

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Нефти и газа
Технологические машины и оборудование нефтегазового комплекса

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
 Э.А. Петровский
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2017 г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

в форме бакалаврской работы

Студенту Морозовой Валентине Александровне
фамилия, имя, отчество

Группа ГБ 13-07 Направление (специальность) 21.03.01
номер код

Нефтегазовое дело
наименование

Тема выпускной квалификационной работы: Разработка уточненной методики инженерного расчета контактных напряжений в опорах вала буровой лебедки.

Утверждена приказом по университету № _____ от _____

Руководитель ВКР С.Г. Докшанин, кафедра ТМиОНГК, канд.техн.наук, доцент
инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР:

1) Материалы информационно-патентного поиска по методам повышения долговечности подшипников качения. 2) Технические характеристики буровой лебедки ЛБУ-1100. 3) Методика расчета в среде Elcut.

Перечень разделов ВКР:

1) Информационные исследования по вопросу использования IT-технологий в инженерных расчетах. 2) Устройство и условия эксплуатации буровых лебедок. 3) Анализ причин выхода из строя подшипниковых опор вала буровой лебедки. 4) Расчет контактных напряжений в подшипниках качения с помощью пакета Elcut.

Перечень графического материала:

1) Цели и задачи работы. 2) Устройство буровых лебедок и опор вала. 3) Программы и методы инженерных расчетов с использованием САЕ – программ 4) Результаты расчетов в среде Elcut. 5) Выносимое на защиту предложение. 6) Заключение по работе.

Руководитель ВКР _____
подпись

С.Г. Докшанин
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению _____ В.А.Морозова
подпись, инициалы и фамилия студента

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка уточненной методики инженерного расчета контактных напряжений в опорах вала буровой лебёдки» содержит 77 страниц текстового документа, 4 приложения, 30 использованных источников литературы, графический материал: чертежи 2 листа.

БУРОВАЯ ЛЕБЁДКА, ПОДЪЁМНЫЙ ВАЛ, ПОДШИПНИКОВЫЕ ОПОРЫ, ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ, РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ELCUT.

Объект работы – подшипниковая опора подъёмного вала буровой лебёдки ЛБУ-1100.

Результат классических методик расчета контактных напряжений при взаимодействии тел, не учитывающих реальные условия, является приближенным. Это определило актуальность работы, целью которой является разработка уточненной методики инженерного расчета контактных напряжений в подшипниковых опорах подъёмного вала буровой лебёдки.

В работе приведен анализ наиболее распространенных программных пакетов, применяемых для проведения инженерных расчётов. Описан программный пакет ELCUT, выбранный для проведения исследования, рассмотрены этапы проектирования модели, а также характеристики, описывающие исследуемый объект. Приведена расчетная схема, включающая зону скольжения и сцепления.

Приведен расчет подшипниковой опоры вала буровой лебёдки с помощью программного пакета, проанализированы полученные значения напряжений, представленные в виде цветных карт и графиков распределений.

По результатам расчета сформулированы выводы, указывающие на преимущества использованной методики расчета контактных напряжений, которая по сравнению с описанными классическими методиками позволяет произвести более точный расчет необходимых параметров.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| 1 Анализ эксплуатации и расчета опор вала буровых лебедок..... | 6 |
| 1.1 Общее устройство и применение буровых лебедок..... | 6 |
| 1.2 Опоры подъемного вала буровых лебедок..... | 14 |
| 1.3 Причины выхода из строя подшипников качения вала буровой лебедки. . | 18 |
| 1.4 Методы расчета опор с подшипниками качения..... | 21 |
| 1.4.1 Износо-контактные задачи..... | 23 |
| 1.4.2 Численные методы решения контактных задач..... | 29 |
| 1.5 Выводы..... | 32 |
| 2 Применение программных пакетов для расчета опор качения..... | 34 |
| 2.1 Обзор программного обеспечения..... | 34 |
| 2.2 Описание программного пакета ELCUT..... | 39 |
| 2.3 Выводы..... | 41 |
| 3 Анализ расчетной схемы и алгоритма для решения задач упругости в подшипниковой опоре качения..... | 42 |
| 3.1 Расчетная схема..... | 42 |
| 3.2 Алгоритм решения задач упругости в программном пакете ELCUT..... | 45 |
| 3.3 Выводы..... | 54 |
| 4 Расчет контактных напряжений в опорах вала буровой лебедки..... | 55 |
| 4.1 Исходные данные для расчета..... | 55 |
| 4.2 Расчет..... | 55 |
| 4.3 Анализ произведённого расчета..... | 59 |
| 4.4 Выводы..... | 64 |
| Заключение..... | 66 |
| Список использованных источников..... | 68 |
| Приложение А Распределение физических величин по поверхности..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Приложение Б Распределение физических величин на площадке сцепления по глубине..... | 73 |
| Приложение В Распределение физических величин на площадке скольжения по глубине..... | 75 |
| Приложение Г Комплект чертежей..... | 77 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование с использованием компьютерного моделирования очень часто применяется в различных сферах деятельности человека. Моделирование в целях упрощения научных изысканий начали использовать еще в глубокой древности и со временем стали использовать практически во всех сферах науки: в конструировании, строительстве и архитектуре, астрономии, физике, химии, биологии и, в конце концов, в общественных науках.

Большинство задач, с которыми на данный момент сталкиваются исследователи и инженеры, не поддаются аналитическому решению или на их реализацию требуются огромные затраты сил и времени. Развитие в области реализации численных расчетных методов и моделирования с использованием компьютерного обеспечения дает возможность решать задачи более широкого круга. Данные, полученные при использовании таких методов решения задач, применяются практически во всех областях техники.

Укрупненный порядок решения классической инженерной задачи состоит из следующих основных этапов:

- предварительный анализ задачи;
- препроцессинг (CAD-технологии);
- решение (CAE-технологии);
- постпроцессинг (анализ и оценка);
- испытания (CAT-технологии).

Шаг предварительного анализа задачи подразумевает определение типа решаемой задачи и объекта моделирования. В основном, инженерные задачи, решаемые при помощи компьютерного моделирования, разделяются на следующие направления:

-прочность (движение твердых тел, давление твердого тела, контакт твердых тел);

- тепло (нагревание, высокие температуры, изменение температуры);

-электромагнетизм (устройство под действием постоянного или переменного тока, электромагнитные волны, возбуждение напряжений или заряда).

-жидкость (движение жидкости или газов в ограниченном объеме);

-газодинамика (движение объекта в воздушном либо жидкостном потоке);

-мультифизика (любая комбинация вышеперечисленных величин);

-связанные задачи.

Задача определения контактных напряжений имеет большое значение для расчета на прочность подшипников, зубчатых и червячных передач, шариковых и цилиндрических катков, кулачковых механизмов и других деталей машин. Использование программных пакетов для компьютерного моделирования упрощает решение подобного рода задач.

На данный момент существует большое количество программных продуктов, используемых для решения инженерных задач практически во всех отраслях техники. Метод конечных элементов, который является численным методом решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики, является основным методом для таких расчетных программ. Данный метод широко применяется для нахождения решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. Это позволяет решить большой круг инженерных задач, что иногда бывает невозможно при применении в расчетах с использованием классических методов.

1 Анализ эксплуатации и расчета опор вала буровых лебедок

1.1 Общее устройство и применение буровых лебедок

Буровые лебёдки являются одними из главных агрегатов буровых установок, от них напрямую зависит эффективность бурения.

Этот механизм предназначен для проведения спуско-подъёмных операций в буровом комплексе. В процессе спуско-подъёмной операции лебёдка выполняет следующие технологические функции:

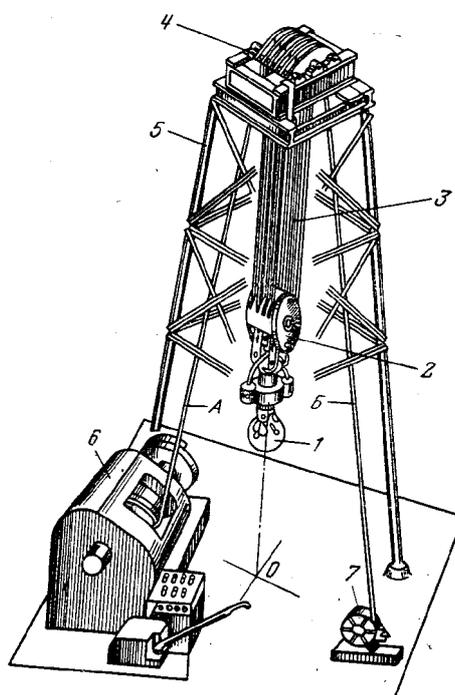
- 1) Поддержание необходимой нагрузки на долото и подача буровой колонны при пробуривании забоя;
- 2) Спуск и подъём ловильного инструмента и контрольно-измерительных приборов, спуск обсадных колонн в скважину;
- 3) Нарращивание труб при углублении скважины;
- 4) Спуск и подъём бурильной колонны для замены долота, извлечения керна и забойного двигателя.

При необходимости буровые лебёдки применяют при подаче мощности ротору, перемещении грузов и выполнении других работ.

Работа буровой лебедки описана ниже. Коробка переменных передач передает вращательное воздействие подъёмному валу лебёдки. К барабану прикреплен талевый канат, это означает, что вращательное движение барабана лебедки переходит в движение поступательное талевого каната и прикрепленного к нему талевого блока и крюка. Процесс смотки – намотки талевого каната на барабан лебедки зависит от направления вращения барабана. При наматывании происходит подъём талевого блока и крюка, при сматывании талевый блок и крюк опускаются. При подъеме крюка при помощи вращения

барабана происходит затрата мощности и энергии, спуск же происходит под действием силы тяжести без затраты мощности. Поэтому в буровых лебёдках применяют системы тормозов, чтобы предотвратить любые аварийные ситуации при спуске каната под действием силы тяжести[1].

Лебёдки являются оборудованием для буровых установок, монтируются на платформе и применяются для проведения спуско-подъёмных операций, следовательно, являются частью подъёмного оборудования (рисунок 1.1).



1 – крюк, 2 – талевый блок, 3 – стальной канат, 4 – кронблок, 5 – верхняя площадка буровой вышки, 6 – лебёдка

Рисунок 1.1 – Буровая лебёдка в составе спуско-подъёмного комплекса

Буровой установкой называют комплекс наземного и подземного оборудования, применяемого для осуществления процесса бурения нефтяной или газовой скважины.

Весь комплекс оборудования, установленный на буровой установке условно можно разделить на следующие подгруппы:

1 - буровая вышка в составе с талевой системой, буровой лебёдкой,

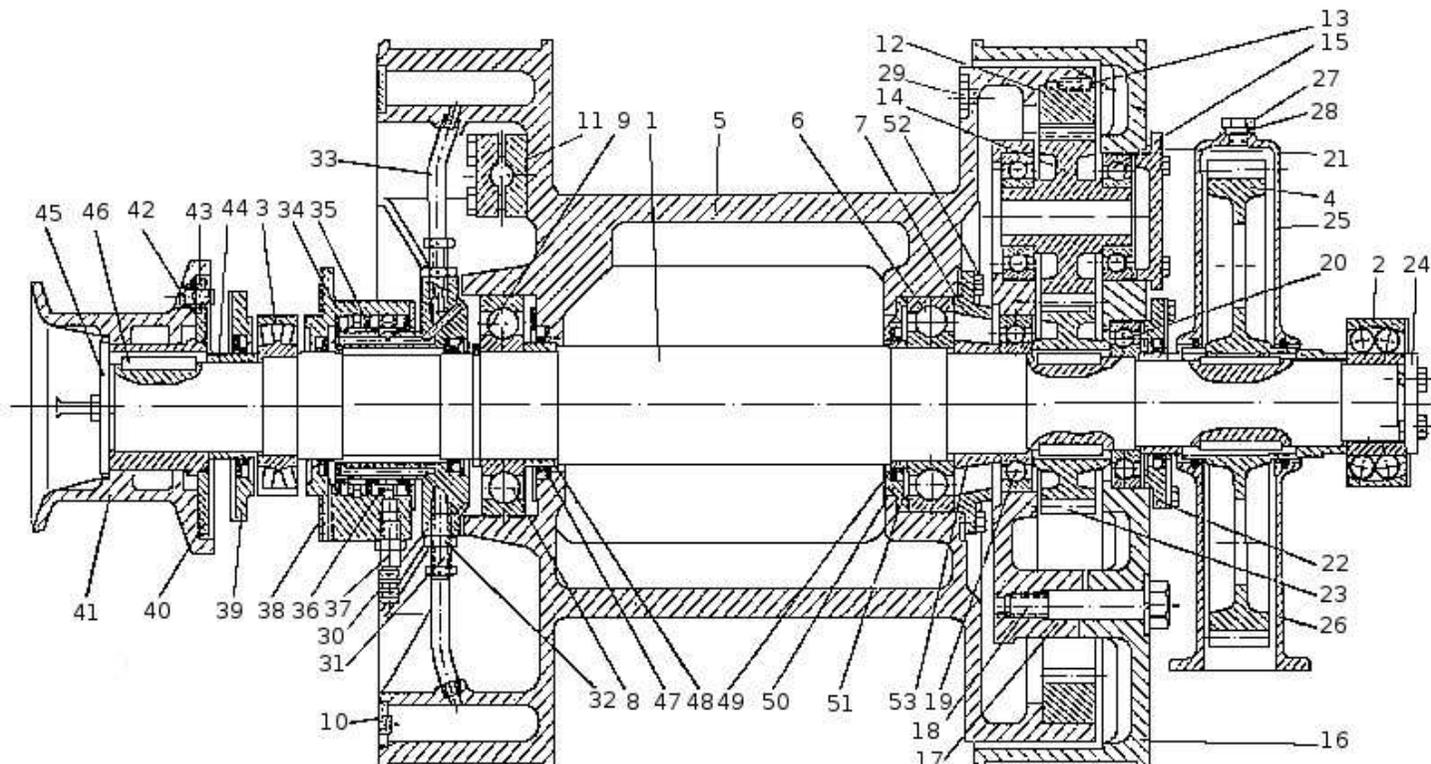
пультом управления и платформой для приёмки, предварительной сборки и хранения бурильных труб и обсадных колонн скважины;

2 - силовой блок, включающий в себя несколько дизельных либо электрических двигателей, используемых для привода ротора и буровой лебедки, вместе с системой трансмиссий, редукторов, карданов и шкивов;

3 – система насосов, применяемых для промывки ствола скважины буровым раствором, включающий от одного до трёх буровых насосов с приводом в электрическом или дизельном исполнении.

4 – система циркуляции бурового раствора, включающая несколько ёмкостей для хранения и замешивания бурового раствора, блок для приготовления бурового раствора и восстановления его свойств после прохождения одного или нескольких циклов циркуляции, блок очистки от выбуренной породы, включающий ряд сепараторов и пескоотделителей, желоба с задвижками для манипуляции с выходящим из затрубного пространства скважины циркулирующей буровой жидкости [2].

Рассмотрим подробнее спуско – подъёмный комплекс буровой установки (рисунок 1.1). Блок оборудования для спуска и подъема включает в себя полиспастный механизм, состоящий из кронблока 4, талевого блока 2, стального каната 3, связывающий буровую лебедку 6 и механизм, применяющийся для крепления неподвижного конца каната. Кронблок 4 устанавливается на верхней платформе буровой вышки 5. Подвижный конец А каната 3 монтируется к барабану лебедки 6, а неподвижный конец Б – через приспособление 7 к основанию вышки. К талевому блоку присоединяется крюк 1, на нём подвешивается на штропах или элеватор для труб, или вертлюг. В настоящее время талевый блок и подъёмный крюк объединены в один единый механизм называемымся крюкоблоком. Буровая лебёдка (рисунок 1.2) применяется для спуска и подъёма колонны бурильных труб, для свинчивания и развинчивания труб в единый комплекс, спуска обсадных колонн в скважину, удержания на весу колонны труб или подачи в процессе бурения скважины [3].



1 — вал; 2 — шарикоподшипник; 3 — роликоподшипник; 4 — шестерня; 5 — барабан; 6 — шарикоподшипник 7 — крышка; 8 — шарикоподшипник; 9 — кольцо пружинное; 10 — пробка; 11 — прижим; 12 — венец зубчатый; 13 — винт установочный; 14 — шестерня паразитная; 15 — шарикоподшипник; 16 — шайба тормозная; 17 — водило; 18 — болт призонный; 19 — шарикоподшипник; 20 — шарикоподшипник; 21 — крышка; 22 — крышка; 23 — шестерня; 24 — шайба концевая; 25 — верхняя половина кожуха; 26 — нижняя половина кожуха; 27 — пробка; 28 — прокладка; 29 — винт; 30 — крышка; 31 — штуцер; 32 — контргайка; 33 — трубка соединительная; 34 — втулка; 35 — уплотнение; 36 — кольцо распорное; 37 — штуцер; 38 — прокладка; 39 — крышка; 40 — втулка с диском; 41 — барабан кабестана; 42 — чека предохранительная; 43 — втулка; 44 — втулка распорная; 45 — шайба концевая; 46 — шпонка; 47 — манжетное уплотнение; 48 и 49 — втулки распорные; 50 — крышка; 51 — щиток; 52 — болт; 53 — конусная распорная втулка

Рисунок 1.2 - Продольный разрез буровой лебёдки

Основываясь на схеме, изображенной на рисунке 1.2 можно описать следующие составные узлы буровой лебёдки.

Барабан буровой лебёдки 5 смонтирован на валу на двух подшипниках опорах 6 и 8. Подшипник 6 закрепляется наружным кольцом в барабане крышкой 7 и предотвращает осевое перемещение вала. Опорный подшипник 8 удерживается от перемещения по валу с помощью пружинного кольца 9. Для уплотнения камер подшипника установлены манжеты. Между ступицей барабана и внутренней стенкой рубашки смонтированы усиливающие ребра со специальными отверстиями для талевого каната. На внутренней торцевой поверхности барабана, на платике конец лебедочного каната монтируется с помощью болтов через прижим 11.

Зубчатый венец 12 с внутренним зацеплением, имеющий 69 зубцов, запрессован в расточку правого торца барабана и дополнительно закрепляется и предотвращается от проворота с помощью четырёх винтов 13. Зубчатый венец состоит в постоянном зацеплении с тремя паразитными шестернями 14, имеющими по 21 зубу. Тормозная шайба 16 и водило 17 скреплены болтами 18 и вместе с шестернями образуют блок паразитных шестерен, который вращается опираясь на шарикоподшипники 19 и 20 на валу лебедки.

Подшипники 15 шестерен 14 установлены на распорах. Между торцами крышек 21 и наружных колец подшипников смонтированы уплотнительные паронитовые прокладки. Наружное кольцо шарикоподшипника 19 не закреплено в расточке водила. Тормозная шайба удерживается от осевого перемещения на валу наружным кольцом подшипника 20, дополнительно закреплённым крышкой 22. Камера подшипника 20 уплотняется с помощью резинового манжета, а соединение крышек 22 с торцом подшипника производится паронитовой прокладкой. Болты 18 располагаются по окружности под различными углами друг к другу, поэтому водило с тормозной шайбой имеет возможность к сборке только в одном определенном положении для обеспечения точной установки паразитных шестерен при переборке.

Шестерня 23 монтируется на валу при помощи двух шпонками и

сцепляется с паразитными шестернями 14. Все детали, посаженные на правый конец вала лебедки, стянуты в упор в бурт вала буровой лебёдки концевой шайбой 24, удерживающей все детали на валу в неподвижном состоянии.

При необходимости включения лебедки для производства наматывания каната, притормаживают тормозную шайбу 16, при этом паразитные шестерни 14, находясь в постоянном зацеплении с шестерней 23, передают вращательное движение от вала 1 к зубчатому венцу 12, а вместе с ним передается вращение и барабану 5. При необходимости остановки процесса наматывания каната оттормаживают тормозную шайбу 16 и затем затормаживают тормозной шкив барабана, в этом случае тогда зубчатый венец 12 и барабан 5 прекращает своё вращение, а паразитные шестерни 14 начинают обкатываться по зубчатому венцу 12 и шестерне 23, приводя в движение только тормозную шайбу.

При необходимости размотки стального талевого каната с барабана буровой лебёдки, оттормаживаются тормозной шкив барабана и тормозная шайба; при этом барабан 5 окажется свободно сидящим на валу 1 и под действием подвешенного на канате груза или талевого блока будет вращаться.

На правом конце подъёмного вала буровой лебёдки на двух шпонках закреплена шестерня 4, заключенная в чугунном кожухе, состоящем из двух соединенных болтами половин 25 и 26. Зазоры уплотняются войлоком.

Тормозной шкив барабана буровой лебёдки охлаждается водой, подводимой из водяного бачка с помощью резинового шланга и штуцера 37 в одну из кольцевых камер между крышкой 30 и цилиндрической частью втулки 34. Вода поступает из кольцевой камеры через отверстие в цилиндрической части крышки в продольный канал и далее проходя через штуцер 31 и соединительную трубку 33 поступает в водяную рубашку тормозного шкива барабана буровой лебёдки.

Проходя через вторую соединительную трубку 33 и штуцер 31 поток воды выходит из водяной рубашки и поступает во второй продольный канал крышки 30, где через соединительное отверстие протекаемая вода попадает во вторую кольцевую камеру втулки 34 и затем с помощью штуцера 37 по

резиновому шлангу вода протекает в водяной бачок. Таким образом происходит процесс циркуляции воды по системе охлаждения тормозного шкива буровой лебёдки. Процесс спуска воды из рубашки шкива происходит через три отверстия, закрывающихся конусными пробками 10.

Подъемный вал буровой лебёдки располагается в отверстии крышки 30 с зазором, по этой причине в выточке крышки с части подшипника 5 установлен резиновый уплотнительный манжет.

Цилиндрическая часть крышки 30, охваченная втулкой 34, которая в свою очередь является правой крышкой кронштейна лебедки. Втулка 34 включает себя две половинки с разъемом в осевой плоскости, соединенных с использованием болтов. Кольцевой зазор между втулкой и крышкой 30 разделяется на две камеры при помощи трёх уплотнений 35 и двух распорными колец 36. Со стороны подшипника 3 во втулку 34 монтируется резиновый манжет, применяющийся для уплотнения подшипниковой камеры кронштейна буровой лебёдки.

Для того, чтобы слить воду, которая просочилась через кольцевую камеру в пространство, располагающееся между торцом крышки 30 и дном расточки втулки 34; такая конструкция обеспечивает камеры подшипников в герметичном состоянии.

На левый конец подъемного вала буровой лебёдки при помощи двух шпонок, на которую в свою очередь посажена втулка с диском 40, барабан кабестана 41, присоединенный к диску втулки при помощи предохранительной чеки 42, две втулки 43, запрессованные одна в диск 40, другая в ребро барабана кабестана. Чека 42 удерживается во втулках с использованием шплинта. Внутреннее кольцо подшипника 3 и втулка с диском 40 распорной втулкой 44 монтируются на подъёмном валу буровой лебедки с использованием концевой шайбы 45 с упором на бурт подъёмного вала.

Кабестан используется только для осуществления дополнительных функций, относящихся к доставке к станку используемого инструмента, оборудования, а также труб, как бурильных, так и обсадных. Кабестан не

применяется для подъема предметов, это категорически запрещено. Конструкция предохранительной чеки 42 предусматривается так, чтобы она срезалась в случае превышения требуемой нагрузки на станке и канате кабестана [1].

Станиной называется металлическая сварная рама, основные механизмы лебёдки монтируются именно на ней. Станина способствует сохранности частей оборудования буровой лебёдки, а также обеспечивает жесткость и надёжность конструкции.

Подъёмный вал является главным валом буровых лебёдок, а в некоторых случаях подъёмный вал единственный в конструкции буровой лебёдки. На одном из концов подъёмного вала буровой лебёдки укрепляется шинно-пневматическая муфта, которая применяется для приведения лебёдки в работу. На другом конце подъёмного вала лебёдки монтируется трансмиссия регулятора подачи долота и барабан муфты, применяемый для включения вспомогательного тормоза буровой лебёдки. В средней части подъёмного вала на коренных подшипниках напрессовывается и закрепляется на шпонке стальной барабан.

Трансмиссионный вал буровой лебёдки принимает от одной скорости, передающейся силовым приводом и передаёт две и более скорости на промежуточный вал, а в некоторых конструкциях единой скорости на подъёмный вал буровой лебёдки. В лебёдках, которые имеют коробку передач, вращение на вал трансмиссии передается при помощи одной либо нескольких передач, а также с помощью специальной передачи обеспечивается вращение ротора.

Если конструкция предусматривает три вала, то на таких лебёдках монтируется промежуточный вал. Промежуточный вал также можно называть катушечным по причине того, что на его концах располагаются катушки, которые применяются для проведения спуско-подъемных операций при бурении скважины. Помимо этого, промежуточный вал имеет возможность передавать от двух до трёх скоростей вращения [11].

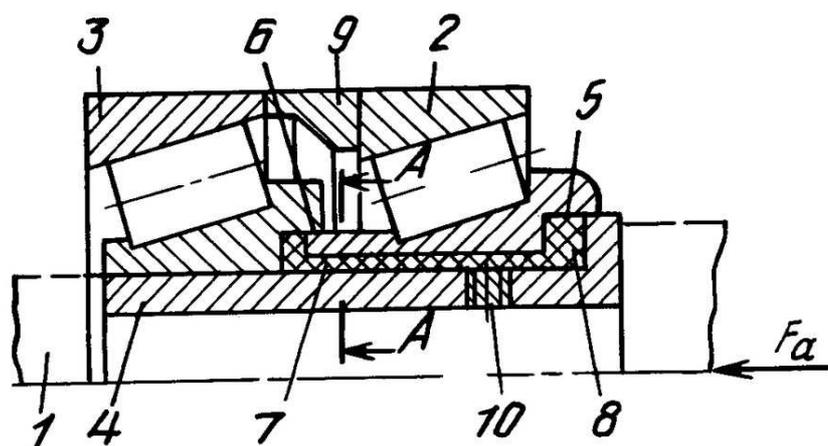
1.2 Опоры подъемного вала буровых лебедок

Подъемный вал буровой лебёдки является основным её элементом. Между коренными подшипниками 15 подъемного вала буровой лебёдки 19 монтируется напрессовкой ступицы дисков барабана лебёдки 18. Талевой канат буровой установки крепится либо слева, либо справа от диска. Высокая надежность крепления каната к диску определяет эффективность работы. При правильном расположении крепления процесс наматывания и сматывания талевого каната будет проходить в штатном режиме.

На подъемном валу установлены коренные роликовые радиально-сферические подшипники 15, смазываемые через тавотницы. Внутренние обоймы роликоподшипников монтировались на подъемном валу с помощью распорных втулок, а наружные обоймы закреплялись при помощи торцовых крышек подшипниковых корпусов. Так как возникают удлинения вала вследствие роста температуры, необходимо компенсировать эти удлинения, предусматривая при проектировании зазоры. Для удержания смазочного материала в подшипниковых опорах используют уплотнения лабиринтного типа.

Примеры существующих модификаций подшипниковых опор качения для валов, представлены ниже.

1. Целью данного патента являлось повышение уровня долговечности и надежности подшипниковой опоры роликового типа, увеличивая уровень распределения нагрузки между роликами подшипника и унификации [4].



1 – цапфа вала, 2, 3 – радиально-упорные подшипники, 4 – ступенчатая втулка, 5, 6 – кольцевые пазы, 7 – осевые канавки, 8 – камера с гидропластом, 9 – дистанционная втулка, 10 - пробка

Рисунок 1.3

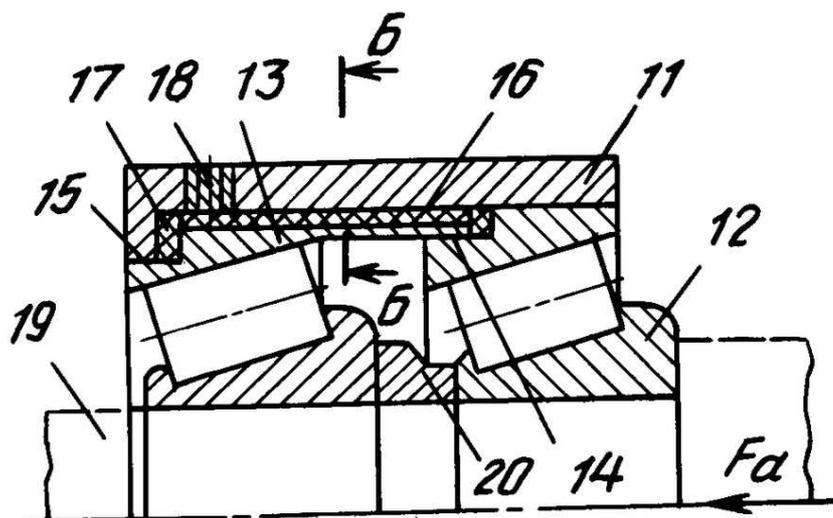


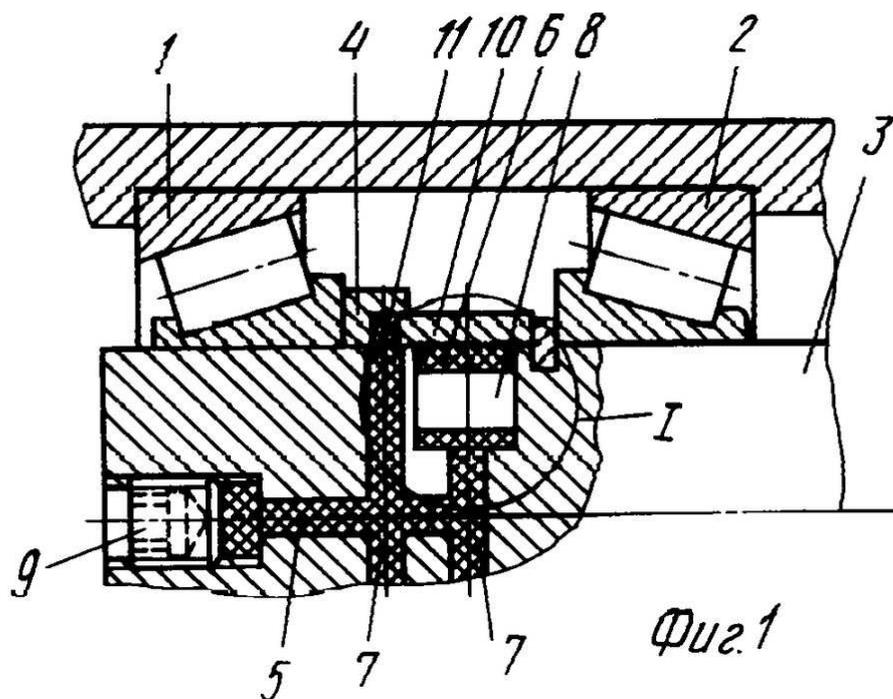
Рисунок 1.4

Устройство предлагаемой опоры предлагает один из вариантов крепления ступенчатых втулок во внутренние кольца роликоподшипников (рисунок 1.3, 1.4). Состоит из цапфы вала, радиально-упорных подшипников, смонтированных в соответствии схеме "тандем", и устройства равномерного распределения осевой нагрузки на радиально-упорном подшипнике.

В случае наличия большого изнашивания тела и дорожки качения подшипниковой опоры аналогичным образом распределяются нагрузки в зоне контакта ролика и дорожки, по причине конструктивной возможности

внутренних колец подшипниковой опоры смещаться в осевом направлении по отношению к ступенчатой втулке, это дает возможность в значительной степени увеличить уровень надежности и долговечности подшипниковых опор. Так как данная конструкция не подразумевает использование внешнего источника давления и включает в себя изолированную камеру, это дает возможность применять данные подшипники, имеющие высокий уровень взаимозаменяемости, в различных областях.

2. Данное предложение предлагает конструкцию подшипниковой опоры, в которой будет снижено температурное воздействие и действие сил трения, которые очень часто возникают при вращении вала, на который установлена опора, с большой скоростью [5].



1,2 – радиально-упорный подшипник, 3 – цапфа вала, 4 – нажимная втулка, 5,6 – центральная и периферийная камера, 7 – радиальные каналы, 8 – поршень, 9 – нажимной винт, 10 – втулка, 11 – рабочая полость

Рисунок 1.5 – Предлагаемая опора качения

Конструкция предлагаемой опоры качения состоит из двух радиально-упорных подшипников, которые в свою очередь установлены на цапфе вала широкими

торцами внутренних колец друг к другу, а также механизм поддержания осевого натяга подшипника с нажимной втулкой 4, контактирующей с внутренним кольцом подшипника. Упомянутый механизм поддержания осевого натяга выполнен в виде расположенных в цапфе вала 3 центральной 5 и периферийных 6 камер, сообщающихся между собой посредством радиальных каналов 7 и разделенных посредством установленных в упомянутых каналах поршней 8. Центральная 5 и периферийные 6 камеры и радиальные каналы 7 заполнены гидропластом. Центральная 5 камера замкнута посредством нажимного винта 9, расположенного аксиально в цапфе вала 3, а периферийные 6 камеры - посредством втулки 10, посаженной с натягом на цапфе вала 3. Нажимная втулка 4 выполнена с рабочей полостью 11, сообщающейся с центральной 5 камерой. Наружная поверхность втулки 10 сопряжена с внутренней цилиндрической поверхностью рабочей полости 11 нажимной втулки 4.

В полостях периферийных 6 камер могут быть расположены пружины 12 сжатия, взаимодействующие с поршнями 8, для уменьшения жесткости характеристики регулирования натяга.

На рисунке 5 представлен вариант исполнения опоры качения в случае непосредственного контакта нажимной втулки 4 с торцами роликов подшипника 1. Этот вариант возможен, если подвижная посадка на цапфу вала не допускается ни для одного из подшипников опоры. В этом случае в подшипнике, взаимодействующем с нажимной втулкой, внутреннее кольцо должно быть выполнено без упорного бурта.

Начальный осевой предварительный натяг в подшипнике 1 осуществляется затяжкой нажимного винта 9 за счет создания давления гидропласта в камерах 5 и 6 и радиальных каналах 7. В процессе работы при вращении вала 3 возникают центробежные силы, действующие на поршни, что приводит к увеличению давления гидропласта в периферийных 6 камерах и снижению давления в центральной 5 камере и в сообщенной с последней рабочей полости 10 нажимной втулки 4. При этом давление в рабочей полости

11, а следовательно, и действующий осевой натяг тем меньше, чем выше частота вращения вала 3.

Это позволяет избежать чрезмерных потерь на трение и тепловыделения при повышенных скоростях вращения вала 3.

1.3 Причины выхода из строя подшипников качения вала буровой лебедки

Устройство любого подшипника качения основано на наличии тел качения, располагающихся между валом и корпусом подшипника, в данном случае роликов, которые могут применяться в различном исполнении от бочкообразного до игольчатого. В других случаях могут применяться как шарики, так и спиралевидные пружины. Подшипник представляет собой корпус, внутри которого располагаются тела качения, применяемые для снижения нагрузок при вращении валов. В таких видах подшипников, где необходим небольшой радиальный размер, используются "бескольцевые" подшипники, в этом случае ролики устанавливаются между валом и корпусом без разграничителей. Но данное устройство подразумевает достаточно сложный, дорогой процесс монтажа и демонтажа подшипника при эксплуатации.

Для подъёмных валов буровых лебёдок применяют двухрядные роликовые подшипники (рисунок 1.6). Основным типом нагрузки на данной опоре является радиальная, также следует отметить, что данная конструкция обладает наибольшей грузоподъёмностью, что очень важно для работы подъёмного вала буровой лебёдки. При работе данного подшипника есть возможность работать без нарушений при возможном перекосе вала и посадочного места подшипниковой опоры на вал. Любой подшипник должен периодически смазываться, для данной конструкции для подачи смазочного материала осуществляется через проточку во внешнем кольце подшипника (3638 НК или Н).



Рисунок 1.6 – Схема двухрядного роликового радиального сферического подшипника

В основном в узлах подшипников качения деформация тел, находящихся в контакте в результате действия касательных напряжений распространяются от площадки контакта. Потеря работоспособности подшипниковых узлов во многом бывает связана с потерей смазочных материалов своих свойств. Воздействие силы трения на подшипниковый узел также в большой степени влияет на повреждения подшипниковых опор. При увеличении касательных напряжений на площадке контакта повышаются значения нормальных напряжений.

Износ подшипникового узла может произойти по причине неверной подачи смазочного материала и неправильной эксплуатации. Попавшие в смазочный материал посторонние частицы могут также негативно влиять на работу подшипника. Одним из следствий воздействия вышеперечисленных факторов будет являться преждевременный выход подшипникового узла из строя.

Смена подшипникового узла может производиться в следующих случаях: при превышении значения нагрузок, действующих на подшипник, недостаточный зазор в подшипнике, не предусматривающий температурные расширения, образование и распространение трещин в подшипнике из-за превышения нагрузки и температуры. В случае валов, установленных на несколько опор, основной причиной поломки будет являться нарушение соосности подшипниковых опор, из-за износа посадочных мест под подшипник, а также шеек вала.

Ниже приведены наиболее частые неисправности и поломки подшипниковых опор:

1. Предусмотренной смазка недостаточно для осуществления

бесперебойной работы, вследствие чего подшипниковый узел быстро перегревается.

2. Перемещение кольца подшипника в посадке, из-за уплотнения недостаточного уровня, как следствие возникают задиры.

3. Применение смазки, не предусматривающей защиту подшипника от коррозии, а также плохое состояние уплотнений могут также привести к разрушению подшипника из-за попадания воды и, как следствие, развития коррозии.

4. Недостаточные условия посадки, большие зазоры, а также погрешности при посадке могут стать причиной развития фреттинг-коррозию.

5. Подшипники, установленные на основании, не имеющем единый уровень, изнашиваются в результате усталостного выкрашивания дорожек качения, решить данную проблему можно только установив новый вал, либо корпус.

6. Неверное обращение, биение вала может стать причиной к появлению в подшипниковом узле трений и сколов.

7. Выбор неподходящего подшипника для конкретной конструкции, несовместимость используемых материалов, а также неравномерное распределение нагрузки на подшипник могут стать причинами его поломки и разрушения.

Главной особенностью работы подшипниковой опоры является то, что она работает при знакопеременных нагрузках. Периодическая смена направления вращения тела качения приводит к возникновению усталостных микротрещин. Циклично работающие тела качения подшипниковой опоры дают возможность проходить смазочному материалу в образовавшиеся трещины. Постоянно изменяющееся давление в смазочном материале воздействует на микротрещину, в котором он находится, и, как следствие, вызывает цикличное расширение и сжатие трещины, приводя к разрушению подшипника.

Подшипники качения в основном изнашиваются из-за усталостного

выкрашивания. При статических и динамических нагрузках, превышающих предельные значения, происходит изнашивание колец, а также тел качения. Очевидно, что на этапе проектирования агрегата, предполагающего использование подшипникового узла, очень важно правильно рассчитать необходимое количество оборотов (циклов) и максимальную нагрузку на валах агрегата, чтобы подобрать соответствующую подшипниковую опору.

1.4 Методы расчета опор с подшипниками качения

Большую роль в инженерной деятельности играет решение контактных задач по нахождению напряжений и деформаций тел, особенно подшипников, так как именно они определяют эффективность работы агрегатов, работающих при вращении различного рода валов и опор.

Большинство научных изысканий были произведены на основе аналитической методики расчета [7]. Использование численных методик в большой степени увеличивает круг возможностей при анализе напряженных состояний, возникающих на площадках контакте контакта [8]. Однако, при решении данных задач аналитическими методами, возникают проблемы, связанные с громоздкостью решений и необходимостью применения вспомогательных аппаратов, это значительно усложняет решение.

Свойства, возникающие при контакте взаимодействующих тел в большой степени влияют на износ поверхностей, так как из-за дискретности контакта касание микро-неровностей происходит только на отдельных площадках касания. Следовательно на этапе моделирования взаимодействующих тел важно учесть параметры реальных поверхностей в статистическом законе [9].

Исходя из вышеперечисленных факторов можно сделать вывод о необходимости учета наиболее полного описание взаимодействующих тел, включая особенности поверхности, износостойкость.

При решении задач по нахождению деформаций и напряжений во взаимодействующих телах с использованием существующих аналитических

методов возникает ряд проблем. По этой причине для решения любой контактной задачи прибегают к идеализации, то есть принятии всех условий во взаимодействующих телах за базовые либо идеальные. Таким образом, в случае если область контакта мала по отношению к размерам самих тел, то на напряжения в зоне контакта в меньшей степени влияют конфигурация, находящиеся вдали от области контакта, и метод монтажа. В этом случае при рассмотрении каждого тела в виде бесконечно упругой среды, ограниченной плоской поверхностью, можно найти напряжению с высокой степенью точности.

Как уже упоминалось выше, при проектировании геометрии контакта принято считать поверхности гладкими микро и макроуровнях. Гладкость поверхности на микроуровне значит, что при расчете не учитываются микронеровности поверхностей, следовательно, теоретически, поверхности идеально прилегают друг к другу. По этой причине теоретическая зона контакта больше реальной, в которой отсутствует абсолютная гладкость на микроуровне. На макроуровне профили поверхностей считаются непрерывными в зоне контакта вместе со вторыми производными.

Герц впервые использовал данные предположения для решения контактных задач. Полученный результат на основе данной теории изображает картину взаимодействия идеально упругих тел, не учитывая силы трения на поверхности. Однако в случае рассмотрения взаимодействия согласованных поверхностей, данные условия, основывающиеся на теории Герца, нарушаются. Это связано с быстрым ростом нагрузок на площадках контакта и достижения ими размеров, практически равных размерам взаимодействующих тел. Следовательно, при проведении расчетов подобные тела не рассматриваются в виде упругих полупространств [7].

Последующие методики расчета контактного взаимодействия связаны, именно с устранением данных ограничений и распространением применения в расчетах теории функций.

При решении контактных задач необходимо учитывать силы трения.

Однако, в условиях нормального контакта учет сил трения принято производить только при достаточно больших коэффициентах трения [10].

Проблемы, которые возникают вследствие использования для нахождения значений контактных напряжений расчетов, основанных на аналитических методах, оказали существенное влияние на развитие численных методов нахождения решений вышеперечисленных задачи. Из-за стремительного развития вычислительной техники методикам нашли широкое применение. Применение вычислительной техники для расчета контактных напряжений предполагала устранение всех проблем, возникающих в расчетах ранее. Позже появились различные методики решения контактных задач, которые основываются на решении задачи, используя интегральные или дифференциальные уравнения [11]. В этих целях применяются разновидности дискретизации по отношению к решению непрерывной и кусочно-гладкой задачи контакта одной поверхности относительно другой [8]. На данный момент разделение методов расчета контактных напряжений на области применения и структурные особенности происходит довольно формально, из-за взаимного обмена уравнений по мере развития данных методик. Но основная интерпретация, использующая исторически сложившиеся представления даёт возможность сделать акцент на различиях в методических подходах и выделить основную особенность каждого из методов.

1.4.1 Износо-контактные задачи

При решении контактной задачи рассматривают контактное взаимодействие поверхностей тел, это получило широкое применение на практике. Анализ контактного взаимодействия производится для прочностного расчёта упругого, вязкоупругого и пластичного тела, находящегося в статическом или динамическом контакте с другим телом. Контактное взаимодействие имеет место в шарнирных, фланцевых соединениях, при различных технологических операциях обработки – штамповки, резании,

бурении нефтяных и газовых скважин, в шарико- и ролико- подшипниках, опорных частях мостовых пролетных строений, зубчатых колесах, фундаментах под сооружениями и др.

Действие поверхностных сил определяют следствие контакта исследуемого тела с другим телом, взаимодействующим с ним. В случае контакта твердых тел, точки, в которых тела контактируют друг с другом, перемещаются равномерно, а также в случае соприкосновения, происходит проскальзывание одной поверхности относительно другой. Перечисленные условия приносят большие сложности при анализе граничных условий контактирующих тел, вследствие отсутствия данных о напряжениях и перемещениях точек.

В соответствии с признаками размерности контактные задачи разделяются на:

- плоские;
- пространственные (осесимметричные).

В зависимости от свойств поверхностей контактирующих тел:

- контакт абсолютно жесткого и деформируемого (упругого) тела;
- контакт двух деформируемых тел;

В зависимости от размера площадки контакта:

- площадка контакта сохраняет свои размеры и форму в процессе роста силы (контакт плоского штампа и основания);
- площадка контакта увеличивается с ростом силы (контакт шаров);
- площадка контакта увеличивается с ростом силы до некоторого предела, после которого сохраняет свои размеры и форму (контакт штампа со сферической контактной поверхностью и основания);

В зависимости от условий контакта взаимодействующих тел в зоне контакта:

- отсутствие сил трения на всей поверхности контакта;
- наличие полного сцепления тел на поверхности контакта;
- наличие тангенциальных сил взаимодействия на части площадки

контакта (сцепление контактных тел), величина которых меньше произведения нормального давления на коэффициент трения; а на остальной части площадки контакта - (проскальзывание) наличие тангенциальных сил трения, равных произведению нормального давления на коэффициент трения. Граница между участками контактной поверхности изменяется с ростом сил.

Существуют методики механической обработки поверхности, не меняющие упругих характеристик материала, но влияющие на их износостойкость. Коэффициентом линейного износа определяется интенсивность изменения форм взаимодействующих поверхностей в направлении нормали к ней из-за процесса износа. При телах, обладающих структурной неоднородностью, коэффициентом изнашивания является сложная функция. Данное условие играет существенную роль во влиянии на деформацию поверхности взаимодействующего тела в результате трения, а также на перераспределение давления в зоне контакта. Для оценки упомянутого влияния решается износоконтактная задача.

В работе М.В. Коровчинский предлагает при постановке условий контактных задач кроме упругих перемещений учитывать перемещения, вызываемые в ходе процесса линейного износа и растущие при истирании контактирующих тел [12]. При определении значений перемещений при износе автором предлагается использование математической модели, основанной на нелинейном законе изнашивания, полученном эмпирическим методом.

Общие методы поиска контактных напряжений при решении пространственной и плоской контактной задачи с учётом износа в случае постоянной области контакта описаны в исследованиях Галина [13], Горячевой [14].

Условие контакта при применении линейного закона для оценки износа и интегральных представлений для упругого перемещения с контактным давлением даёт возможности привести интегральный оператор к определению собственных значений и собственных функций. Получены доказательства о том, что в случае установившегося режима износа давление в зоне контакта

распределяется равномерно. Искомая функция давления указывается как ряд по экспонентам, где коэффициентами являются неизвестные функции координаты, аргумент экспоненты является линейной отрицательной функцией, определяющейся относительно времени. Были изучены различные методы постановки условий контактных задач: отсутствие перемещения штампа относительно оси; линейный износ, при котором происходит линейная осадка штампа со временем; произвольная смена силы и её выход на асимптоту. Для каждого из представленных выше случаев решение контактной задачи сводится к поиску результата интегрального уравнения Фредгольма (однородных и неоднородных) с симметричным положительным ядром.

В работе [15] авторы рассматривают осесимметричную износоконтактную задачу, в которой происходит вдавливание кольцевых штампов в линейно-деформируемые основания с жесткими подложками. Расчет также основывается на использовании закона абразивного изнашивания. Условия контактного взаимодействия между штампом и основанием даёт возможность представить интегральное уравнение для нахождения неизвестного распределения давления в зоне контакта, в виде, позволяющем найти результат для произвольного момента времени. Данная методика решения помогает при построении асимптотических разложений при относительно большом времени для всех основных характеристиках.

Построение математической модели при контактом взаимодействии при трении и изнашивании позволяет дать прогноз относительно долговечности исследуемого контакта, а также регулировать их работу за счет выбора материалов с необходимыми для контактирующих элементов свойствами.

Из большого числа примеров, иллюстрирующих контактное взаимодействие двух тел приведем наиболее распространённые случаи, к примеру, взаимодействие шара и плоскости (рисунок 1.7).

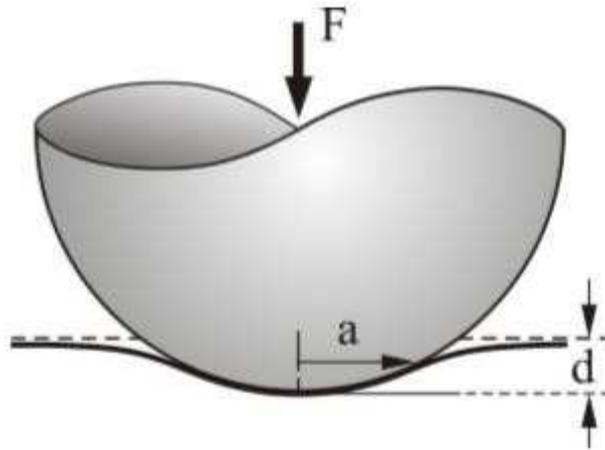


Рисунок 1.7 - Контакт между шаром и упругим полупространством.

Два упругих шара при взаимном нажатии друг на друга [5] (рисунок 1.8). Сначала они соприкасаются в точке, далее под действием силового взаимодействия соприкосновение идет по площадке в форме круга некоторого радиуса.

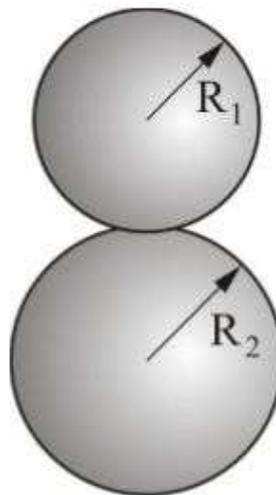


Рисунок 1.8 - Контакт двух упругих шаров

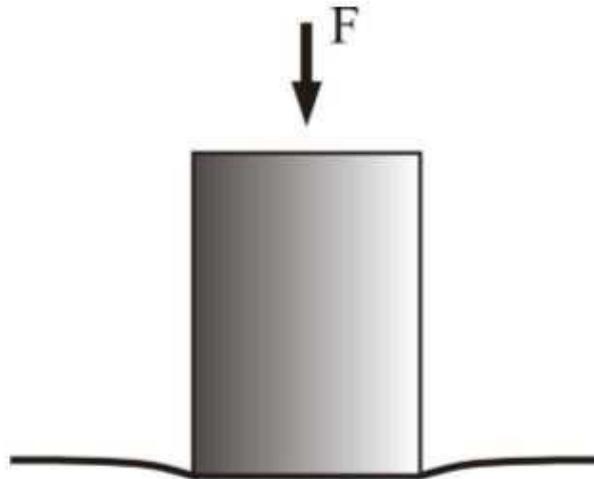


Рисунок 1.9 - Контакт между твердым шаров. цилиндрическим штампом и упругим полупространством

Для точек площадки контакта в процессе решения находятся напряжения или перемещения как неизвестные заранее сложные функции нагрузки, формы и материала контактных тел.

Контакт между двумя цилиндрами с параллельными осями (рисунок 1.10). В случае контакта между двумя упругими цилиндрами с параллельными осями длиной сила прямо пропорциональна глубине проникновения

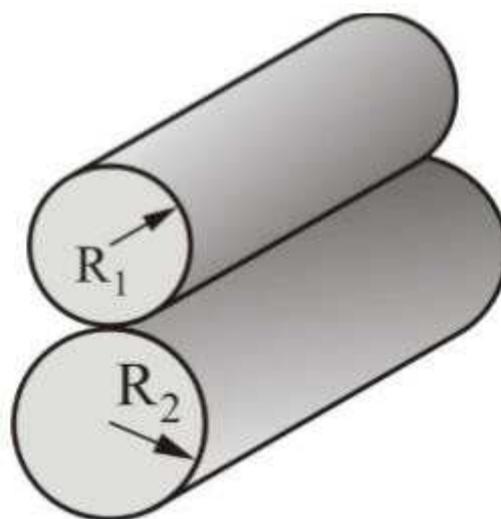


Рисунок 1.10 - Контакт между двумя цилиндрами с параллельными осями

1.4.2 Численные методы решения контактных задач

Определение контактных напряжений в общем случае сводится к решению интегро-дифференциальных уравнений или интегральных уравнений Фредгольма с ядрами, имеющими логарифмические особенности. В настоящее время нет методов построения их точного решения [16].

Необходимо отметить, что численные методы решения интегральных уравнений базируются в первую очередь на возможности вычисления самих интегралов, присутствующих в уравнениях, независимо от применяемого способа решения [17].

Подход, заключающийся в представлении распределения давления в виде бесконечного ряда известных функций с неизвестными коэффициентами, является одним из наиболее распространенных методов решения интегральных. При его использовании ряд усекается для приближенного удовлетворения граничным условиям.

Необходимо отметить, что хотя в результате находится непрерывное распределение напряжений, этот метод может быть плохо обусловлен, если функции выбраны неудачно [8].

Так, эффективен прием, известный в теории крыла конечного размаха, согласно которому искомая функция аппроксимируется произведением отрезка ряда по степеням тангенса полуугла, числовые коэффициенты которого определяются с помощью метода коллокации, и соответствующей весовой функции. Несколько иной вид искомой функции использован в работе [18]. Следует отметить, что при использовании этого представления возникающие интегралы вычисляются, как правило, точно.

Широкое распространение при решении интегральных уравнений, к которым приводятся контактные задачи, получил метод Мультиппа, обоснованный в работах и впервые примененный в работах [19]. Он состоит в том, что искомое контактное давление представляется в виде полинома Лагранжа с узлами интерполяции являющимися корнями полинома Чебышева

второго рода. В этом случае интегральное уравнение удовлетворяется только в узлах интерполяции.

С развитием вычислительной техники большое распространение получил метод механических квадратур основанный на дискретизации области интегрирования. В этом случае искомая функция, обычно, полагается постоянной в пределах малого участка области [17].

Таким образом, методы численного анализа распределения контактных напряжений, получившие наибольшее распространение на практике, сводят решение интегрального уравнения к системе линейных уравнений. При этом их эффективность определяется сложностью вычисления интегралов, возникающих при проведении преобразований и порядком получаемой системы, определяющим точность решения интегрального уравнения. С этой точки зрения наиболее эффективным представляется подход, позволяющий получить приближенное решение интегрального уравнения с наименьшим числом независимых параметров [20].

Революционное развитие вычислительной техники привело к появлению разнообразных методов вычислений внешне не связанных между собой. Кроме того, некоторые из этих методов получили преимущественное развитие в определенных областях приложений. Так, например методы конечных элементов применяются сейчас почти исключительно для решения задач механики конструкций, а при расчете течений вокруг крыльев и фюзеляжей самолетов почти универсальным средством является метод конечных разностей и т.д. [21].

Метод конечных разностей заключается в том, что область непрерывного изменения аргумента заменяется конечной совокупностью точек (узлов), называемых сеткой, значения самих функции рассматриваются в этих точках [17]. Производные входящие в дифференциальные уравнения и краевые условия (если они дифференциальные), заменяются теми или иными разностными соотношениями. Тогда для значений функции в узловых точках получается система алгебраических уравнений. При реализации метода

конечных разностей необходимо, чтобы при увеличении числа узлов решение системы уравнений приближалось к точным значениям искомой функции в узловых точках и было устойчивым [22].

Эффективным подходом при численном решении граничных задач теории упругости, в том числе и контактных, признан метод конечных элементов [21]. Первоначально он рассматривался как специальная инженерная процедура для построения матричных решений задач о расчете напряжений и перемещений. Однако стало очевидно, что этой процедуре можно дать вариационную интерпретацию, если ввести в рассмотрение потенциальную энергию системы. Сущность метода конечных элементов состоит в аппроксимации исследуемого тела некоторой моделью, которая представляет собой совокупность элементов с конечным числом степеней свободы. Эти элементы взаимосвязаны между собой только в узловых точках, куда прикладываются фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов. Параметры приведенной идеализированной системы определяются исходя из соответствующих вариационных решений [17]. Отмечена высокая эффективность метода конечных элементов применительно к контактным задачам с трением.

Перечисленные группы методов, внешне разнородные, реализуются при помощи пакетов прикладных программ, либо программных комплексов предусматривающих использование при работе хорошо разработанного диалогового режима, и используются как учеными, так и инженерами для проведения численного моделирования тех или иных явлений [23].

Широкое распространение получили методы, основанные на замене непрерывных распределений усилий, действующих на поверхности тела, дискретным набором сил, а граничные условия после этого удовлетворяются в конечном числе точек. Трудность такого представления заключается в бесконечных перемещениях поверхности, которые имеют место в точках приложения сосредоточенного усилия. Это преодолевается путем замены

искомого распределения совокупностью столбцов с равномерным распределением усилий, действующих на дискретных сегментах поверхности, что приводит к ступенчатому распределению. Перемещения в этом случае конечны, но градиенты перемещений на границах соседних элементов бесконечны, поскольку имеются конечные скачки усилий. Поэтому наилучшим считается кусочно-линейное распределение усилий, дающее непрерывные и гладкие поверхности смещений [8].

1.5 Выводы

При анализе кинематических схем нагружения опорных подшипников подъемного вала буровых лебёдок выявлено следующее:

- на подъемный вал действует усилие в тяговой струне и крутящий момент от КПП, карданного вала или редуктора через муфты сцепления,
- на подъемный вал действуют одновременно усилие в тяговой струне и усилие в цепной передаче;
- на подъемный вал действуют усилие в тяговой струне и крутящий момент от электродвигателей постоянного тока при спуско-подъемных операциях с бурильными колоннами, а при спуске тяжелых обсадных колонн и при ликвидации затяжек и прихватов колонн – усилие в тяговой струне и усилие в цепной передаче [5].

Определению долговечности подшипниковых опор качения производится на основе стандартных расчетов, приведенных в пункте 1.4, однако они не учитывают действие сил трения, возникающих на площадке контакта тел качения с дорожкой кольца [1]. Следует отметить, что оценить влияние контактных напряжений на долговечность без учета такого фактора, как возникающие при проскальзывании силы трения, не возможно. В связи с этим была поставлена цель.

Целью данного проекта является разработка уточненной методики инженерного расчета контактных напряжений в опорах вала буровой лебедки.

Для реализации цели были решены следующие задачи:

1. Обзор существующих методик инженерного расчета контактных напряжений в подшипниковых опорах.
2. Обзор программного обеспечения, применяемого для решения контактных задач и выбор программы для дальнейшей работы.
3. Анализ нагрузок, действующих на подъемный вал, при работе буровой лебедки.
4. Выбор схемы и методики уточненного расчета подшипниковой опоры подъемного вала буровой лебедки.
5. Расчет контактных напряжений в подшипниковой опоре подъемного вала лебедки.
6. Оценка эффективности произведенного уточненного расчета по сравнению с существующими классическими методиками.

2 Применение программных пакетов для расчета опор качения

2.1 Обзор программного обеспечения

На данный момент изыскательские и проектные организации работают с использованием программного обеспечения, это поднимает проектную работу на качественно новый уровень, при этом возрастает интенсивность и качество результата проектирования, решение сложных инженерных задач стало более обосновано, хотя раньше они решались только упрощёнными методами, то есть с исключением из расчета различных условий, значительно упрощающих расчет. Проведению уточненных расчетов способствует использование эффективных программ, которые могут выступать как самостоятельный пакет, так и в виде приложений к общетехническим программам. Работа по созданию программных пакетов и технического обеспечения, применяющегося для автоматизации проектных работ называется – САПР (система автоматизированного проектирования).

Отдельные части многофункциональных систем САПР обычно разделяются на три основных блока CAD, CAM, CAE. Модули, относящиеся к блоку CAD (Computer Aided Design) предназначаются в основном для выполнения работ графического вида, модули CAM (Computer Aided Manufacturing) применяются при решении задач технологической подготовки производства, модули CAE (Computer Aided Engineering) используют для проведения инженерных расчетов, а также анализа и проверки полученных результатов.

Пакеты САПР существуют в огромном количестве и разделяются на разные уровни. Наиболее распространён такой вид систем, в котором главное внимание уделяется созданию "открытых" (т.е. предполагающих расширение) базовых графических модулей CAD, а модули, применяющиеся для проведения расчетных или технологических задач (соответственно блокам CAM и CAE)

остаются для разработки пользователям данного модуля либо различного рода организациям, специализирующимся на программировании аналогичных программных обеспечений. Данные дополнительные модули имеют возможность применяться и самостоятельно, без САД-систем, это практикуется в строительном проектировании.

Самый крупный в мире поставщик программного обеспечения как для промышленного, так и гражданского строительства, машиностроения, рынка средств информации является компания Autodesk, Inc. С 1982 года данная компания разрабатывает широкий спектр решений для архитекторов, инженеров, конструкторов, дающие возможности для создания различных цифровых моделей. Технологии, разрабатываемые Autodesk, используются для визуализации, моделирования и анализа поведения разрабатываемых конструкций на начальных этапах проектирования и дают возможность помимо визуализации модели провести ее испытания.

На территории России и стран СНГ известен программный пакет AutoCAD. Однако, на сегодняшний день, данный программный пакет уже не удовлетворяет потребностей пользователей программы, современные проектировщики нуждаются в гораздо большем функционале. Данный пакет имеет возможность использоваться только при моделировании достаточно малых и простых проектов, автоматизируя лишь рутинную работу кульмана.

Программа Autodesk Building Systems, используется при проектировании внутренних инженерных сетей. Данный пакет обладает всеми средствами AutoCAD и Autodesk Architectural Desktop.

Именно получение выходной документации и её оформление в соответствии с принятыми стандартами является основным ключевым моментов САПР, так как формирование документации является одним из главных подразделов при проектировании. При необходимости в автоматизации рутинной работы на этапах нанесения различных элементов оформления, может быть использован программный пакет auto.СПДС, являющийся пакетом для для AutoCAD, Autodesk Architectural Desktop,

Autodesk Building Systems. Данная программа включает в себя возможности нанести различные условные обозначения, выноски, отметки, линии обрыва, виды, координационные оси, штриховку и так далее. Все отмечаемые объекты после обозначения могут быть изменены.

IronCAD - система самого последнего поколения. Является полнофункциональным инструментом, применяемым разработчиками, из-за высокой скорости работы данного пакета. Программа основана как классических методах параметрического моделирования, так и на инновационных методиках прямого редактирования. С помощью системы IronCAD пользователь имеет возможность оформлять чертежи, экспортирует геометрию другие программы без потери ассоциативных связей.

MicroStation – профессиональная система для двухмерного и трехмерного автоматизированного проектирования для осуществления работы, связанной с черчением, конструированием, визуализацией, анализом, управлением базами данных и моделированием. Обеспечиваются практически неограниченные возможности пользователя на платформах DOS, Windows и других операционных системах.

В состав системы SCAD Office входит высокопроизводительный вычислительный комплекс SCAD версия 11.3, а также ряд проектирующих и вспомогательных программ, которые позволяют комплексно решать вопросы расчета и проектирования стальных и железобетонных конструкций. Система постоянно развивается, совершенствуются интерфейс пользователя и вычислительные возможности, включаются новые проектирующие компоненты.

КОМПАС - система для автоматизированного проектирования, разработанная российской компанией АСКОН с возможностью оформления проектной и конструкторской документации согласно стандартам серии ЕСКД и СПДС. Данный программный пакет разработан в двух вариантах: КОМПАС-График и КОМПАС-3D, предназначенных для плоского черчения и трёхмерного моделирования соответственно.

SolidWorks - продукт компании SolidWorks Corporation, система, применяющаяся для автоматизированного проектирования, инженерного анализа, а также для подготовки производства изделий любой сложности и назначения. Данный программный пакет представляет собой инструментальную среду, предназначенную для автоматизации проектирования сложных изделий в машиностроении и во многих других областях промышленности.

ANSYS представляет собой универсальную программную систему конечно-элементного (МКЭ) анализа, существующую и развивающуюся на протяжении последних 30 лет. Данный программный пакет является довольно популярным у специалистов в области компьютерного инжиниринга и решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций методом конечных элементов. Моделирование и анализ результатов проверок в некоторых сферах современной промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа проектирование - изготовление - испытания.

Главной особенностью программного комплекса ANSYS является файловая совместимость всей линейки продуктов ANSYS для всех поддерживаемых платформ. Универсальность программы даёт возможность использовать одну и ту же модель для решения таких связанных задач, к примеру, как прочность при тепловом нагружении или влияние магнитных полей на прочность конструкции, тепломассоперенос в электромагнитном поле. Возможности постпроцессинга ANSYS позволяют детально изучить поведение исследуемой модели при нагрузке.

Программный пакет COMSOL имеет большие возможности при изучении материалов в напряжённо-деформированном состоянии. Дополнительные интерфейсы дают пользователю возможность использовать моделирование в программе COMSOL для технических вычислений, автоматизированном проектировании, а также автоматизации проектирования

электронных приборов. Данный пакет имеет схожие возможности с пакетом ANSYS, однако, особенностью является то, что COMSOL является инструментом пакета MATLAB и функционирует под его управлением, следовательно, все возможности программирования, доступные в программе MATLAB, применяются в COMSOL, к примеру, при необходимости обработки результата расчёта, проведения анализа.

С помощью программного комплекса ABAQUS проектировщик имеет возможность решить задачи по расчету прочности турбомашин и проектировании двигательных установок, проанализировать работу шасси и трансмиссий, рассчитать сварные соединения в агрегате, провести анализ последствий предполагаемых аварийных столкновений, смоделировать сверхпластичные деформации в модели, выполнить расчёты композиционных структур, учесть контактное взаимодействие большого числа тел между собой, а также сейсмические воздействия, взрывные воздействия, провести расчёты на надёжность ядерного реактора, проанализировать прочность электронных компонентов.

ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) – универсальная программа, работающая на основе метода конечных элементов, используемая для инженерных линейных и нелинейных расчётов. Позволяет решать задачи теплопереноса в твёрдых телах и конструкциях; рассчитывать течения сжимаемой и несжимаемой жидкости, использующую конечно-объёмную и конечно-элементную дискретизацию; проводить мультифизические и электростатические симуляции; программный модуль TMC предназначен для решения связанных термомеханических задач, когда термические явления влияют на прочностные, и наоборот. Пре- и постпроцессорный модуль, дающий возможность создавать и редактировать геометрические и конечно-элементные модели и осуществлять визуализацию результатов расчёта.

Elmer – проект, рассчитанный на решение задач из твёрдого тела, акустики, электромагнетизма, квантовой механики.

Программный пакет ELCUT для моделирования двумерных полей методом конечных элементов позволяет решать задачи теории упругости в постановках плоских напряжений, плоских деформаций и осесимметричного напряженного состояния с изотропными или ортотропными свойствами материалов. Кроме того, фрагменты модели можно импортировать из системы AutoCAD или других систем проектирования. Можно вычислять различные интегральные величины на заданных пользователем линиях, поверхностях или объемах [24].

Для разработки методики уточненного расчета был выбран программный пакет ELCUT, который по своему функционалу и интерфейсу полностью удовлетворяет требованиям, необходимым для проведения расчета контактных задач. Для проведения расчетов использовалась студенческая версия ELCUT.

2.2 Описание программного пакета ELCUT

ELCUT – это интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать плоские и осесимметричные задачи следующих типов:

1. Расчет электрического поля: электростатическое поле, электрическое поле постоянных токов, электрическое поле переменных токов. Нестационарное электрическое поле.

2. Расчет магнитного поля: магнитостатическое поле. Магнитное поле переменных токов (с учетом вихревых токов). Магнитное нестационарное поле (с учетом вихревых токов и нелинейных материалов).

3. Задачи теплопередачи (расчет температурного поля): стационарная теплопередача, нестационарная теплопередача (тепловые переходные процессы).

4. Задачи механической прочности: линейный анализ напряженно-деформированного состояния.

5. Мультидисциплинарные (связанные) задачи.

С помощью ELCUT пользователь имеет возможность: описать задачу -

геометрию, свойства сред, источники поля, граничные условия; решить задачу с высокой точностью; проанализировать решение с помощью средств цветной графики; сохранить результаты в форме, пригодной для подготовки отчетов или для дальнейшего анализа.

Комплекс ELCUT может решать задачи теории упругости в постановках плоских напряжений, плоских деформаций и осесимметричного напряженного состояния с изотропными или ортотропными свойствами материалов. Задача плоских напряжений подходит для анализа структур, тонких по глубине, которые нагружены в плоскости модели. Напряжение в направлении, нормальном к плоскости модели, предполагается отсутствующим. Задача плоских деформаций предполагает отсутствие деформаций вне плоскости модели. Эта задача подходит для моделирования объектов с весьма большой толщиной в направлении, нормальном к плоскости модели.

Расчет упруго-напряженного состояния применяется при проектировании большинства электрических или механических конструкций. В задачах теории упругости интерес представляют перемещения, деформации и различные компоненты тензора напряжений.

Пакет ELCUT может решать линейную задачу упругости сплошной среды для плосконапряженного, плоскодеформированного или осесимметричного напряженного состояния. Уравнения записаны в терминах напряжений. При постановке задачи вы можете использовать следующие возможности:

Свойства сред: ортотропные и изотропные материалы.

Источники поля: сосредоточенные силы, распределенные поверхностные и объемные силы, внешнее давление, термические деформации и силы, импортированные из задач электростатики, электрического поля переменных токов и магнитостатики.

Граничные условия: жесткое закрепление с заранее заданным смещением, упругое закрепление (пружинный подвес).

Результаты расчета: перемещения, деформации, координатные и главные компоненты тензора напряжений, критерии Мизеса, Треска, Мора-Кулона,

Друкера-Прагера, Хилла [24].

2.3 Выводы

В данной главе приведен анализ наиболее распространенных программных пакетов, применяемых для проведения инженерных расчётов.

Приведено описание программного пакета ELCUT, выбранного для проведения расчетов. Основным преимуществом данного пакета является широкий круг возможных к решению задач, включающих в себя расчет электрического поля, расчет магнитного поля, задачи теплопередачи, задачи механической прочности, а также связанные задачи. Для выполнения поставленных задач данной квалификационной работы необходимо произвести решение задачи механической прочности. Выбранный программный пакет спроектирован для решения задач механической прочности, а в частности деформаций и напряжений, с использованием двумерной модели.

3 Анализ расчетной схемы и алгоритма для решения задач упругости в подшипниковой опоре качения

3.1 Расчетная схема

Для решения поставленных задач необходимо создать модель площадки контакта для исследования напряженного состояния контактирующих деталей подшипника качения и оценки величины касательных напряжений вдоль площадки контакта.

Как уже упоминалось в главе 2 данной квалификационной работы, исследование проводилось с помощью программного комплекса ELCUT на основе компьютерной модели контакта цилиндрического ролика с дорожкой качения внутреннего кольца при наличии сил трения.

Для компьютерной модели рассматривался контакт, возникающий при качении с проскальзыванием ролика по упругому основанию в виде внутреннего кольца (рисунок 3.1). Расчетная схема для создания модели контакта состоит из двух блоков – ролика и дорожки качения внутреннего кольца. Каждый блок разбивается на ребра и вершины, к которым прикладываются действующие точечные или поверхностные нагрузки. Учитывая условия работы роликовых подшипников качения, данная задача рассматривается для режима граничного трения.

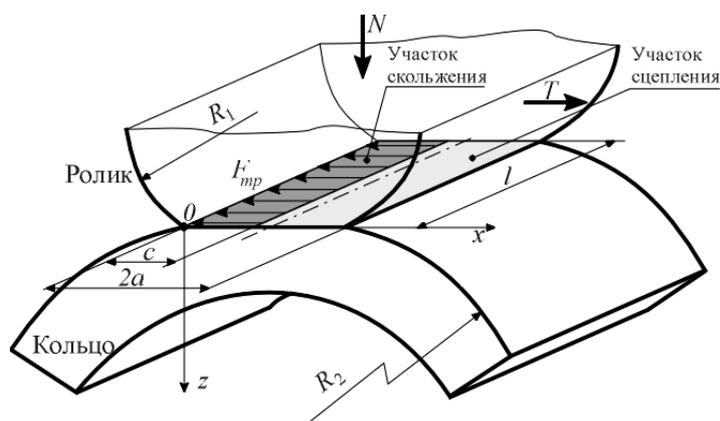


Рисунок 3.1 – Расчетная схема модели контакта ролика с дорожкой качения

Базируясь на положениях герцевской и упруго-гидродинамической теории контакта, а также учитывая условия работы роликовых подшипников качения для различных узлов, рассматривалась задача о контакте тел качения в роликовом подшипнике для режима граничного трения. Контактные поверхности задавались между роликом и поверхностью качения внутреннего кольца. В зоне контакта имеется герцевская площадка прямоугольной формы ширины $2a$ и длины l , равной длине ролика, образованная упругими деформациями (рисунок 3.1), которая состояла из двух участков. Участок II, расположенный на стороне набегания цилиндра является зоной сцепления, а участок I – зоной, где имеет место проскальзывание контактирующих поверхностей [25]. Координату точки c , разделяющей эти две зоны, можно определить из данной формулы:

$$c = a \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1-2\nu}{f(2-2\nu)} \right),$$

где a – полуширина площадки контакта, определенной по формулам Герца; f – коэффициент трения скольжения; ν – коэффициент Пуассона. Размер полуширины площадки рассчитывался для случая контакта цилиндра с плоскостью и определялся по следующей формуле [26]:

$$b = 0,798 \sqrt{2pR(\Theta_1 + \Theta_2)},$$

где R – радиус цилиндра; $\Theta_i = \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$ – упругий коэффициент; E – модуль упругости материала; ν – коэффициент Пуассона. Расчетная схема состоит из двух блоков – ролика и дорожки качения (рисунок 3.2). Каждый блок разбивается на ребра и вершины, к которым прикладываются

действующие точечные или поверхностные нагрузки.

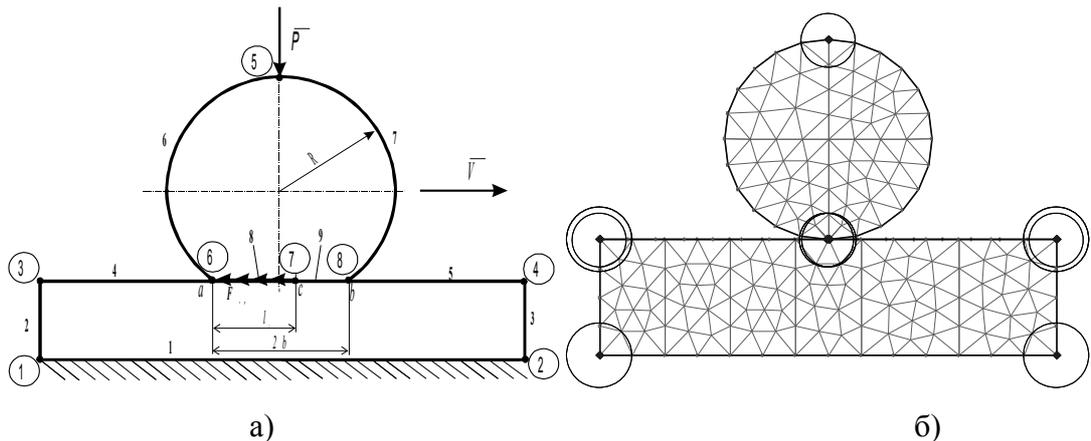


Рисунок 3.2 - Расчетная схема (а) и сетка конечных элементов (б) модели контакта ролика с плоскостью качения

Значения напряжений в упругом контакте ролика с поверхностью при наличии граничного слоя смазочного материала определялись как вдоль площадки контакта, так и по глубине по центру площадки. Условия, определяющие нагрузку на площадку контакта между двумя скользящими телами, для такой схемы будут представлены системой уравнений [27]:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -q(x) = -\frac{q_0}{a} (a^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}, \\ \tau_{xz} &= -f q(x), \\ z &= 0, \quad -a \leq x \leq a \end{aligned}$$

где f – коэффициент трения; a – полуширина площадки контакта, q_0 – давление в центре площадки, τ_{xz} – тангенциальное напряжение на площадке контакта; $p(x)$ – нормальное напряжение.

Значения коэффициентов трения были определены экспериментально при изучении влияния ультрадисперсных добавок к смазочным материалам на величину силы трения при условии проскальзывания ролика. Исходным и основным расчётным напряжением принимались максимальные касательные напряжения τ_{max} .

3.2 Алгоритм решения задач упругости в программном пакете ELCUT

Чтобы создать новую задачу, необходимо выбрать в меню: создать, файл. Затем нужно указать требуемую задачу в списке предлагаемых задач. В появившемся окне указывается имя новой задачи и путь к папке, в которой будут находиться файлы текущей задачи. При выборе параметров задачи указываются тип анализа, класс симметрии, точность, с которой будет решаться текущая задача в ELCUT. В этом случае вновь созданная задача наследует все свойства примерной задачи, и файлы модели и свойств будут скопированы, если необходимо. Когда открывается существующий документ, необходимо выбрать элемент для открытия или документ из проводника переносится в окно программы ELCUT. После открытия задача отображается в окне описания задачи, расположенном в левой части рабочего поля программы. Параметры задачи определены в окне описания, материалах и их свойствах, заданы граничные условия, заданы параметры поля для задания электричества. Окно, отображающее файлы, на которые ссылается описание задачи, называется деревом задач. Секции «Физические свойства» и «Библиотека свойств» включают в себя блоки, вершины, ребра и метки, назначенные им.

Создание модели для продукта последующих вычислений осуществляется на следующих трех этапах:

1. ввод и управление геометрическими объектами,
2. установление свойств и параметров среды, граничных условий, полевых источников,
3. Создание сетки конечных элементов в блоках, включенных в схему расчета.

Когда изменяются параметры и свойства задачи, выбирается раздел «Свойства задачи» в меню «Задачи». Чтобы перейти к документу, на который

ссылается описание задачи, выбирают соответствующий элемент в меню «Задача».

При описании геометрии исследуемой модели создаются вершины и ребра, разделяющие блоки, и определяются их физические свойства. Коррекция формы и положения объекта выполняется с помощью операции перемещения и копирования. Выбор операции используется в случае, когда необходимо работать с несколькими блоками одновременно.

Характеристики исследуемой среды, источники и граничные условия определяются связыванием меток с геометрическими объектами, обладающими соответствующими свойствами. Для расчета необходима сетка конечных элементов, в этой программе она создается автоматически. В отличие от других пакетов конечных элементов ELCUT не требует, чтобы плотность сетки была одинаковой на периодической границе и правильно вычисляла значения на краях с разной плотностью сетки. Принимая во внимание размеры геометрических объектов, которые устанавливаются на начальных этапах проектирования, автоматически строится гладкая сетка с элементами, которые плавно изменяются от малого до большего. Вместо автоматического построения сетки вы можете вручную отрегулировать размер конечных элементов сетки. Для этого нужно указать шаги выборки в одной или нескольких вершинах.

Окно свойств открывается командой «Свойства» в меню «Вид». Он обычно прикрепляется к окнам задач, но также может оставаться плавающим, динамически отображая свойства модели расчета.

Статистические свойства, относящиеся к геометрической модели в целом, а также свойства выделенных геометрических объектов (блоков, ребер, вершин). Такие свойства как метка объекта и шаг дискретизации можно изменить, записав новое значение или выбрав его из списка. Значение метки устанавливается отдельно для каждого типа выделенных геометрических объектов: блоков, ребер, вершин. Для настройки шага дискретизации, необходимо включить режим "Задан", в отображенном поле "Заданный шаг"

ввести числовое значение шага дискретизации или выбрать его из предложенного списка. Введенные значения сразу же присваиваются рассчитываемому элементу.

Чтобы решить задачу, описываются свойства сред, указываются источники поля и определить граничные условия. Все свойства задач находятся в файле описания свойств, привязываются к модели путем присвоения меток.

В программном пакете используется как двумерное моделирование, так и трехмерное. Для решения задач теории упругости применяется двумерное моделирование, при этом определяются следующие параметры:

- метки блоков описывают свойства материалов и нагрузок в подобластях модели;

- метки ребер описывают граничные условия на внешних и, возможно, внутренних поверхностях вашей модели;

- метки вершин описывают точечные источники поля и условия закрепления (граничные условия), приложенные к конкретным точкам в исследуемой модели.

При постановке задачи теории упругости ввод свойств производится следующим образом. Диалог свойств метки блока для задачи теории упругости в свойствах метки блока содержит три закладки.

1. Упругие константы материала
2. Нагрузки и термические деформации
3. Предельно допустимые напряжения

Прежде чем вводить свойства нового ярлыка в окне настройки свойств (рисунок 3.3), в поле, где указан модуль Юнга, вместо слова числовое значение записывается вместо слова «Нет», это означает, что выбранный блок исключен из расчета модель. Если необходимо указать свойства среды, то есть включить блок в модель расчета, вводится модуль Юнга, который соответствует материалу, из которого составлен эквивалент исследуемой модели. В случае анизотропного (ортотропного) материала описаны семь независимых констант

упругости. В остальных случаях только две из семи констант будут независимыми. Это также относится к коэффициентам линейного расширения.

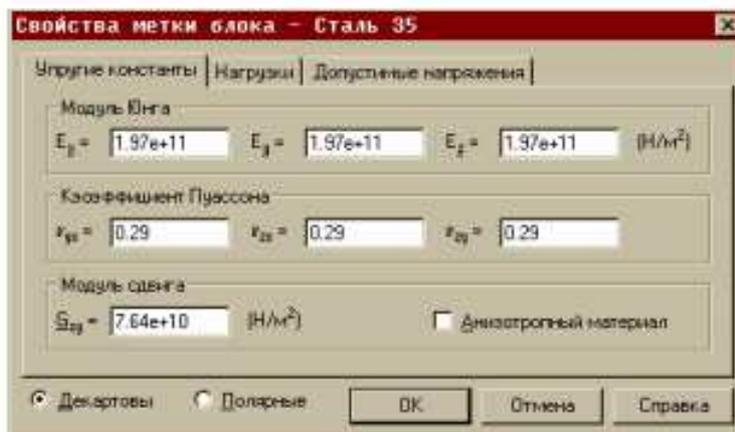


Рисунок 3.3 – Окно задания упругих свойств блока

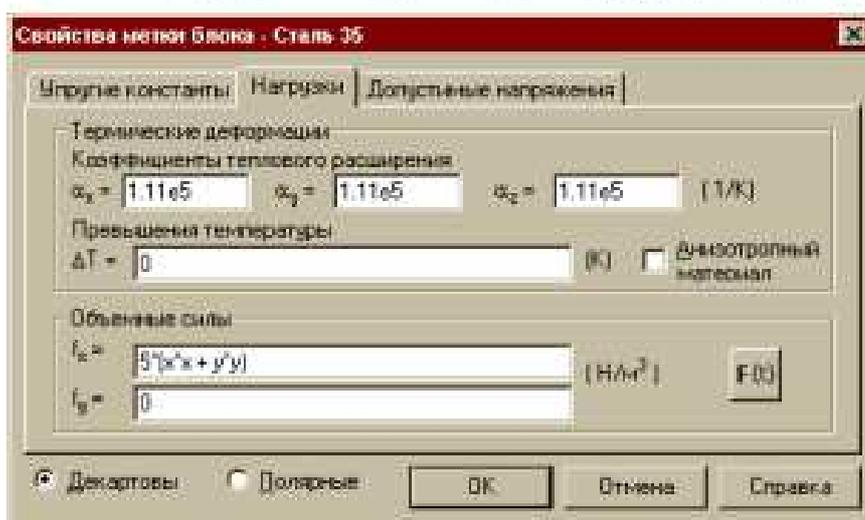


Рисунок 3.4 – Окно задания свойств нагрузки и термических деформаций

Компоненты вектора плотности объемной силы, например, центробежной силы, могут зависеть от координат. Чтобы установить нагрузку как функцию (рисунок 3.4), формула вводится в соответствующее поле данных. Спецификация типа тепловых нагрузок отличается в отдельных задачах и в связанных термоупругих проблемах. В одиночных проблемах задается разность температур между деформированным и недеформированным состоянием, которое является постоянным во всех блоках с этой меткой. Также в связанных

термоупругих проблемах необходимо установить начальную температуру недеформированного состояния для каждого блока отдельно или для каждого устройства, имеющего тепловую нагрузку.

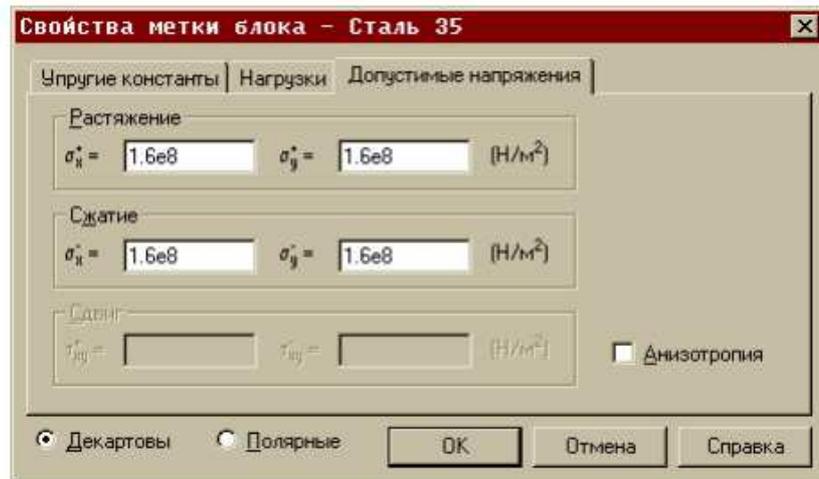


Рисунок 3.5 – Окно задания предельных напряжений материала исследуемого объекта

Величины допустимых напряжений в рассчитываемой модели не влияют на процесс решения задачи упругости, а используются только при анализе результатов решения (для вычисления критериев Мора-Кулона, Друкера-Прагера и Хилла).

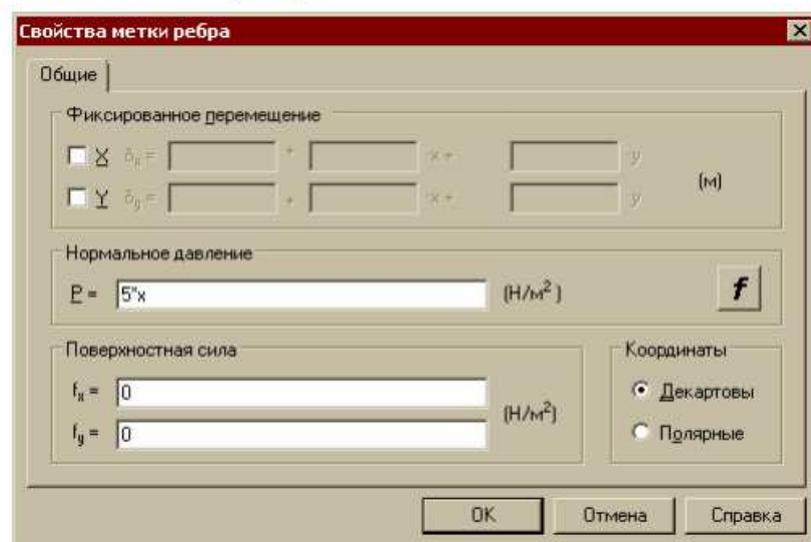


Рисунок 3.6 – Окно задания свойств метки ребра объекта

Чтобы установить фиксированное движение вдоль одной из осей, соответствующая ячейка будет отмечена и будет введено значение фиксированного перемещения. Нормальное давление и компоненты поверхностной силы могут зависеть от координат. Чтобы установить значение нагрузки как функцию, введите значение в соответствующей строке.

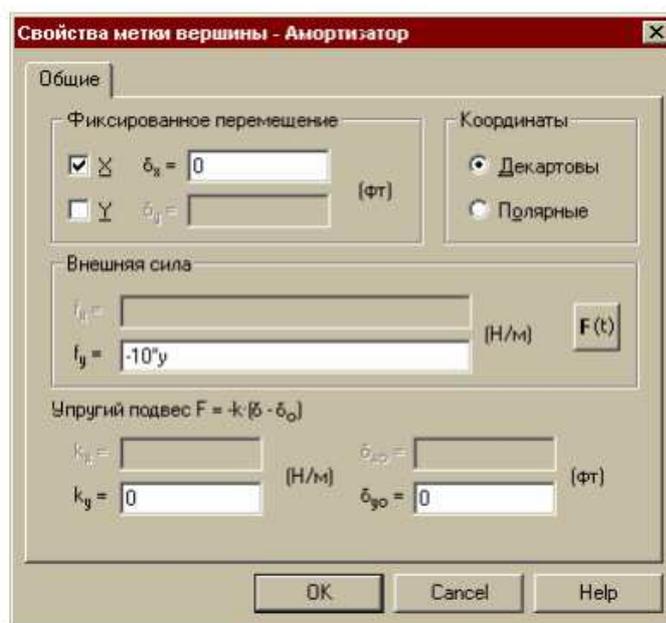


Рисунок 3.7– Окно задания свойств метки вершин объекта

Вершина задачи упругости (рисунок 3.7) может быть точкой жесткой или упругой подвески вдоль одной или обеих координатных осей или точки приложения внешней силы. Чтобы установить фиксированное движение вдоль одной из осей, соответствующий флаг будет отмечен и будет введен значение фиксированного перемещения. Силы, приложенные к вершинам объекта, также могут зависеть от координат. В этом случае истинное значение граничного условия будет вычисляться с учетом положения каждой вершины, помеченной меткой. Вместо численного значения вводится формула для определения зависимости для внешней силы.

Для решения этой проблемы необходимо выполнить определенные условия. В описании документа задачи должны быть указаны соответствующие

параметры, перечисленные выше, каждая метка определяется физическими свойствами, сетка конечных элементов должна быть построена на исследуемом объекте. Чтобы решить проблему, выбирают функцию ELCUT Решить задачу. Если задача еще не решена или решение устарело в отношении других документов, процесс решения задачи будет запущен автоматически. Существует возможность начать решение нескольких задач один за другим в пакетном режиме. Для этого выбирается пакетное решение в меню «Задачи», а затем отметьте задачи, которые вы хотите решить. Во время решения проблемы специальный индикатор позволяет отслеживать процесс решения проблемы. Кнопка «Прерывание» на панели инструментов позволяет прервать решение задачи. Для решения линейных задач используется итерационный метод сопряженных градиентов с предварительным условием матрицы методом декомпозиции домена. Такой подход позволяет получить беспрецедентную высокую скорость решения с почти линейной зависимостью необходимого количества итераций от числа узлов сетки. Критерием завершения итерационного процесса является достижение заданной точности решения. Для решения нелинейных задач ELCUT использует метод Ньютона-Рафсона, а решение линейной задачи на каждой итерации этого метода выполняется в соответствии с приведенной выше схемой. Ускорение процесса принятия решений достигается путем согласования требуемой точности решения линейной задачи с предварительной оценкой точности, которая может быть достигнута на заданной итерации метода Ньютона-Рафсона. Для решения нестационарных задач этот программный пакет использует метод Эйлера (с постоянным временным шагом) с нулевыми начальными условиями или с исходными условиями, экспортированными из другой задачи. Рекомендуется использовать как минимум 15-20 временных шагов для всего переходного процесса для лучшей точности и гладкости раствора.

Чтобы отобразить результаты расчета, можно выбрать «Анализ результатов». Программный пакет ELCUT позволяет представить решение проблемы несколькими способами: шаблоном поля, значениями локального

поля, интегральными значениями, мастерами вычислений, графиками и таблицами, графиками и таблицами во времени. Любое изображение или физическое значение, отображаемое при анализе результатов решения, можно скопировать в буфер обмена для последующего использования. Анализ решения начинается с того, что ELCUT открывает новое окно, в котором отображается изображение вычисленного поля. Поле представлено методом, наиболее подходящим для решения проблемы. Можно использовать все средства визуализации поля, произвольно комбинируя их.

Программа включает несколько способов представления изображения поля. Цветовая карта показывает распределение выбранной физической величины, в то время как результат вычисления сопровождается цветовой шкалой, показывающей соответствие между цветом и значением физической величины. Интерфейс включает в себя возможность настройки цветовой карты, изменения количества цветовых градаций и границ диапазона выбранного значения. Цветовая карта также может быть изображена в виде градаций серого цвета. Линии поля - это изотермы для температурного поля, линия равного потенциала для электростатического поля и линия магнитного потока (силовые линии) для магнитного поля. Управление изображением полевых линий сводится к заданию расстояния между соседними линиями. Это расстояние измеряется в единицах соответствующего потенциала.

Векторы представляют собой группу прямолинейных направленных отрезков, представляющих величину и направление векторной физической величины. Векторы начинаются в узлах сетки с квадратными ячейками. Пользователь может изменить интервал сетки и коэффициент масштабирования для выбранной векторной физической величины. Следующие возможности используются для представления картины поля в задачах теории упругости. Например, измененная форма тела и деформированная граница представляют собой изменение формы тела в виде начальной и деформированной сетки с квадратными ячейками. Тензоры напряжения представлены в виде семейства пар собственных векторов, отражающих направление главных осей, величин и

признаков основных напряжений (синий цвет показывает растяжение, красный - сжатие). Чтобы настроить плотность сетки, изменяется интервал сетки, используемый для получения измененной формы тела, семейств векторов и тензоров. Есть возможность одновременно отобразить изображение поля несколькими способами, чтобы получить четкое представление. Возможна одновременная работа с несколькими полями для одной и той же задачи. Чтобы открыть новое окно, выбирается «Новое окно». Также можете разделить одно окно на две или четыре части, отрегулировав изображение поля в каждой части отдельно.

Если задача имитирует физический процесс, развивающийся во времени, изображение шаблона поля будет иметь следующие функции. Для нестационарных задач изображение поля представляет собой фиксированное время, по умолчанию последнее. Отображаемая точка времени может быть установлена в окне «Текущая фаза / время» на панели инструментов. Изменение момента времени также влияет на окно калькулятора поля и другие окна анализа решений (таблицы, графики). В задачах, где поле изменяется синусоидально со временем (магнитное и электрическое поля переменного тока), значения поля могут представлять собой: эффективные значения или пиковые (амплитудные) значения или мгновенные значения для выбранной фазы.

Распределение физических величин поля вдоль контура может быть показано на графике. Чтобы открыть окно диаграммы, выберите команду «График» в меню «Вид» или в контекстном меню окна с изображением поля, в котором график уже установлен. В окне диаграммы вы также можете: выбрать отображаемые значения с помощью команды «Свойства графики» из меню «Вид» или контекстного меню, изменить масштаб изображения, отобразить или распечатать таблицу соответствия между цветом кривой на графике и отображаемым Физическое значение (легенда), копируется изображение из окна Графика в буфер обмена, а также открывается несколько окон графика для одного контура [28].

3.3 Выводы

В данной главе приведено описание применяемой расчетной схемы, включающей зону скольжения и сцепления. Описана работа с программным пакетом ELCUT для нахождения напряжений и деформаций, приведено описание интерфейса программы, выполняемые функции, все этапы проектирования модели, а также характеристики, описывающие исследуемую модель.

4 Расчет контактных напряжений в опорах вала буровой лебедки

4.1 Исходные данные для расчета

Расчет контактных напряжений в опоре качения подъемного вала буровой лебедки проводился на основе подшипника марки 3638, применяемого в опоре подъемного вала буровой лебедки марки ЛБУ-1100.

Подшипник марки 3638 обладает следующими техническими характеристиками:

1. Внутренний диаметр – 190 мм;
2. Наружный диаметр – 400 мм;
3. Ширина – 132 мм;
4. Количество роликов — 32 шт.;
5. Размеры ролика, мм — 51x48,583;
6. Масса – 84,5 кг;
7. Грузоподъемность динамическая — 2000 кН;
8. Грузоподъемность статическая — 2740 кН;
9. Максимальная номинальная частота вращения — 1000 об/мин.

Расчет производился по схеме моделирования дорожки качения в роликоподшипнике с учетом трения, описанной в главе 3 данной квалификационной работы.

4.2 Расчет

Для моделирования напряжений в роликовом подшипнике качения была построена геометрия (рисунок 4.1) на основе данных размеров исследуемого подшипника марки 3638.

Для того, чтобы расчет был произведен верно, необходимо задать все

необходимые параметры, относящиеся к свойствам материала подшипника, а также к действующим напряжениям. На графической модели присутствуют два блока: дорожка и ролик. В окне Свойства метки отдельно для двух блоков обозначаем свойства, используемого материала (рисунок 4.2), задавая значения модуля Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига. Так как весь подшипник выполнен из Стали ШХ-15, значения коэффициентов для блоков будут идентичны. Затем определяются нагрузки: термические деформации, и допустимые напряжения: растяжение, сжатие (рисунок, 4.3, 4.4).

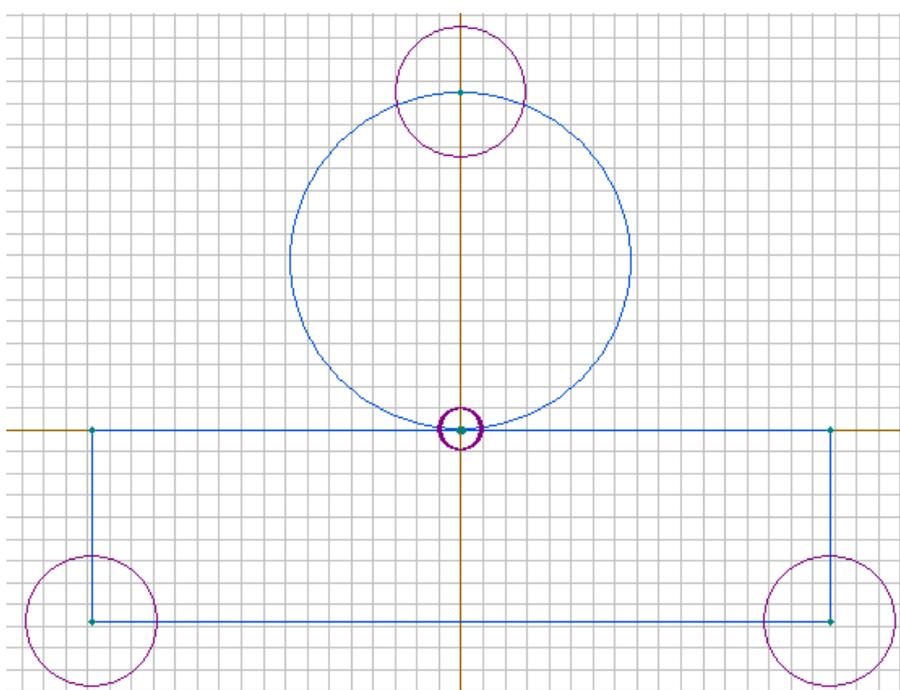


Рисунок 4.1 – Графическая модель исследуемого роликового подшипника качения

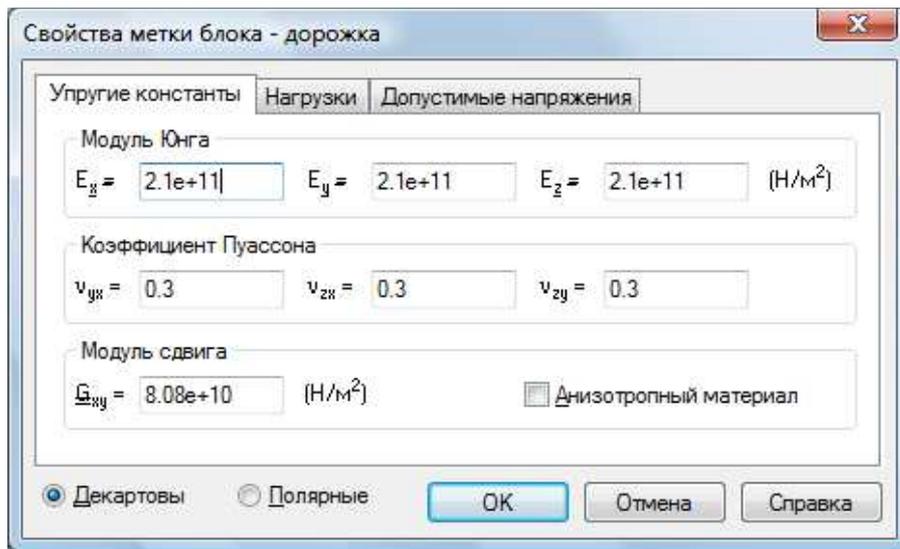


Рисунок 4.2 – Задание упругих характеристик материала блоков

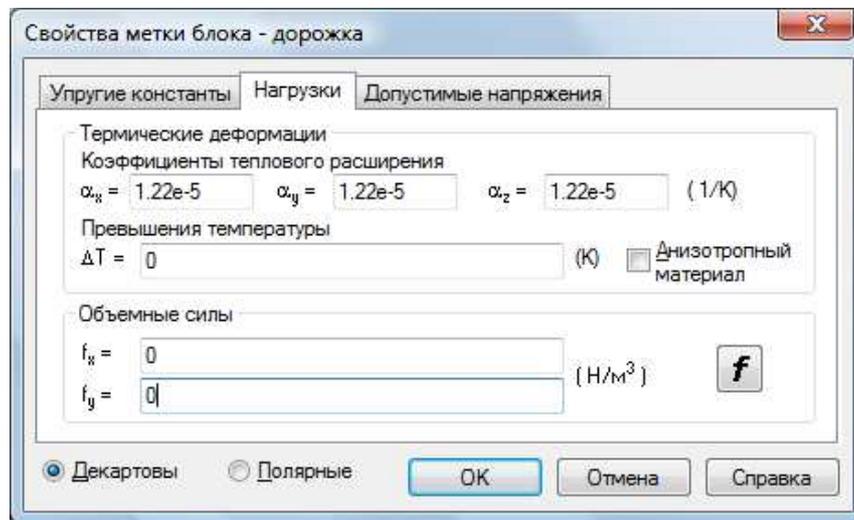


Рисунок 4.3 – Задание нагрузок

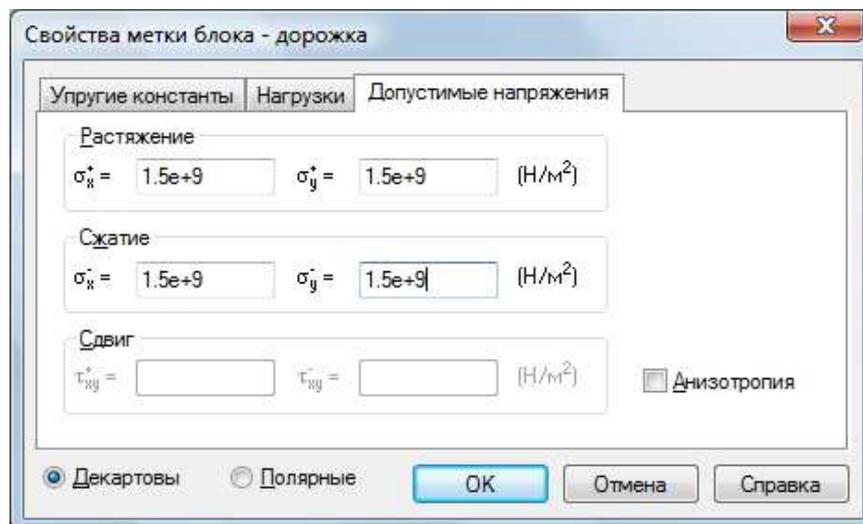


Рисунок 4.4 – Задание допустимых напряжений

Для каждой из вершин и ребер исследуемой модели определяем перемещение, которое может быть как свободным, так и фиксированным по оси X и Y . Также задаются значения нормального давления и поверхностная сила (рисунок 4.5).

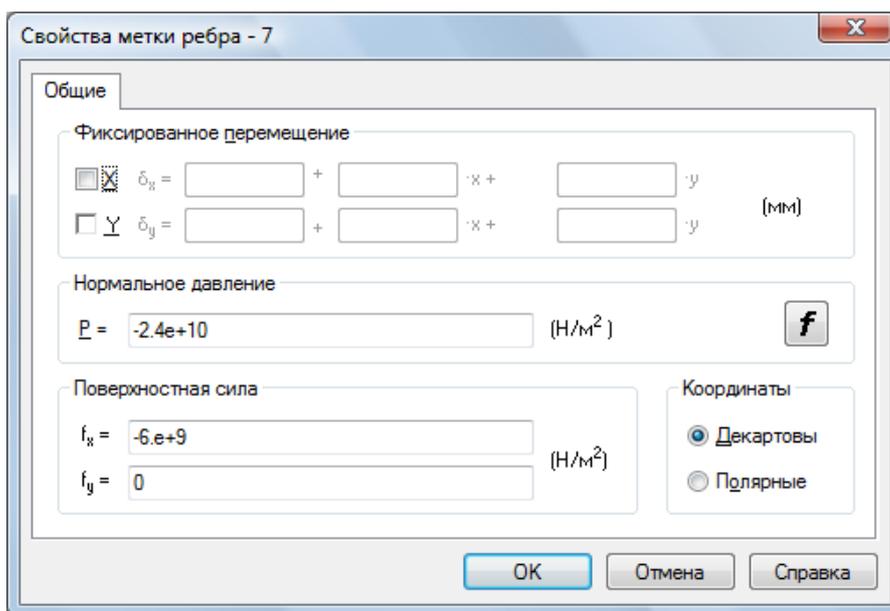


Рисунок 4.5 – Свойства метки ребра

Аналогично задаётся перемещение для меток вершин: либо свободное, либо фиксированное по осям координат.

Так как данный программный пакет решает задачи на основе метода конечных элементов, для исследуемой модели необходимо создать сетку конечных элементов, для этого выбираем функцию Построение сетки, затем программа автоматически представляет полученный результат разделения модели на конечные элементы (рисунок 4.6).

Так как при моделировании были учтены нагрузки, свойства материалов, перемещение вершин и граней модели, то результат расчета будет произведен с учетом всех вышеуказанных факторов, что бывает невозможно или трудоемко при произведении аналогичного расчета классическими методами.

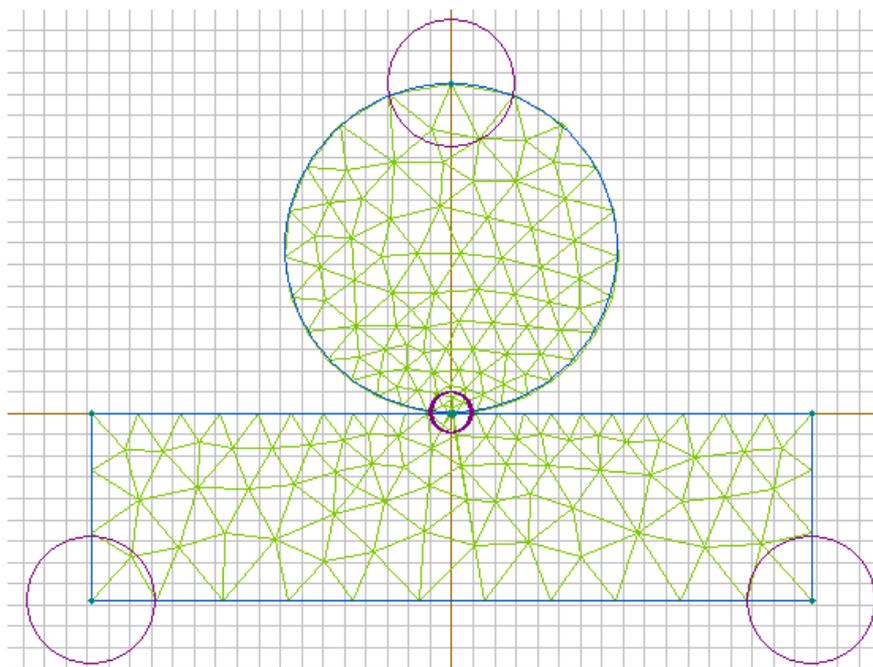


Рисунок 4.6 – Сетка конечных элементов для исследуемой модели роликового подшипника качения

4.3 Анализ произведённого расчета

Чтобы получить решение текущей задачи, необходимо выбрать в программном пакете ELCUT Задача – Решить. После того, как расчет будет завершен, программа выводит результат в новом окне.

Результат расчета представляет собой исследуемую модель с наложенным с помощью средств цветной графики распределением параметров, с указанием предполагаемой деформации.

С помощью диалогового окна Средства картины поля (рисунок 4.7) выбираем необходимый параметр, распределение которого будет отображаться на исследуемой модели.

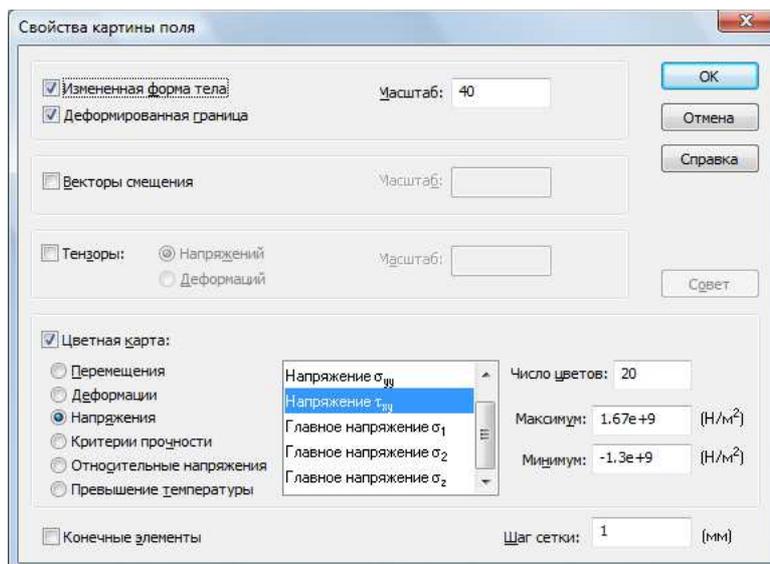


Рисунок 4.7 – Диалоговое окно свойств картины поля

Таким образом, выбираем для отображения в виде цветной карты касательные напряжения, результат изображен на рисунке 4.8, соответствие цвета величине напряжений изображено на шкале. Соответствующий график можно получить, нажав Вид – График. Полученные графики изображены на рисунках 4.9, 4.10.

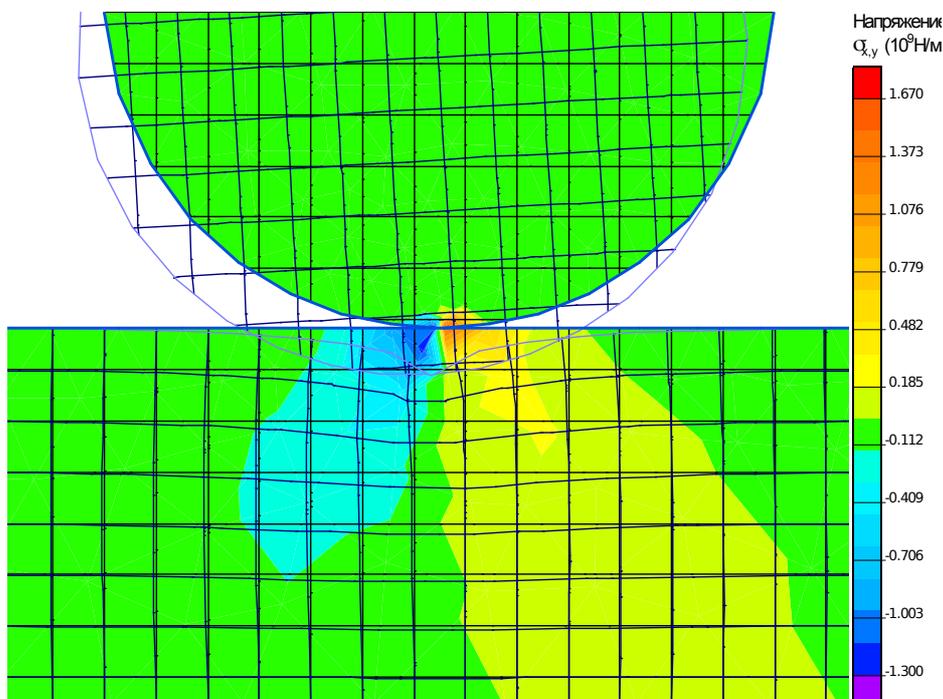


Рисунок 4.8 – Распределение касательных напряжений

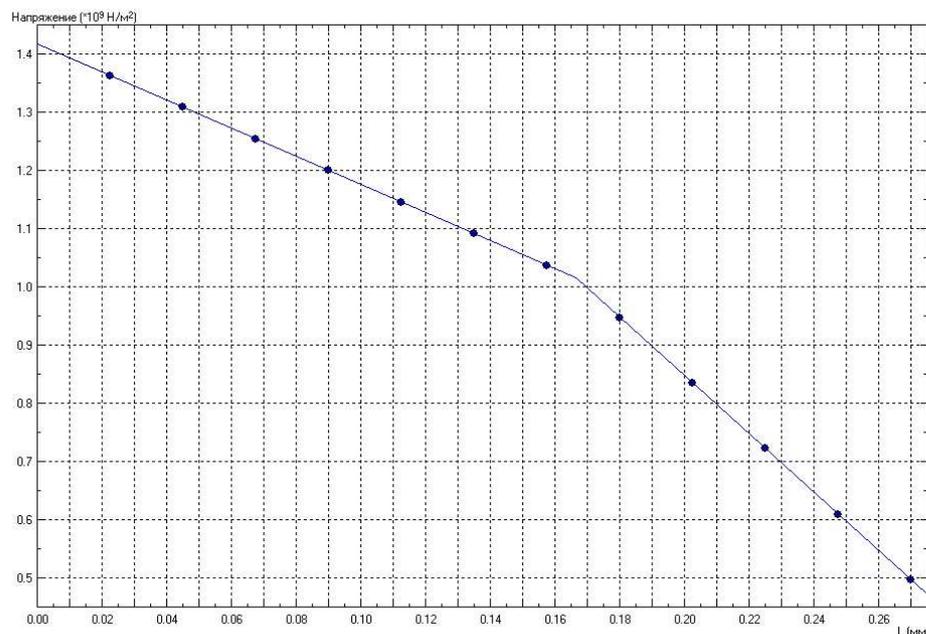


Рисунок 4.9 – График распределения касательных напряжений по глубине площадки контакта на участке сцепления

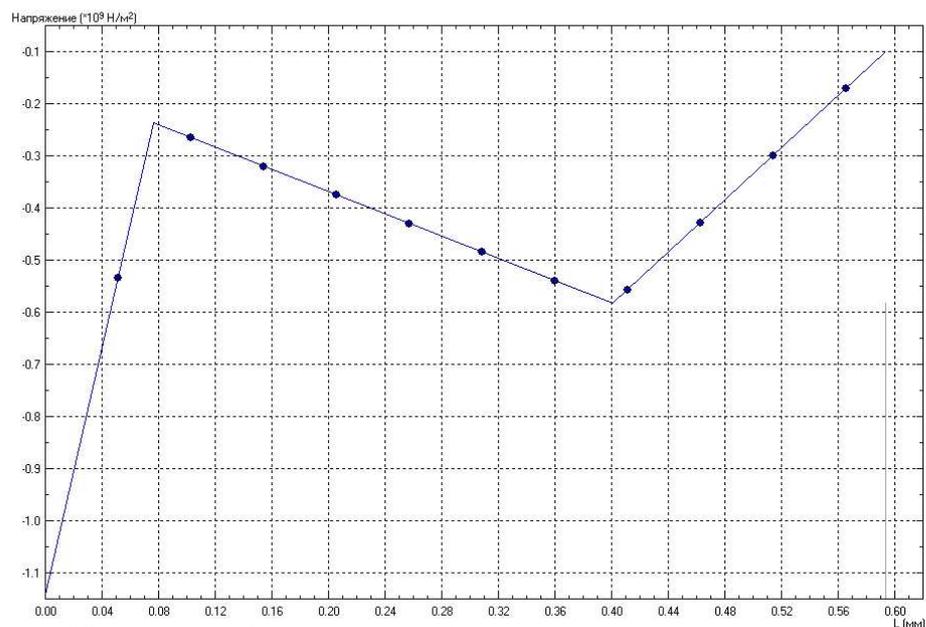


Рисунок 4.10 – График распределения касательных напряжений по глубине площадки контакта на участке скольжения

Из карты распределения касательных напряжений (рисунок 4.8) следует, что касательные напряжения в зонах скольжения и сцепления распределяются по-разному, на карте видно, что участке сцепления на дорожке качения и ролике происходит сжатие, а на участке скольжения растяжение.

Из графика распределения касательных напряжений по глубине (рисунок

4.9, 4.10) следует, что в зоне сцепления на поверхности дорожки напряжения максимальны и приближаются к минимуму при увеличении глубины.

Также был получен график распределения касательных напряжений вдоль поверхности контакта (рисунок 4.11). На полученном графике присутствует перелом, соответствующий точке смены площадки скольжения и сцепления. Участок графика в диапазоне длины от 0,010 мм до 0,115 мм указывает на напряжения на площадке контакта дорожки качения и цилиндрического ролика, также из графика видно, что напряжения в крайних точках площадки контакта не равны нулю, а распространяются далее по дорожке качения, что уточняет методику расчета напряжений теории Герца.

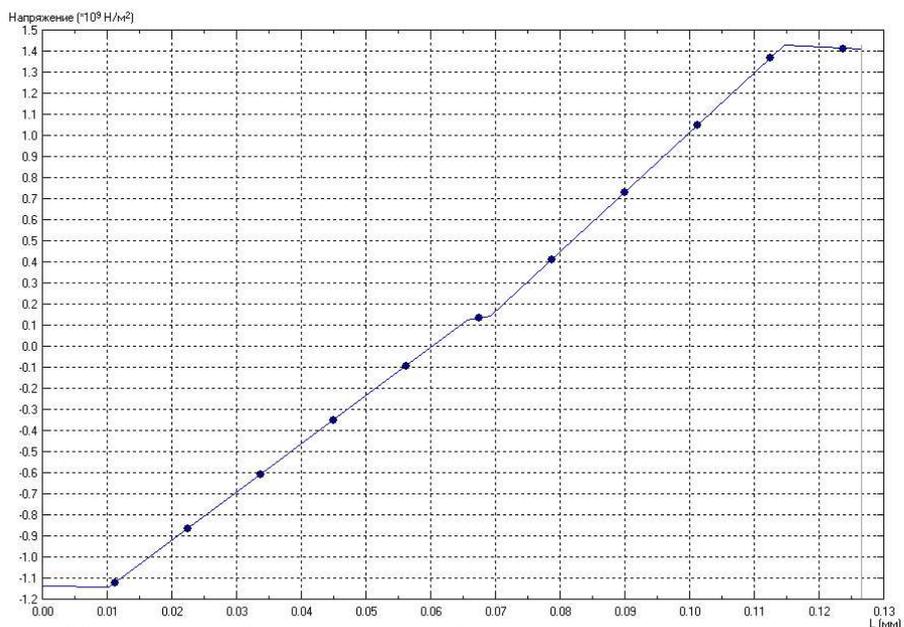


Рисунок 4.11 – График распределения касательных напряжений вдоль поверхности контакта

Помимо касательных напряжений, определим соответствие модели критерию Мизеса. Теория утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. Результат изображен на рисунке 4.12.

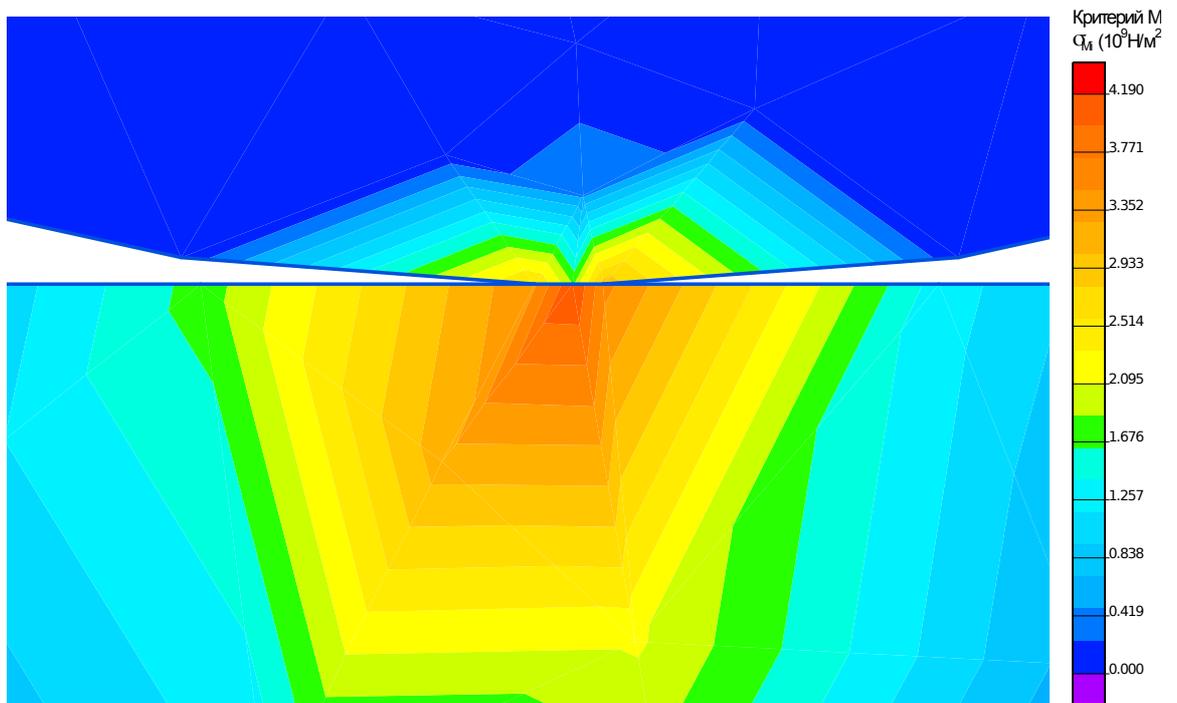


Рисунок 4.12– Критерий Мизеса

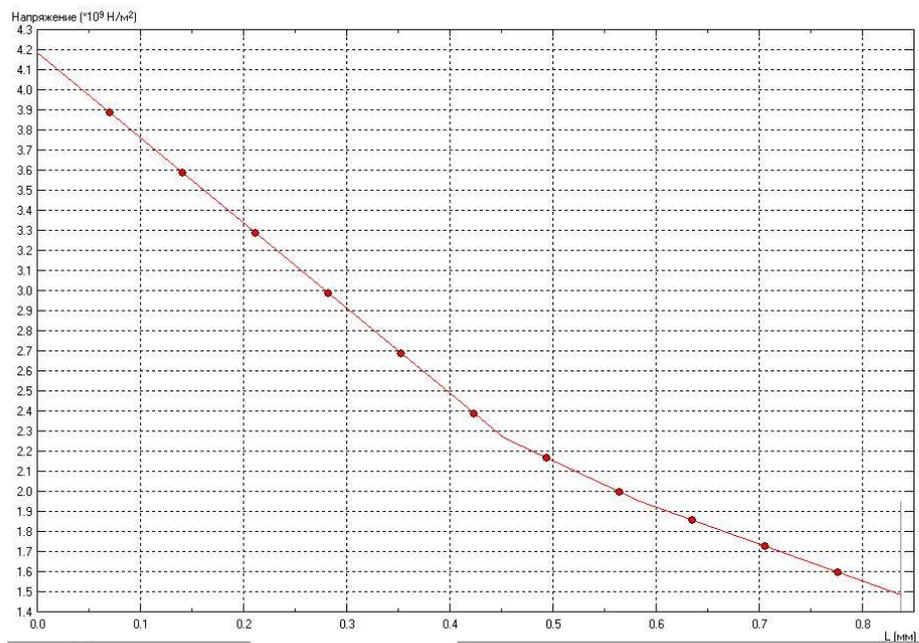


Рисунок 4.13 – График распределения напряжений в соответствии с критерием Мизеса по глубине

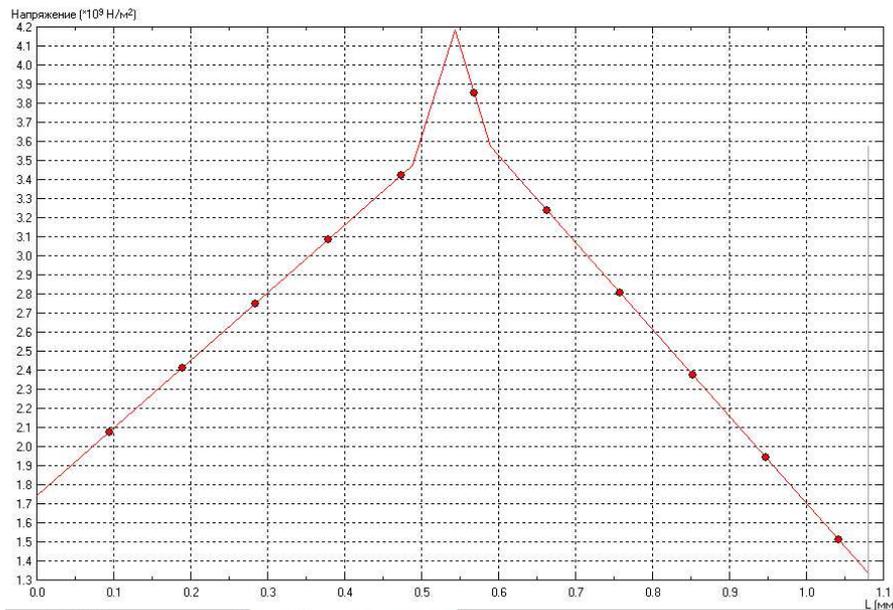


Рисунок 4.14 – График распределения напряжений в соответствии с критерием Мизеса вдоль площадки контакта

Опираясь на графическую карту и график распределения напряжений по критерию Мизеса (рисунок 4.13), соответствующую распределению напряжений по критерию Мизеса, можно сделать вывод о том, что в зоне контакта дорожки качения и ролика исследуемой модели максимальные напряжения меньше предельного значения, что соответствует критерию.

Полный результат проведенного расчета приведён в виде таблиц в приложениях А – В.

4.4 Выводы

В главе приведен анализ произведенного расчета напряжений в подшипниковой опоре подъемного вала буровой лебедки.

Для проведения расчета была сформирована модель роликового подшипника качения, обозначены действующие на подшипник нагрузки, а также определены свойства материала модели – стали ШХ15, сформирована сетка конечных элементов.

Для исследуемой модели подшипника марки 3638 найдены касательные

напряжения отдельно на площадке скольжения и сцепления, получены графики, указывающие на растяжение и сжатие. Получен график распределения касательных напряжений вдоль поверхности контакта, уточняющий расчет напряжений в соответствии с теорией Герца. Проверено соответствие исследуемой модели критерию Мизеса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы был проведён анализ эксплуатации буровой лебёдки, в частности подшипниковых опор подъёмного вала, определены основные причины выхода их из строя. На подшипниковые опоры действуют большие нагрузки, влияющие на износостойкость и долговечность узла и агрегата в целом, этим обосновывается необходимость в появлении различных методик расчета контактных напряжений в подшипниковых опорах.

Был проведён поиск основных методик решения контактных задач, вследствие чего были сделаны выводы о необходимости уточнения классических расчетов, не учитывающих условия трения при контакте, свойства поверхностей тел, а также граничные условия.

Для достижения поставленной цели был произведён анализ существующих программных пакетов, применяемых для расчета контактных напряжений методом конечных элементов, при котором учитывающих граничные условия и нагрузки при взаимодействии контактирующих тел.

Из группы рассмотренных программ выбрана студенческая версия программного пакета ELCUT, включающая в себя функцию, необходимую для достижения поставленной цели. Для проведения необходимого расчета изучен интерфейс программного пакета, его функционал, алгоритм составления расчетной модели, получения сетки конечных элементов для исследуемого образца и решения поставленной контактной задачи.

На данный момент решение инженерных задач производится на базе программного обеспечения, это поднимает проектную работу на качественно новый уровень, при этом возрастает интенсивность и качество результата проектирования, решение сложных инженерных задач стало более обосновано, хотя раньше они решались только упрощёнными методами, то есть с исключением из расчета различных условий, значительно усложняющих расчет.

Анализ контактных напряжений производился на основе площадки

контакта Герца, с учетом скольжения и сцепления. В результате расчета были получены цветные карты распределения касательных напряжений, распределение напряжений в соответствии с критерий Мизеса, а также построены графики распределения касательных напряжений вдоль поверхности контакта и по глубине на площадках скольжения и сцепления соответственно. Проверено соответствие исследуемой модели критерию Мизеса.

Из полученных графиков сделаны выводы о том, что напряжения в крайних точках площадки контакта не равны нулю, а распространяются далее по дорожке качения, что уточняет методику расчета напряжений теории Герца. Следовательно, поставленная цель данной работы была достигнута.

Результатом применения данной методики расчета контактных напряжений взаимодействующих тел является учет свойств материала, из которых состоят контактирующие тела, сил трения, нагрузок, краевых условий, вследствие чего результат, полученный с помощью программного пакета ELCUT, можно считать более точным по сравнению с классическими методиками расчета, не учитывающих данные условия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Овчинникова, В. П. Справочник бурового мастера. Том 1 / В. П. Овчинникова, С. И. Грачёва, А. А. Фролова. – М. : Инфра-инженерия, 2006. – 607 с.
- 2 Буланашский машиностроительный завод [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.generation-bo.ru/>, свободный. – Загл. с экрана
- 3 Бабин, С. Новое поколение буровых установок «Генерация» / С. Бабин. // Бурение и нефть. – 2011. – июнь. – С
- 4 Пат. 2052680 Российская Федерация, Опора качения вала/ автор и патентообладатель - Елизаров С.П.
- 5 Пат. 2006700 Российская Федерация, Опора качения / автор и патентообладатель - Елизаров С.П.
- 6 Галилеев С.М. Основы проектирования и конструирования. Валы и оси. Соединения (Детали машин). Конспект лекций (Часть 2) / Галилеев С.М., Паршина Л.В., Граменицкий С.Е.// СПб.: СПбГУСЭ, 2013. — 40 с.
- 7 Кузьменко А.Г. Контактные задачи с учетом износа для цилиндрических опор скольжения // Трение и износ. - 1981. - Т. 2, № 3. - С. 502-511.
- 8 Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М: Мир, 1989. - 510 с. 73
- 9 Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970.- 227 с.
- 10 Добычин М.Н., Гафнер С.Л. Влияние трения на контактные параметры вал-втулка // Проблемы трения и изнашивания. - Киев: Техника. - 1976, № 3.- С. 30-36.
- 11 Пелех Б.Л., Максимук А.В., Коровайчук И.М. Контактные задачи для слоистых элементов конструкций. - Киев: Наук. Дум., 1988. - 280 с. 173
- 12 Коровчинский М.В. Локальный контакт упругих тел при изнашивании их поверхностей. В кн. Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил

трения и износа. – М.: 1971, с. 130-140

13 Галин Л.А., Горячева И.Г. Осесимметричная задача теории упругости при наличии износа. – ПММ, 1977, т.41, Вып. 5, с.807-812.

14 Горячева И.Г. Контактные задачи в трибологии. – Дисс.докт. физ.-мат.наук.1987

15 Александров В.М., Коваленко Е.В. Плоские контактные задачи теории упругости при наличии нелинейного износа. В кн.: Контактная жесткость в приборостроении и машиностроении. – Рига, 1979, с.62-63.

16 Теплый М.И. Контактные задачи для тел с круговыми границами. - Львов: Выща школа, 1980. - 176 с.

17 Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. - М.: Наука, 1981.- 688 с.

18 Теплый М.И. О расчете напряжений в цилиндрических сопряжениях // Проблемы прочности. - 1979. - № 9. - С. 97-100.

19 Каландия А.И. Математические методы двумерной теории упругости // М.: Наука, 1973. - 304 с.

20. Чернець М.В. Про один метод розрахунку ресурсу циліндричних систем ковзання // Доповіді Національної академії наук України. - 1996, № 1. - С. 47-49.

21 Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина - М.: Мир, 1988.- 352 с.

22 Марчук Г.И. Методы вычислительной математики - М.: Наука, 1977.- 608 с.

23 Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975. - 473 с.

24 Обзор современных систем автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.bourabai.kz/graphics/dir.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

25 Пинегин, С. В. Трение качения в машинах и приборах / С. В. Пинегин. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.

26 Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

27 Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / Горячева И. Г. М.: Наука, 2001. 478 с.

28 Руководство пользователя Elcut [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://elcut.ru/free_doc_r.htm, свободный. – Загл. с экрана.

29 Кравчук А.С. Механика контактного взаимодействия тел с круговыми границами / А.С. Кравчук, А.В. Чигарев. – Мн.: Технопринт. – 2000. – 196с.

30 СТО 4.2-07-2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности [текст] / разработ. Е. Н. Осокин, Л. В. Белошапко, М. И. Губанов. – Введ. 09.01.2014. – Красноярск: ПЦ БИК СФУ, 2014. – 60 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Распределение физических величин по поверхности

| L (мм) | x (мм) | y (мм) | N_y | δ (мм) | δ_x (мм) | δ_y (мм) | $\sigma_{x,x}$ (Н/м ²) | $\sigma_{y,y}$ (Н/м ²) | $\sigma_{x,y}$ (Н/м ²) | σ_1 (Н/м ²) | σ_2 (Н/м ²) | σ_3 (Н/м ²) | σ_n (Н/м ²) | σ_t (Н/м ²) |
|-----------|------------|---------|----------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.00000 | -0.538695 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0123706 | -0.00120706 | -0.0123115 | -8.63484e+8 | -1.62456e+8 | -8.96392e+8 | 4.49516e+8 | -1.47546e+9 | 0.00000 | -1.62456e+8 | -8.63484e+8 |
| 0.0540356 | -0.484660 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0135329 | -0.00150574 | -0.0134488 | -1.05581e+9 | -4.83181e+8 | -9.23540e+8 | 1.97409e+8 | -1.73640e+9 | 0.00000 | -4.83181e+8 | -1.05581e+9 |
| 0.108071 | -0.430624 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0146973 | -0.00180443 | -0.0145861 | -1.24813e+9 | -8.03906e+8 | -9.50689e+8 | -49729100. | -2.00231e+9 | 0.00000 | -8.03906e+8 | -1.24813e+9 |
| 0.162107 | -0.376589 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0158634 | -0.00210311 | -0.0157234 | -1.44046e+9 | -1.12463e+9 | -9.77837e+8 | -2.92039e+8 | -2.27305e+9 | 0.00000 | -1.12463e+9 | -1.44046e+9 |
| 0.216142 | -0.322553 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0170309 | -0.00240180 | -0.0168607 | -1.63278e+9 | -1.44536e+9 | -1.00498e+9 | -5.29725e+8 | -2.54841e+9 | 0.00000 | -1.44536e+9 | -1.63278e+9 |
| 0.270178 | -0.268518 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0181994 | -0.00270049 | -0.0179979 | -1.82511e+9 | -1.76608e+9 | -1.03213e+9 | -7.63039e+8 | -2.82815e+9 | 0.00000 | -1.76608e+9 | -1.82511e+9 |
| 0.324213 | -0.214482 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0193688 | -0.00299917 | -0.0191352 | -2.01743e+9 | -2.08680e+9 | -1.05928e+9 | -9.92270e+8 | -3.11197e+9 | 0.00000 | -2.08680e+9 | -2.01743e+9 |
| 0.378249 | -0.160446 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0205390 | -0.00329786 | -0.0202725 | -2.20976e+9 | -2.40753e+9 | -1.08643e+9 | -1.21772e+9 | -3.39956e+9 | 0.00000 | -2.40753e+9 | -2.20976e+9 |
| 0.432285 | -0.106411 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0217097 | -0.00359655 | -0.0214098 | -2.40208e+9 | -2.72825e+9 | -1.11358e+9 | -1.43971e+9 | -3.69062e+9 | 0.00000 | -2.72825e+9 | -2.40208e+9 |
| 0.487695 | -0.0510000 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0229108 | -0.00390283 | -0.0225760 | -2.59930e+9 | -3.05714e+9 | -1.14142e+9 | -1.66408e+9 | -3.99237e+9 | 0.00000 | -3.05714e+9 | -2.59930e+9 |
| 0.540356 | 0.00166029 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0237874 | -0.00433921 | -0.0233883 | -2.58840e+9 | -4.71238e+9 | 66309100. | -2.58634e+9 | -4.71445e+9 | 0.00000 | -4.71238e+9 | -2.58840e+9 |
| 0.589695 | 0.0510000 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0227757 | -0.00452603 | -0.0223215 | -1.53744e+9 | -2.95796e+9 | 1.43905e+9 | -6.42918e+8 | -3.85248e+9 | 0.00000 | -2.95796e+9 | -1.53744e+9 |
| 0.648427 | 0.109731 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0215477 | -0.00447974 | -0.0210769 | -1.36162e+9 | -2.66388e+9 | 1.35344e+9 | -5.10822e+8 | -3.51468e+9 | 0.00000 | -2.66388e+9 | -1.36162e+9 |
| 0.702462 | 0.163767 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0204198 | -0.00443714 | -0.0199319 | -1.19985e+9 | -2.39332e+9 | 1.27469e+9 | -3.89133e+8 | -3.20403e+9 | 0.00000 | -2.39332e+9 | -1.19985e+9 |
| 0.756498 | 0.217803 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0192939 | -0.00439455 | -0.0187868 | -1.03808e+9 | -2.12276e+9 | 1.19593e+9 | -2.67264e+8 | -2.89357e+9 | 0.00000 | -2.12276e+9 | -1.03808e+9 |
| 0.810534 | 0.271838 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0181706 | -0.00435196 | -0.0176417 | -8.76316e+8 | -1.85219e+9 | 1.11717e+9 | -1.45174e+8 | -2.58333e+9 | 0.00000 | -1.85219e+9 | -8.76316e+8 |
| 0.864569 | 0.325874 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0170503 | -0.00430937 | -0.0164967 | -7.14550e+8 | -1.58163e+9 | 1.03841e+9 | -22807100. | -2.27337e+9 | 0.00000 | -1.58163e+9 | -7.14550e+8 |
| 0.918605 | 0.379909 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0159336 | -0.00426678 | -0.0153516 | -5.52783e+8 | -1.31107e+9 | 9.59657e+8 | 99912900. | -1.96376e+9 | 0.00000 | -1.31107e+9 | -5.52783e+8 |
| 0.972640 | 0.433945 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0148213 | -0.00422418 | -0.0142066 | -3.91017e+8 | -1.04050e+9 | 8.80900e+8 | 2.23091e+8 | -1.65461e+9 | 0.00000 | -1.04050e+9 | -3.91017e+8 |
| 1.02668 | 0.487980 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0137146 | -0.00418159 | -0.0130615 | -2.29251e+8 | -7.69942e+8 | 8.02142e+8 | 3.46878e+8 | -1.34607e+9 | 0.00000 | -7.69942e+8 | -2.29251e+8 |
| 1.08071 | 0.542016 | 0.00000 | -1.00000 | 0.0126148 | -0.00413900 | -0.0119165 | -67484200. | -4.99380e+8 | 7.23385e+8 | 4.71498e+8 | -1.03836e+9 | 0.00000 | -4.99380e+8 | -67484200. |

Окончание приложения А

| L (мм) | $\sigma_{n,t}$ (Н/м ²) | ε_1 | ε_2 | ε_3 | ε_n | ε_t | $\varepsilon_{n,t}$ | σ_{Tr} (Н/м ²) | σ_{Mi} (Н/м ²) | σ_{Mo} (Н/м ²) | σ_{Pr} (Н/м ²) | K_{Hi} |
|-----------|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 0.00000 | 8.96392e+8 | 0.00959842 | -0.0130182 | 0.00146563 | 4.59948e-4 | -0.00387975 | 0.00554910 | 1.92497e+9 | 1.74421e+9 | 1.92497e+9 | 1.74421e+9 | 0.280764 |
| 0.0540356 | 9.23540e+8 | 0.00900588 | -0.0141358 | 0.00219856 | -7.92563e-4 | -0.00433740 | 0.00571716 | 1.93381e+9 | 1.84305e+9 | 1.93381e+9 | 1.84305e+9 | 0.372467 |
| 0.108071 | 9.50689e+8 | 0.00843040 | -0.0152705 | 0.00293149 | -0.00204507 | -0.00479506 | 0.00588521 | 2.00231e+9 | 1.97791e+9 | 2.00231e+9 | 1.97791e+9 | 0.533654 |
| 0.162107 | 9.77837e+8 | 0.00787080 | -0.0164211 | 0.00366441 | -0.00329758 | -0.00525271 | 0.00605327 | 2.27305e+9 | 2.14201e+9 | 2.27305e+9 | 2.14201e+9 | 0.764325 |
| 0.216142 | 1.00498e+9 | 0.00732595 | -0.0175864 | 0.00439734 | -0.00455009 | -0.00571037 | 0.00622133 | 2.54841e+9 | 2.32918e+9 | 2.54841e+9 | 2.32918e+9 | 1.06448 |
| 0.270178 | 1.03213e+9 | 0.00679478 | -0.0187654 | 0.00513027 | -0.00580261 | -0.00616802 | 0.00638939 | 2.82815e+9 | 2.53430e+9 | 2.82815e+9 | 2.53430e+9 | 1.43412 |
| 0.324213 | 1.05928e+9 | 0.00627627 | -0.0199571 | 0.00586320 | -0.00705512 | -0.00662567 | 0.00655745 | 3.11197e+9 | 2.75337e+9 | 3.11197e+9 | 2.75337e+9 | 1.87324 |
| 0.378249 | 1.08643e+9 | 0.00576947 | -0.0211604 | 0.00659612 | -0.00830763 | -0.00708333 | 0.00672551 | 3.39956e+9 | 2.98331e+9 | 3.39956e+9 | 2.98331e+9 | 2.38185 |
| 0.432285 | 1.11358e+9 | 0.00527350 | -0.0223746 | 0.00732905 | -0.00956014 | -0.00754098 | 0.00689357 | 3.69062e+9 | 3.22181e+9 | 3.69062e+9 | 3.22181e+9 | 2.95995 |
| 0.487695 | 1.14142e+9 | 0.00477528 | -0.0236301 | 0.00808063 | -0.0108445 | -0.00801028 | 0.00706591 | 3.99237e+9 | 3.47340e+9 | 3.99237e+9 | 3.47340e+9 | 3.62491 |
| 0.540356 | -66309100. | -0.00554270 | -0.0187932 | 0.0104297 | -0.0187422 | -0.00559377 | -4.10485e-4 | 4.71445e+9 | 4.08925e+9 | 4.71445e+9 | 4.08925e+9 | 7.42614 |
| 0.589695 | -1.43905e+9 | 0.0108589 | -0.0258436 | 0.00642199 | -0.0118892 | -0.00309549 | -0.00890838 | 3.85248e+9 | 3.57465e+9 | 3.85248e+9 | 3.57465e+9 | 2.91802 |
| 0.648427 | -1.35344e+9 | 0.0105257 | -0.0239441 | 0.00575071 | -0.0107400 | -0.00267834 | -0.00837846 | 3.51468e+9 | 3.28915e+9 | 3.51468e+9 | 3.28915e+9 | 2.36581 |
| 0.702462 | -1.27469e+9 | 0.0102198 | -0.0221970 | 0.00513310 | -0.00968268 | -0.00229454 | -0.00789092 | 3.20403e+9 | 3.02828e+9 | 3.20403e+9 | 3.02828e+9 | 1.90933 |
| 0.756498 | -1.19593e+9 | 0.00991453 | -0.0204507 | 0.00451548 | -0.00862538 | -0.00191074 | -0.00740337 | 2.89357e+9 | 2.76963e+9 | 2.89357e+9 | 2.76963e+9 | 1.50227 |
| 0.810534 | -1.11717e+9 | 0.00961011 | -0.0187051 | 0.00389787 | -0.00756809 | -0.00152695 | -0.00691583 | 2.58333e+9 | 2.51389e+9 | 2.58333e+9 | 2.51389e+9 | 1.14464 |
| 0.864569 | -1.03841e+9 | 0.00930673 | -0.0169607 | 0.00328026 | -0.00651079 | -0.00114315 | -0.00642828 | 2.27337e+9 | 2.26206e+9 | 2.27337e+9 | 2.26206e+9 | 0.836437 |
| 0.918605 | -9.59657e+8 | 0.00900465 | -0.0152175 | 0.00266264 | -0.00545349 | -7.59349e-4 | -0.00594073 | 2.06368e+9 | 2.01558e+9 | 2.06368e+9 | 2.01558e+9 | 0.577658 |
| 0.972640 | -8.80900e+8 | 0.00870424 | -0.0134760 | 0.00204503 | -0.00439619 | -0.000375550 | -0.00545319 | 1.87770e+9 | 1.77669e+9 | 1.87770e+9 | 1.77669e+9 | 0.368306 |
| 1.02668 | -8.02142e+8 | 0.00840599 | -0.0117366 | 0.00142742 | -0.00333889 | 8.24788e-6 | -0.00496564 | 1.69295e+9 | 1.54892e+9 | 1.69295e+9 | 1.54892e+9 | 0.208381 |
| 1.08071 | -7.23385e+8 | 0.00811064 | -0.0100002 | 8.09806e-4 | -0.00228159 | 3.92046e-4 | -0.00447810 | 1.50986e+9 | 1.33794e+9 | 1.50986e+9 | 1.33794e+9 | 0.0978817 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Распределение физических величин на площадке сцепления по глубине

| L (мм) | x (мм) | y (мм) | N_x | N_y | δ (мм) | δ_x (мм) | δ_y (мм) | σ_{xx} (Н/м ²) | σ_{yy} (Н/м ²) | σ_{xy} (Н/м ²) | σ_1 (Н/м ²) | σ_2 (Н/м ²) | σ_3 (Н/м ²) | σ_n (Н/м ²) |
|-----------|-----------|------------|----------|----------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.00000 | 0.0817607 | 0.00000 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0221323 | -0.00450178 | -0.0216696 | -1.44535e+9 | -2.80393e+9 | 1.39421e+9 | -5.73752e+8 | -3.67553e+9 | 0.00000 | -1.44535e+9 |
| 0.0331386 | 0.0817607 | -0.0331386 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0216982 | -0.00430382 | -0.0212671 | -1.37661e+9 | -2.77549e+9 | 1.31413e+9 | -5.87375e+8 | -3.56472e+9 | 0.00000 | -1.37661e+9 |
| 0.0662772 | 0.0817607 | -0.0662772 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0212648 | -0.00410586 | -0.0208646 | -1.30786e+9 | -2.74704e+9 | 1.23404e+9 | -5.98932e+8 | -3.45597e+9 | 0.00000 | -1.30786e+9 |
| 0.0994157 | 0.0817607 | -0.0994157 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0208319 | -0.00390789 | -0.0204621 | -1.23912e+9 | -2.71860e+9 | 1.15396e+9 | -6.08152e+8 | -3.34956e+9 | 0.00000 | -1.23912e+9 |
| 0.132554 | 0.0817607 | -0.132554 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0203998 | -0.00370993 | -0.0200596 | -1.17037e+9 | -2.69015e+9 | 1.07387e+9 | -6.14726e+8 | -3.24580e+9 | 0.00000 | -1.17037e+9 |
| 0.165693 | 0.0817607 | -0.165693 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0199683 | -0.00351197 | -0.0196571 | -1.10163e+9 | -2.66171e+9 | 9.93790e+8 | -6.18308e+8 | -3.14503e+9 | 0.00000 | -1.10163e+9 |
| 0.198831 | 0.0817607 | -0.198831 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0195377 | -0.00331400 | -0.0192546 | -1.03288e+9 | -2.63326e+9 | 9.13705e+8 | -6.18512e+8 | -3.04763e+9 | 0.00000 | -1.03288e+9 |
| 0.231970 | 0.0817607 | -0.231970 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0191078 | -0.00311604 | -0.0188520 | -9.64140e+8 | -2.60482e+9 | 8.33621e+8 | -6.14915e+8 | -2.95404e+9 | 0.00000 | -9.64140e+8 |
| 0.265109 | 0.0817607 | -0.265109 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0186789 | -0.00291807 | -0.0184495 | -8.95396e+8 | -2.57637e+9 | 7.53537e+8 | -6.07062e+8 | -2.86470e+9 | 0.00000 | -8.95396e+8 |
| 0.298247 | 0.0817607 | -0.298247 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0182509 | -0.00272011 | -0.0180470 | -8.26651e+8 | -2.54792e+9 | 6.73452e+8 | -5.94478e+8 | -2.78010e+9 | 0.00000 | -8.26651e+8 |
| 0.331386 | 0.0817607 | -0.331386 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0178239 | -0.00252215 | -0.0176445 | -7.57907e+8 | -2.51948e+9 | 5.93368e+8 | -5.76681e+8 | -2.70071e+9 | 0.00000 | -7.57907e+8 |
| 0.364524 | 0.0817607 | -0.364524 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0174009 | -0.00231939 | -0.0172456 | -7.11668e+8 | -2.53129e+9 | 4.79734e+8 | -5.92936e+8 | -2.65002e+9 | 0.00000 | -7.11668e+8 |
| 0.397663 | 0.0817607 | -0.397663 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0169839 | -0.00210914 | -0.0168524 | -7.00584e+8 | -2.60597e+9 | 3.13697e+8 | -6.50266e+8 | -2.65629e+9 | 0.00000 | -7.00584e+8 |
| 0.430802 | 0.0817607 | -0.430802 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0165684 | -0.00189889 | -0.0164592 | -6.89499e+8 | -2.68066e+9 | 1.47661e+8 | -6.78609e+8 | -2.69155e+9 | 0.00000 | -6.89499e+8 |
| 0.463940 | 0.0817607 | -0.463940 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0160525 | -0.00170626 | -0.0159616 | -5.97788e+8 | -2.60942e+9 | 57446400. | -5.96148e+8 | -2.61106e+9 | 0.00000 | -5.97788e+8 |
| 0.497079 | 0.0817607 | -0.497079 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0154643 | -0.00152633 | -0.0153888 | -4.47968e+8 | -2.43302e+9 | 21877600. | -4.47727e+8 | -2.43326e+9 | 0.00000 | -4.47968e+8 |
| 0.530217 | 0.0817607 | -0.530217 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0149121 | -0.00135895 | -0.0148501 | -3.10371e+8 | -2.27048e+9 | 4763380. | -3.10359e+8 | -2.27049e+9 | 0.00000 | -3.10371e+8 |
| 0.563356 | 0.0817607 | -0.563356 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0145956 | -0.00129841 | -0.0145378 | -2.66334e+8 | -2.19305e+9 | 49682300. | -2.65054e+8 | -2.19433e+9 | 0.00000 | -2.66334e+8 |
| 0.596494 | 0.0817607 | -0.596494 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0143342 | -0.00128508 | -0.0142764 | -2.55553e+8 | -2.12791e+9 | 48751300. | -2.54285e+8 | -2.12917e+9 | 0.00000 | -2.55553e+8 |
| 0.629633 | 0.0817607 | -0.629633 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0140727 | -0.00127175 | -0.0140151 | -2.44773e+8 | -2.06277e+9 | 47820200. | -2.43516e+8 | -2.06402e+9 | 0.00000 | -2.44773e+8 |
| 0.662772 | 0.0817607 | -0.662772 | -1.00000 | -0.00000 | 0.0138113 | -0.00125841 | -0.0137538 | -2.33992e+8 | -1.99763e+9 | 46889200. | -2.32747e+8 | -1.99887e+9 | 0.00000 | -2.33992e+8 |

Окончание приложения Б

| L (мм) | x (мм) | y (мм) | σ_t (Н/м ²) | $\sigma_{n,t}$ (Н/м ²) | ε_1 | ε_n | ε_t | $\varepsilon_{n,t}$ | σ_{Tr} (Н/м ²) | σ_{Mi} (Н/м ²) | σ_{Mo} (Н/м ²) | σ_{Pr} (Н/м ²) | K_{Hi} |
|-----------|-----------|------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| 0.00000 | 0.0817607 | 0.00000 | -2.80393e+9 | 1.39421e+9 | 0.0106844 | -0.00287701 | -0.0112873 | 0.00863083 | 3.67553e+9 | 3.42489e+9 | 3.67553e+9 | 3.42489e+9 | 2.62152 |
| 0.0331386 | 0.0817607 | -0.0331386 | -2.77549e+9 | 1.31413e+9 | 0.00991627 | -0.00259029 | -0.0112500 | 0.00813507 | 3.56472e+9 | 3.31035e+9 | 3.56472e+9 | 3.31035e+9 | 2.56783 |
| 0.0662772 | 0.0817607 | -0.0662772 | -2.74704e+9 | 1.23404e+9 | 0.00915659 | -0.00230357 | -0.0112128 | 0.00763931 | 3.45597e+9 | 3.19884e+9 | 3.45597e+9 | 3.19884e+9 | 2.51733 |
| 0.0994157 | 0.0817607 | -0.0994157 | -2.71860e+9 | 1.15396e+9 | 0.00840687 | -0.00201685 | -0.0111755 | 0.00714355 | 3.34956e+9 | 3.09069e+9 | 3.34956e+9 | 3.09069e+9 | 2.47001 |
| 0.132554 | 0.0817607 | -0.132554 | -2.69015e+9 | 1.07387e+9 | 0.00766901 | -0.00173013 | -0.0111383 | 0.00664779 | 3.24580e+9 | 2.98627e+9 | 3.24580e+9 | 2.98627e+9 | 2.42587 |
| 0.165693 | 0.0817607 | -0.165693 | -2.66171e+9 | 9.93790e+8 | 0.00694547 | -0.00144342 | -0.0111010 | 0.00615203 | 3.14503e+9 | 2.88599e+9 | 3.14503e+9 | 2.88599e+9 | 2.38491 |
| 0.198831 | 0.0817607 | -0.198831 | -2.63326e+9 | 9.13705e+8 | 0.00623930 | -0.00115670 | -0.0110638 | 0.00565627 | 3.04763e+9 | 2.79027e+9 | 3.04763e+9 | 2.79027e+9 | 2.34714 |
| 0.231970 | 0.0817607 | -0.231970 | -2.60482e+9 | 8.33621e+8 | 0.00555445 | -8.69978e-4 | -0.0110265 | 0.00516051 | 2.95404e+9 | 2.69963e+9 | 2.95404e+9 | 2.69963e+9 | 2.31254 |
| 0.265109 | 0.0817607 | -0.265109 | -2.57637e+9 | 7.53537e+8 | 0.00489600 | -0.000583260 | -0.0109893 | 0.00466475 | 2.86470e+9 | 2.61457e+9 | 2.86470e+9 | 2.61457e+9 | 2.28113 |
| 0.298247 | 0.0817607 | -0.298247 | -2.54792e+9 | 6.73452e+8 | 0.00427049 | -2.96541e-4 | -0.0109520 | 0.00416899 | 2.78010e+9 | 2.53567e+9 | 2.78010e+9 | 2.53567e+9 | 2.25290 |
| 0.331386 | 0.0817607 | -0.331386 | -2.51948e+9 | 5.93368e+8 | 0.00368646 | -9.82290e-6 | -0.0109148 | 0.00367323 | 2.70071e+9 | 2.46352e+9 | 2.70071e+9 | 2.46352e+9 | 2.22785 |
| 0.364524 | 0.0817607 | -0.364524 | -2.53129e+9 | 4.79734e+8 | 0.00278041 | 2.27231e-4 | -0.0110371 | 0.00296978 | 2.65002e+9 | 2.40892e+9 | 2.65002e+9 | 2.40892e+9 | 2.27220 |
| 0.397663 | 0.0817607 | -0.397663 | -2.60597e+9 | 3.13697e+8 | 0.00155070 | 3.86707e-4 | -0.0114086 | 0.00194194 | 2.65629e+9 | 2.39821e+9 | 2.65629e+9 | 2.39821e+9 | 2.42498 |
| 0.430802 | 0.0817607 | -0.430802 | -2.68066e+9 | 1.47661e+8 | 8.11616e-4 | 5.46184e-4 | -0.0117800 | 9.14089e-4 | 2.69155e+9 | 2.42455e+9 | 2.69155e+9 | 2.42455e+9 | 2.58357 |
| 0.463940 | 0.0817607 | -0.463940 | -2.60942e+9 | 57446400. | 9.21631e-4 | 8.81141e-4 | -0.0115718 | 0.000355620 | 2.61106e+9 | 2.36991e+9 | 2.61106e+9 | 2.36991e+9 | 2.49180 |
| 0.497079 | 0.0817607 | -0.497079 | -2.43302e+9 | 21877600. | 0.00134853 | 0.00134257 | -0.0109459 | 1.35433e-4 | 2.43326e+9 | 2.24316e+9 | 2.43326e+9 | 2.24316e+9 | 2.23571 |
| 0.530217 | 0.0817607 | -0.530217 | -2.27048e+9 | 4763380. | 0.00176587 | 0.00176558 | -0.0103684 | 2.94876e-5 | 2.27049e+9 | 2.13232e+9 | 2.27049e+9 | 2.13232e+9 | 2.02076 |
| 0.563356 | 0.0817607 | -0.563356 | -2.19305e+9 | 49682300. | 0.00189630 | 0.00186467 | -0.0100626 | 3.07557e-4 | 2.19433e+9 | 2.07454e+9 | 2.19433e+9 | 2.07454e+9 | 1.90947 |
| 0.596494 | 0.0817607 | -0.596494 | -2.12791e+9 | 48751300. | 0.00185429 | 0.00182294 | -0.00976781 | 3.01794e-4 | 2.12917e+9 | 2.01411e+9 | 2.12917e+9 | 2.01411e+9 | 1.79978 |
| 0.629633 | 0.0817607 | -0.629633 | -2.06277e+9 | 47820200. | 0.00181228 | 0.00178122 | -0.00947302 | 0.000296030 | 2.06402e+9 | 1.95368e+9 | 2.06402e+9 | 1.95368e+9 | 1.69334 |
| 0.662772 | 0.0817607 | -0.662772 | -1.99763e+9 | 46889200. | 0.00177028 | 0.00173950 | -0.00917823 | 2.90267e-4 | 1.99887e+9 | 1.89326e+9 | 1.99887e+9 | 1.89326e+9 | 1.59015 |

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Распределение физических величин на площадке скольжения по глубине

| L (мм) | x (мм) | y (мм) | N_x | N_y | δ (мм) | δ_x (мм) | δ_y (мм) | $\sigma_{x,x}$ (Н/м ²) | $\sigma_{y,y}$ (Н/м ²) | $\sigma_{x,y}$ (Н/м ²) | σ_1 (Н/м ²) | σ_2 (Н/м ²) | σ_3 (Н/м ²) | σ_n (Н/м ²) |
|-----------|-----------|------------|-----------|-------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.00000 | -0.178179 | 0.00000 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0201549 | -0.00319984 | -0.0198993 | -2.14664e+9 | -2.30228e+9 | -1.07752e+9 | -1.14413e+9 | -3.30479e+9 | 0.00000 | -2.15636e+9 |
| 0.0379273 | -0.178008 | -0.0379269 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0198551 | -0.00322193 | -0.0195919 | -2.00579e+9 | -2.37492e+9 | -1.09494e+9 | -1.07997e+9 | -3.30075e+9 | 0.00000 | -2.01567e+9 |
| 0.0758547 | -0.177837 | -0.0758539 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0195556 | -0.00324402 | -0.0192846 | -1.86494e+9 | -2.44757e+9 | -1.11237e+9 | -1.00637e+9 | -3.30614e+9 | 0.00000 | -1.87498e+9 |
| 0.113782 | -0.177666 | -0.113781 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0192563 | -0.00326611 | -0.0189773 | -1.72409e+9 | -2.52021e+9 | -1.12979e+9 | -9.24284e+8 | -3.32002e+9 | 0.00000 | -1.73429e+9 |
| 0.151709 | -0.177495 | -0.151708 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0189573 | -0.00328820 | -0.0186700 | -1.58324e+9 | -2.59286e+9 | -1.14722e+9 | -8.34676e+8 | -3.34142e+9 | 0.00000 | -1.59360e+9 |
| 0.189637 | -0.177324 | -0.189635 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0186587 | -0.00331029 | -0.0183627 | -1.44239e+9 | -2.66551e+9 | -1.16464e+9 | -7.38500e+8 | -3.36939e+9 | 0.00000 | -1.45291e+9 |
| 0.227564 | -0.177153 | -0.227562 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0183603 | -0.00333238 | -0.0180554 | -1.30154e+9 | -2.73815e+9 | -1.18207e+9 | -6.36641e+8 | -3.40305e+9 | 0.00000 | -1.31222e+9 |
| 0.265491 | -0.176982 | -0.265489 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0178721 | -0.00326454 | -0.0175715 | -1.13191e+9 | -2.79314e+9 | -1.11409e+9 | -5.72882e+8 | -3.35217e+9 | 0.00000 | -1.14199e+9 |
| 0.303419 | -0.176811 | -0.303416 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0173412 | -0.00311089 | -0.0170598 | -1.01190e+9 | -2.64989e+9 | -1.07655e+9 | -4.78228e+8 | -3.18356e+9 | 0.00000 | -1.02164e+9 |
| 0.341346 | -0.176640 | -0.341343 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0169217 | -0.00299633 | -0.0166543 | -9.29970e+8 | -2.54981e+9 | -9.81520e+8 | -4.67353e+8 | -3.01243e+9 | 0.00000 | -9.38854e+8 |
| 0.379273 | -0.176469 | -0.379270 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0165024 | -0.00288177 | -0.0162488 | -8.48038e+8 | -2.44974e+9 | -8.86490e+8 | -4.54222e+8 | -2.84355e+9 | 0.00000 | -8.56065e+8 |
| 0.417201 | -0.176298 | -0.417196 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0160832 | -0.00276721 | -0.0158433 | -7.66106e+8 | -2.34966e+9 | -7.91460e+8 | -4.38365e+8 | -2.67740e+9 | 0.00000 | -7.73275e+8 |
| 0.455128 | -0.176127 | -0.455123 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0156641 | -0.00265266 | -0.0154378 | -6.84174e+8 | -2.24959e+9 | -6.96431e+8 | -4.19195e+8 | -2.51457e+9 | 0.00000 | -6.90486e+8 |
| 0.493055 | -0.175956 | -0.493050 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0152451 | -0.00253810 | -0.0150323 | -6.02242e+8 | -2.14951e+9 | -6.01401e+8 | -3.95982e+8 | -2.35577e+9 | 0.00000 | -6.07696e+8 |
| 0.530983 | -0.175785 | -0.530977 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0148262 | -0.00242354 | -0.0146268 | -5.20309e+8 | -2.04943e+9 | -5.06371e+8 | -3.67829e+8 | -2.20191e+9 | 0.00000 | -5.24907e+8 |
| 0.568910 | -0.175614 | -0.568904 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0144075 | -0.00230898 | -0.0142213 | -4.38377e+8 | -1.94936e+9 | -4.11341e+8 | -3.33654e+8 | -2.05408e+9 | 0.00000 | -4.42117e+8 |
| 0.606837 | -0.175443 | -0.606831 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0139890 | -0.00219443 | -0.0138158 | -3.56445e+8 | -1.84928e+9 | -3.16311e+8 | -2.92189e+8 | -1.91354e+9 | 0.00000 | -3.59328e+8 |
| 0.644765 | -0.175272 | -0.644758 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0135706 | -0.00207987 | -0.0134103 | -2.74513e+8 | -1.74921e+9 | -2.21281e+8 | -2.42025e+8 | -1.78169e+9 | 0.00000 | -2.76538e+8 |
| 0.682692 | -0.175101 | -0.682685 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0131956 | -0.00200073 | -0.0130431 | -2.17533e+8 | -1.65835e+9 | -1.60652e+8 | -1.99837e+8 | -1.67605e+9 | 0.00000 | -2.19011e+8 |
| 0.720619 | -0.174930 | -0.720612 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0128980 | -0.00198497 | -0.0127444 | -2.05201e+8 | -1.58400e+9 | -1.61580e+8 | -1.86519e+8 | -1.60268e+9 | 0.00000 | -2.06686e+8 |
| 0.758547 | -0.174759 | -0.758539 | -0.999990 | -0.00450897 | 0.0126005 | -0.00196921 | -0.0124457 | -1.92870e+8 | -1.50965e+9 | -1.62508e+8 | -1.73111e+8 | -1.52941e+9 | 0.00000 | -1.94362e+8 |

Окончание приложения В

| L (мм) | x (мм) | y (мм) | σ_t (Н/м ²) | $\sigma_{n,t}$ (Н/м ²) | $\epsilon_{x,x}$ | $\epsilon_{y,y}$ | $\epsilon_{x,y}$ | ϵ_n | ϵ_t | σ_{T_I} (Н/м ²) | $\sigma_{M_{II}}$ (Н/м ²) | $\sigma_{M_{O}}$ (Н/м ²) | σ_{P_I} (Н/м ²) | K_{HI} |
|-----------|-----------|------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|--------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|
| 0.00000 | -0.178179 | 0.00000 | -2.29256e+9 | -1.07818e+9 | -0.00693314 | -0.00789659 | -0.0133407 | -0.00699331 | -0.00783642 | 3.30479e+9 | 2.90681e+9 | 3.30479e+9 | 2.90681e+9 | 2.20728 |
| 0.0379273 | -0.178008 | -0.0379269 | -2.36504e+9 | -1.09656e+9 | -0.00615864 | -0.00844374 | -0.0135565 | -0.00621981 | -0.00838257 | 3.30075e+9 | 2.91489e+9 | 3.30075e+9 | 2.91489e+9 | 2.17771 |
| 0.0758547 | -0.177837 | -0.0758539 | -2.43752e+9 | -1.11495e+9 | -0.00538414 | -0.00899088 | -0.0137722 | -0.00544631 | -0.00892871 | 3.30614e+9 | 2.93532e+9 | 3.30614e+9 | 2.93532e+9 | 2.17957 |
| 0.113782 | -0.177666 | -0.113781 | -2.51001e+9 | -1.13334e+9 | -0.00460964 | -0.00953803 | -0.0139879 | -0.00467281 | -0.00947486 | 3.32002e+9 | 2.96786e+9 | 3.32002e+9 | 2.96786e+9 | 2.21284 |
| 0.151709 | -0.177495 | -0.151708 | -2.58249e+9 | -1.15172e+9 | -0.00383514 | -0.0100852 | -0.0142037 | -0.00389931 | -0.0100210 | 3.34142e+9 | 3.01211e+9 | 3.34142e+9 | 3.01211e+9 | 2.27753 |
| 0.189637 | -0.177324 | -0.189635 | -2.65498e+9 | -1.17011e+9 | -0.00306064 | -0.0106323 | -0.0144194 | -0.00312581 | -0.0105672 | 3.36939e+9 | 3.06755e+9 | 3.36939e+9 | 3.06755e+9 | 2.37365 |
| 0.227564 | -0.177153 | -0.227562 | -2.72746e+9 | -1.18850e+9 | -0.00228615 | -0.0111795 | -0.0146351 | -0.00235232 | -0.0111133 | 3.40305e+9 | 3.13361e+9 | 3.40305e+9 | 3.13361e+9 | 2.50118 |
| 0.265491 | -0.176982 | -0.265489 | -2.78306e+9 | -1.12153e+9 | -0.00139987 | -0.0116836 | -0.0137935 | -0.00146227 | -0.0116212 | 3.35217e+9 | 3.10561e+9 | 3.35217e+9 | 3.10561e+9 | 2.63167 |
| 0.303419 | -0.176811 | -0.303416 | -2.64015e+9 | -1.08389e+9 | -0.00103303 | -0.0111729 | -0.0133287 | -0.00109333 | -0.0111126 | 3.18356e+9 | 2.97343e+9 | 3.18356e+9 | 2.97343e+9 | 2.38419 |
| 0.341346 | -0.176640 | -0.341343 | -2.54093e+9 | -9.88784e+8 | -7.85838e-4 | -0.0108134 | -0.0121522 | -8.40835e-4 | -0.0107584 | 3.01243e+9 | 2.80808e+9 | 3.01243e+9 | 2.80808e+9 | 2.22006 |
| 0.379273 | -0.176469 | -0.379270 | -2.44171e+9 | -8.93676e+8 | -5.38651e-4 | -0.0104539 | -0.0109756 | -0.000588340 | -0.0104042 | 2.84355e+9 | 2.64585e+9 | 2.84355e+9 | 2.64585e+9 | 2.06352 |
| 0.417201 | -0.176298 | -0.417196 | -2.34249e+9 | -7.98568e+8 | -2.91463e-4 | -0.0100944 | -0.00979903 | -3.35846e-4 | -0.0100500 | 2.67740e+9 | 2.48736e+9 | 2.67740e+9 | 2.48736e+9 | 1.91455 |
| 0.455128 | -0.176127 | -0.455123 | -2.24327e+9 | -7.03460e+8 | -4.42757e-5 | -0.00973492 | -0.00862247 | -8.33508e-5 | -0.00969585 | 2.51457e+9 | 2.33338e+9 | 2.51457e+9 | 2.33338e+9 | 1.77317 |
| 0.493055 | -0.175956 | -0.493050 | -2.14406e+9 | -6.08353e+8 | 2.02912e-4 | -0.00937542 | -0.00744591 | 1.69144e-4 | -0.00934165 | 2.35577e+9 | 2.18486e+9 | 2.35577e+9 | 2.18486e+9 | 1.63936 |
| 0.530983 | -0.175785 | -0.530977 | -2.04484e+9 | -5.13245e+8 | 4.50099e-4 | -0.00901591 | -0.00626935 | 4.21639e-4 | -0.00898745 | 2.20191e+9 | 2.04299e+9 | 2.20191e+9 | 2.04299e+9 | 1.51314 |
| 0.568910 | -0.175614 | -0.568904 | -1.94562e+9 | -4.18137e+8 | 6.97287e-4 | -0.00865640 | -0.00509279 | 6.74134e-4 | -0.00863325 | 2.05408e+9 | 1.90925e+9 | 2.05408e+9 | 1.90925e+9 | 1.39450 |
| 0.606837 | -0.175443 | -0.606831 | -1.84640e+9 | -3.23029e+8 | 9.44474e-4 | -0.00829690 | -0.00391623 | 9.26628e-4 | -0.00827905 | 1.91354e+9 | 1.78547e+9 | 1.91354e+9 | 1.78547e+9 | 1.28344 |
| 0.644765 | -0.175272 | -0.644758 | -1.74718e+9 | -2.27921e+8 | 0.00119166 | -0.00793739 | -0.00273967 | 0.00117912 | -0.00792485 | 1.78169e+9 | 1.67386e+9 | 1.78169e+9 | 1.67386e+9 | 1.17996 |
| 0.682692 | -0.175101 | -0.682685 | -1.65687e+9 | -1.67142e+8 | 0.00133320 | -0.00758616 | -0.00198903 | 0.00132405 | -0.00757700 | 1.67605e+9 | 1.58560e+9 | 1.67605e+9 | 1.58560e+9 | 1.08298 |
| 0.720619 | -0.174930 | -0.720612 | -1.58251e+9 | -1.67790e+8 | 0.00128571 | -0.00724971 | -0.00200051 | 0.00127651 | -0.00724052 | 1.60268e+9 | 1.51804e+9 | 1.60268e+9 | 1.51804e+9 | 0.989389 |
| 0.758547 | -0.174759 | -0.758539 | -1.50816e+9 | -1.68438e+8 | 0.00123821 | -0.00691327 | -0.00201200 | 0.00122897 | -0.00690403 | 1.52941e+9 | 1.45062e+9 | 1.52941e+9 | 1.45062e+9 | 0.900031 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Комплект чертежей к бакалаврской работе

**«Разработка уточненной методики инженерного расчета
контактных напряжений в опорах вала буровой лебёдки»**

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт нефти и газа
Технологические машины и оборудование нефтегазового комплекса

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

 Э.А. Петровский
подпись инициалы, фамилия

« 06 » июня 2017 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

21.03.01 «Нефтегазовое дело»

Тема ВКР «Разработка уточненной методики инженерного расчета
контактных напряжений в опорах вала буровой лебёдки»

Руководитель


подпись, дата

К.Т.Н., доцент
должность, ученая степень

С.Г. Докшанин
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

В.А. Морозова
инициалы, фамилия

Красноярск 2017