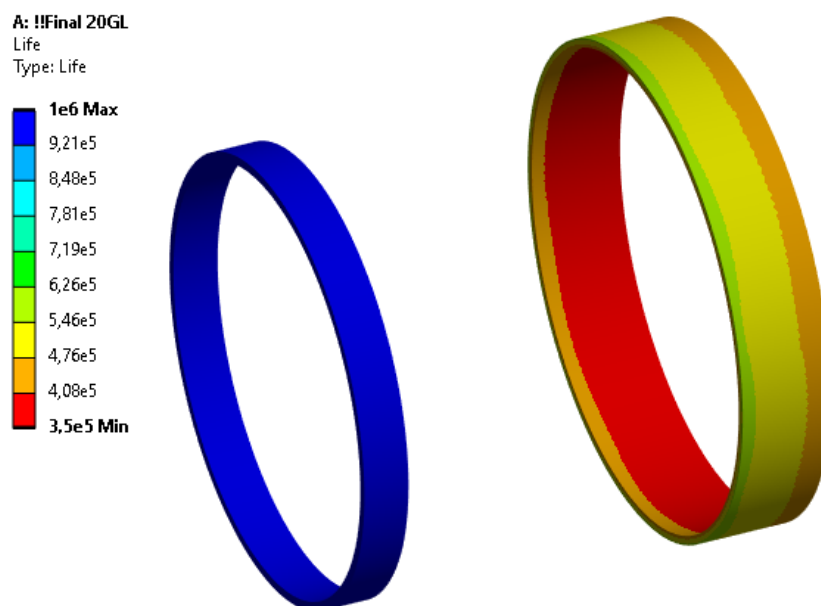


Рисунок 2.23 – Жизненный цикл уплотнительных колец на скорости вращения 30000 об/мин (Сталь 20ГЛ).

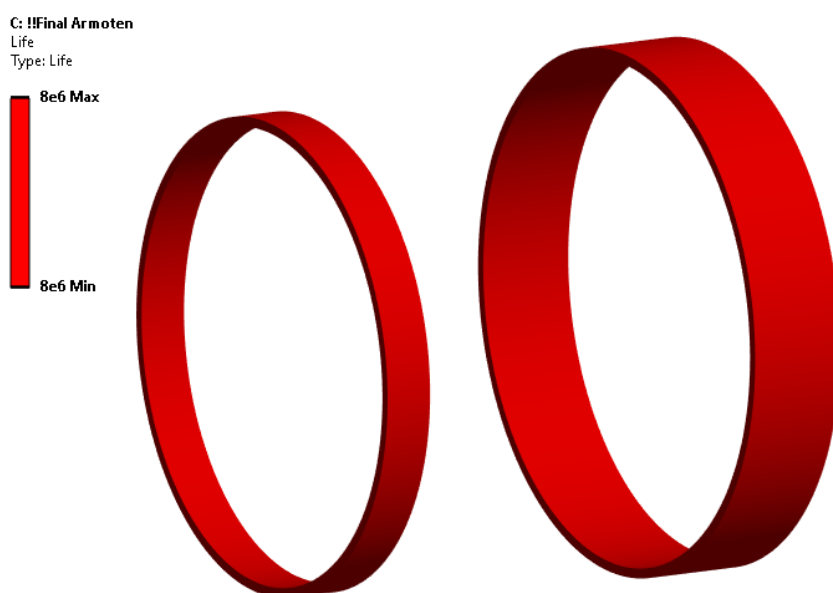


Рисунок 2.24 – Жизненный цикл уплотнительных колец на скорости вращения 30000 об/мин (Армотен).

Что касается жизненных циклов: при одинаковых нагрузках в кольцах из «Армотена» все также достигается максимальное количество циклов до разрушения. Для колец из стали подобного сказать нельзя. Минимальное количество циклов, которое способны выдержать кольца из стали – 350 тыс. Это на порядок меньше, чем показатель для «Армотена», минимальный показатель для которого – 8 млн. Вероятно, что 8 млн циклов – не предел для «Армотена» при текущих нагрузках, поэтому раскрутим конструкцию до 100 тыс. оборотов в минуту.

В этот раз предел на минимальное количество циклов был достигнут и составляет около 52 тыс. (рисунок 2.25).

По результатам исследования можно сказать, что наилучший результат в исследовании на усталостную прочность показал композитный материал «Армотен».

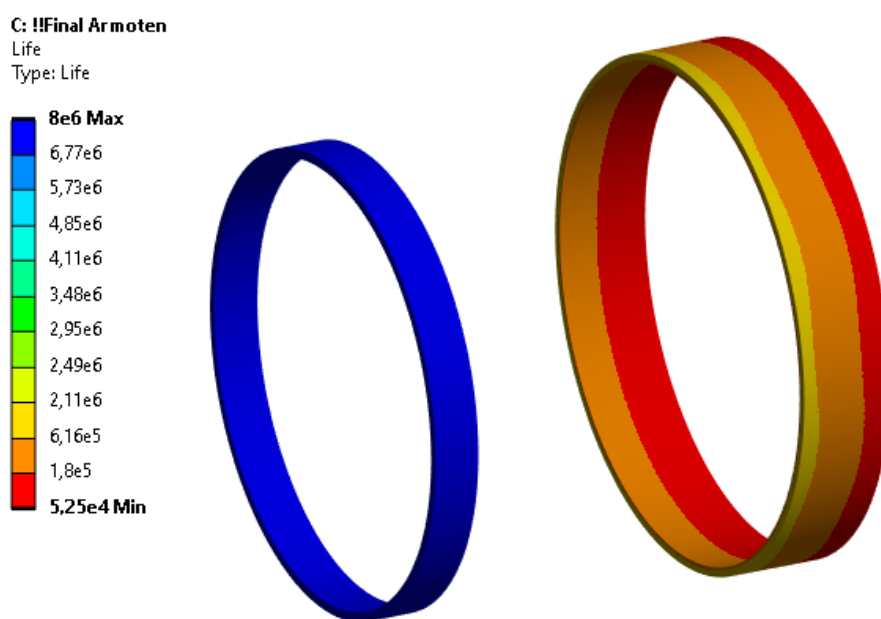


Рисунок 2.25 – Жизненный цикл уплотнительных колец на скорости вращения 100000 об/мин (Армотен).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе была рассмотрена задача о прочностном расчете уплотнительных колец в насосе магистрального нефтепровода.

Были созданы и подготовлены к расчету геометрическая и конечно-элементная модели рабочего колеса насоса и уплотнительных колец. Были заданы свойства исследуемых материалов (Сталь 20ГЛ и композит «Армотен»). Заданы упрощенные нагрузки на рассматриваемую конструкцию. Были получены данные о перемещениях и напряжениях, возникающих в модели. Проведен анализ на собственные частоты. Проведено исследование материалов «Армотен» и Сталь 20 ГЛ на усталостную прочность.

Исходя из результатов проведенных расчетов очевидно преимущество современного композитного материала для использования в центробежных насосах. К большей долговечности конструкции, а это значит: меньше затрат на ремонт и меньшее время простоя, прилагается еще несколько преимуществ композита:

- Стойкость к агрессивным средам
- Уменьшение веса конструкции (низкая плотность)
- Снижение риска кавитации

Также, особого внимания заслуживает тот факт, что допустимый зазор между корпусом и уплотнительным кольцом при использовании композита почти в два раза меньше, чем для стали. Это значит, что давление в области нагнетания становится выше, повышается стойкость к вибрациям, а значит и возрастает КПД самого насоса. Подобная, казалось бы, незначительная деталь, как уплотнительное кольцо, при правильном подборе материала исполнения может повысить КПД насоса от 2 до 5%. В рамках данной выпускной квалификационной работы это было доказано.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бруякова В. А. Б 89 Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Бруякова, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Вдеянова. – Самара: Самара. гос. техн. ун-т, 2010.-217с.:ил.
2. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов: учебник для вузов/ В.М.Вержбицкий. — Изд. 5-е. — Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2021. — 848 с.
3. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. М.: Мир, 1975.- 541 с.
4. Межецкий Г.Д. Сопротивление материалов: Учебник / Г.Д. Межецкий, Г.Г. Загребин, Н.Н. Решетник; под общ. Ред. Г.Д. Межецкого, Г.Г. Загребина.- 5-е изд., - М. 2016.- 432с.
5. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия. 2006. 624 с.
6. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии. 2009. 660 с.
7. Норри Д, Де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов / Пер. с англ. М.: Мир, 1981. – 304 с.
8. Спиридонов Е.К., Прохасько Л.С. Расчет и проектирование лопастных насосов: Учебное пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 62с.
9. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов : учеб.-метод. Комплекс для студ. спец. 1-70 05 01 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» / сост. В. К. Липский, М. Е. Демидова. – Новополюцк : ПГУ, 2007. – 312 с.
10. Центробежные насосы для нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности / Международный стандарт // Пер. с англ. – Зайцев Н. А. М.: 2008. – 183 с.

11. Kaw, Autar K. Mechanics of composite materials / Autar K. Kaw.--2nd ed., 2006. 457p.

12. Саморядов А.В. Свойства и применение стеклонаполненных полифениленсульфидов / Саморядов А.В., Иванов В.Б., Калугина Е.В. // Российский химический журнал. 2020. Т. 64. № 4. С. 3-17.

13. Courant R. Variational Method for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. Bull. Amer. Math. Soc., 49, 1943, p. 1-43.

14. Механические свойства стали 20ГЛ [Электронный ресурс]. URL: <https://metal.place/ru/wiki/20gl/> (дата обращения: 10.05.2023).

15. Краткие технические характеристики полифениленсульфида. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.olenta.ru/catalog/product/fz-1130-d5-pfs.php> (дата обращения 10.05.2023).

16. Composite centrifugal pump wear rings [Электронный ресурс]. URL: <https://bouldencompany.com/components/pump-wear-rings/> (дата обращения: 10.05.2023).