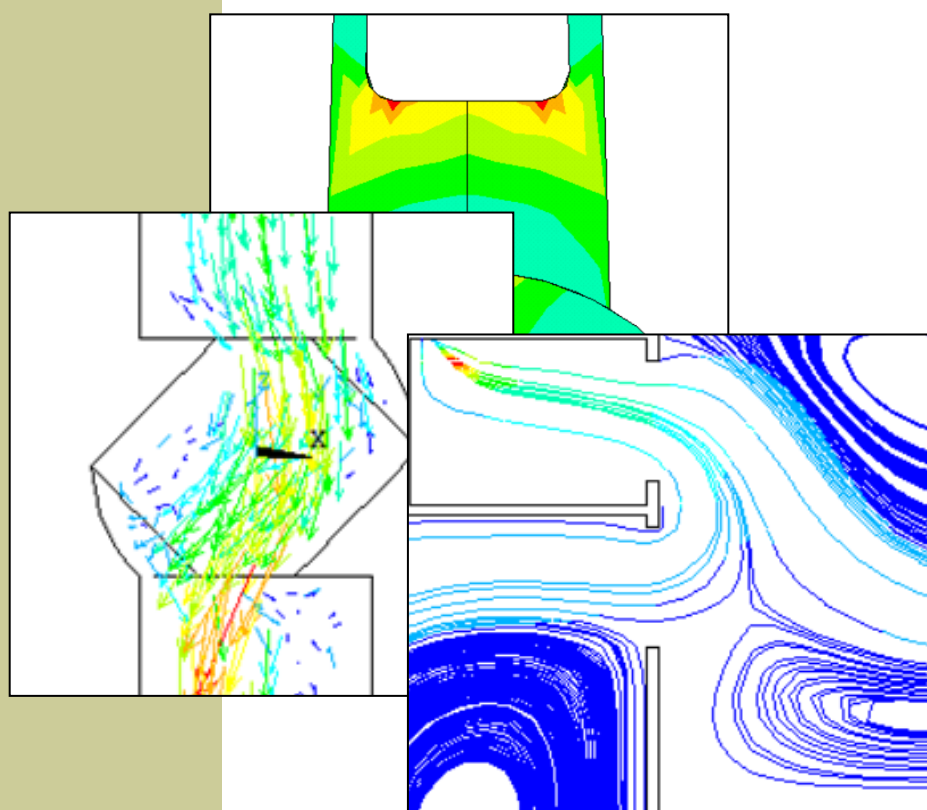


КРАВЧУК А.С., КРАВЧУК А.И.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СРЕДСТВАМИ ANSYS APDL



Санкт-Петербург
Научно-технологические
2025

А. С. Кравчук, А. И. Кравчук

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СРЕДСТВАМИ
ANSYS APDL**

Монография

Электронное текстовое издание

Санкт-Петербург
Научные технологии
2025

© Кравчук А. С., Кравчук А. И., 2025
ISBN 978-5-907946-83-5

УДК 004.9
ББК 32.973
К78

Рецензенты:

Х. Альтенбах – доктор технических наук, профессор,
Институт материалов, технологий и механики,
Университет Отто-фон-Герике, Германия;
М. Л. Хейфиц – доктор технических наук, профессор, директор
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

К78 Кравчук А. С., Кравчук А. И.

Параметрическое моделирование физических процессов средствами ANSYS APDL [Электронный ресурс]: монография. – СПб.: Научное издание «Технологии», 2025. – 164 с. – URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/Parametricheskoe-modelirovanie-fizicheskikh-protseessov-sredstvami-ANSYS-APDL.pdf>.

ISBN 978-5-907946-83-5

Книга состоит из нескольких разделов: параметрические задачи механики твердого тела, параметрические задачи механики жидкости и параметрические задачи газодинамики. Все задачи решаются в постановке для бесплатной демонстрационной версии ANSYS 10 ED. Задачи гидрогазодинамики решаются средствами FLOTRAN, все команды которого выполняются ядрами всех современных версий ANSYS APDL.

Книга предполагает отсутствие значительного опыта использования ANSYS у читателей и предназначена для широкого круга научных сотрудников, инженеров, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей, занимающихся исследованиями в области механики деформируемого твердого тела, жидкости и газа.

Табл.: 66. Ил. 78. Библиогр. 72 назв.

УДК 004.9
ББК 32.973

ISBN 978-5-907946-83-5

© Кравчук А. С., Кравчук А. И., 2025

Научное издание

Кравчук Александр Степанович
Кравчук Анжелика Ивановна

Параметрическое моделирование физических процессов
средствами ANSYS APDL

Монография

Электронное текстовое издание

Подписано к использованию 17.06.2025

Объем издания – 5,4 Мб.

Издательство «Наукоемкие технологии»

ООО «Корпорация «Интел Групп»

<https://publishing.intelgr.com>

E-mail: publishing@intelgr.com

Тел.: +7 (812) 945-50-63

Интернет-магазин издательства

<https://shop.intelgr.com/>

ISBN 978-5-907946-83-5



9 785907 946835 >

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	9
ГЛАВА 1. Параметрические задачи механики твердого тела.....	11
1.1. Расчет напряженно-деформированного состояния перекрытия шеек коленчатого вала.....	11
1.1.1. Упрощение геометрии коленчатого вала	11
1.1.2. Построение твердотельной модели кривошипа.....	13
1.1.3. Выбор типа решаемой задачи и указание свойств материалов модели	16
1.1.4. Выбор типа элемента для разбиения модели и назначение атрибутов модели.....	17
1.1.5. Построение разбиения модели.....	17
1.1.6. Назначение граничных условий	18
1.1.7. Решение задачи и просмотр результатов.....	19
1.1.8. Построение геометрической модели с галтелями и масляным каналом.....	21
1.1.9. Некоторые комментарии к дальнейшему улучшению модели коленчатого вала	26
1.1.10. Обсуждение результатов моделирования кривошипа коленчатого вала	27
1.2. Облегченные конструкции шатуна и расчет их напряженного состояния при осевом нагружении.....	28
1.2.1. Краткое описание постановки задачи для параметрической модели шатуна.....	28
1.2.2. Методика вычисления X-координат вспомогательных ключевых точек, определяющих наклон боковых сторон шатуна	31
1.2.3. Построение параметрической модели четверти облегченного шатуна без стенки в двутавровом стержне	32
1.2.4. Выбор типа задачи и указание свойств материалов модели. Выбор типа элемента для разбиения модели. Назначение атрибутов модели.....	40
1.2.5. Построение разбиения модели четверти шатуна.....	42
1.2.6. Назначение граничных условий для четверти шатуна	42
1.2.7. Решение задачи определения напряженно-деформированного состояния четверти шатуна.....	44
1.2.8. Просмотр результатов	45

1.2.9. Повышение жесткости шатуна с помощью дополнительной локальной перемычки между боковыми полками стержня	47
1.2.10. Построение исходной необлегченной модели шатуна	47
1.2.11. Обсуждение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния шатунов.....	51
1.3. Расчет напряженно-деформированного состояния зубьев в передаче винт-гайка	51
1.3.1. Краткое описание постановки задачи.....	52
1.3.2. Построение твердотельной модели радиального сечения передачи винт-гайка	53
1.3.3 Выбор типа задачи, указание свойств материалов модели и построение упорядоченного разбиения.....	56
1.3.4. Назначение граничных условий.	59
1.3.5. Решение задачи и просмотр результатов.....	60
1.3.6. Обсуждение результатов моделирования.....	63
1.4. Определение изменения осевых размеров сферических линз при обжатии в цанге для двустороннего шлифования	63
1.4.1. Постановка задачи.....	64
1.4.2. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения двояковогнутой линзы.....	66
1.4.3. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой линз	66
1.4.4. Задание констант материалов, построение упорядоченного разбиения модели, назначение краевых условий и решение поставленных задач	67
1.4.5. Отображение результатов решения	69
1.4.6. Обсуждение результатов моделирования.....	70
1.5. Параметрическое моделирование упругопластического вдавливания шара и конуса	71
1.5.1. Постановка задачи.....	72
1.5.2. Вдавливание шарового индентора. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения образца и индентора	74
1.5.3. Шаровой индентор. Задание констант материалов. Построение упорядоченного разбиения геометрической модели	76

1.5.4. Вдавливание конического индентора. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения образца и индентора	77
1.5.5. Конический индентор. Задание констант материалов. Построение упорядоченного разбиения геометрической модели. Общие команды решения обеих задач	78
1.5.6. Вычисление значений интегральной нагрузки на индентор по величинам действующих напряжений. Просмотр результатов решения	80
1.5.7. Обсуждение результатов моделирования.....	83
ГЛАВА 2. Задачи стационарной гидродинамики вихревых течений.....	84
2.1. Моделирование турбулентного потока вязкой несжимаемой жидкости в фитингах труб	84
2.1.1. Краткое описание задачи.....	84
2.1.2. Конечно-элементная модель внутреннего пространства отвода	85
2.1.3. Создание конечно-элементной модели внутреннего объема тройника.....	87
2.1.4. Задание физических свойств несжимаемой жидкости и параметров решателя для всех моделей внутреннего объема фитингов	94
2.1.5. Чтение результатов решения задачи и их отображение	95
2.1.6. Обсуждение результатов моделирования.....	96
2.2. Теоретический метод управления расходом перекачиваемой среды по положению запирающих элементов трубопроводной арматуры.....	96
2.2.1. Краткое описание задачи.....	97
2.2.2. Создание конечно-элементной модели внутреннего пространства шарового крана.....	98
2.2.3. Создание конечно-элементной модели половины внутреннего пространства дискового затвора, симметричного относительно горизонтальной плоскости.....	101
2.2.4. Создание конечно элементной модели внутреннего пространства клиновой задвижки	106
2.2.5. Создание конечно элементной модели внутреннего пространства углового клапана	110
2.2.6. Задание физических свойств несжимаемой жидкости и параметров решателя для всех типов конструкций запорной арматуры	113

2.2.7. Чтение результатов решения задачи на последнем шаге и их отображение.....	113
2.2.8. Обсуждение результатов моделирования.....	114
2.3. Гидродинамический расчет вихревого обтекания сужающих устройств расходомеров.....	115
2.3.1. Предположения при построении модели обтекания всех типов сужающих устройств.....	116
2.3.2. Диафрагма.....	117
2.3.3. Эллипсное сопло.....	120
2.3.4. Сопло ИСА 1932.....	122
2.3.5. Сопло Вентури.....	125
2.3.6. Задание физических свойств несжимаемой жидкости для всех конструкций расходомеров, выбор алгоритма решения гидродинамических задач и их запуск на решение.....	127
2.3.7. Команды отображения результатов решения задачи.....	128
2.3.8. Команды отображения линий тока.....	129
2.3.9. Обсуждение результатов моделирования сужающих устройств.....	130
2.4. Оценка влияния плоского локатора в головном отделении самонаведения на гидродинамику торпед.....	130
2.4.1. Постановка задачи.....	132
2.4.2. Построение геометрической модели расчетной области.....	134
2.4.3. Построение свободного разбиения модели.....	135
2.4.4. Задание краевых условий.....	135
2.4.5. Определение параметров среды и решение задачи.....	136
2.4.6. Отображение результатов решения.....	136
2.4.7. Обсуждение результатов моделирования.....	136
ГЛАВА 3. Прикладные задачи аэродинамики.....	139
3.1. Аэродинамический расчет принудительной вентиляции помещений.....	139
3.1.1. Постановка задачи.....	139
3.1.2. Построение геометрической модели расчетной области и задания атрибутов.....	140
3.1.3. Построение упорядоченного конечноэлементного разбиения плана помещения.....	142
3.1.4. Параметризация модели.....	144
3.1.5. Задание свойств воздуха.....	145

3.1.6. Задание скоростей воздуха на границе модели плана помещения	145
3.1.7. Выбор модели течения газа, модели турбулентности, алгоритма решения и некоторых других параметров решателя.....	146
3.1.8. Отображение линий тока.....	147
3.1.9. Обсуждение результатов моделирования.....	147
3.2. Модель обтекания осколочно-фугасного снаряда потоком сжимаемого воздуха.....	148
3.2.1. Постановка задачи.....	149
3.2.2. Построение модели расчетной области	149
3.2.3. Построение упорядоченного разбиения модели.....	152
3.2.4. Определение параметров среды, задание краевых условий, решение задачи и отображение результатов.....	153
3.2.5. Обсуждение результатов моделирования.....	154
3.2.6. Определение влияния параметров генерации газов в газогенераторе артиллерийского снаряда на его дозвуковую аэродинамику	156
3.2.7. Корректировка постановки задачи.....	156
3.2.8. Корректировка краевых условий.....	157
3.2.9. Обсуждение полученных результатов для газогенератора	157
Список использованных источников	159

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей теории моделирования является определение однозначных соотношений между моделью и реальным объектом и создание в модели процесса идентичного реальному. Реальная сложная система заменяется предположительно эквивалентной моделью, поведение которой должно соответствовать наблюдаемым закономерностям. Во всех случаях рассматривается модель как физический или математический объект, находящийся в отношении подобия к моделируемой системе.

Обычно из-за сложности происходящих физико-химических и механических явлений используются методы исследований, основанные на последовательном упрощении изучаемого процесса или явления и дающие возможность переносить результаты на реальные объекты хотя бы приближенным способом.

Но даже такое широко применяемое и хорошо разработанное современное средство компьютерного моделирования как метод конечных элементов не свободны от недостатков в силу того, что математический аппарат (система дифференциальных уравнений), лежащий в основе описания любого процесса, в исторической ретроспективе представляют всего лишь итерационное приближение к истинному пониманию физической сущности того или иного явления или объекта.

Следует отметить также, что физическое моделирование на современном этапе развития вычислительных и программных средств представляется чрезвычайно архаичным. Несмотря на то, что стоимость программно-аппаратного обеспечения компьютерного моделирования физических процессов в настоящее время очень высока, однако проводить широкое физическое, а тем более натурное, моделирование объектов и процессов является более затратным.

Моделирование включает в себя два альтернативных процесса – абстрагирование и интерпретация. При первом исследователь создает модель, отбрасывая все на его взгляд лишнее, а на этапе интерпретации – объясняет результаты и делает выводы.

В применении к компьютерному моделированию физических явлений можно утверждать, что предлагаемый ассортимент современных программных средств построения геометрии модели и задания краевых условий настолько хорошо разработан, что практически гарантирует, что даже не очень опытный исследователь создаст модель. Однако второй этап «интерпретация» уже связан с определенными сложностями, главной из которых является отсутствие аналитических зависимостей поведения параметров системы в некотором диапазоне меняющихся условий.

Возможность использования параметров (переменных, определенных пользователем), а также операторов, аналогичных операторам в других языках программирования в рамках решения задач компьютерного моделирования остается одним из мощнейших достижений ANSYS APDL.

Эта особенность позволяет получать не только решения серии задач для изменяющихся в разных диапазонах параметров, но и, фактически не используя специализированный модуль ANSYS, выполнять оптимизацию конструкции.

Поэтому данная книга актуальна и является первым шагом для тех исследователей, кто нацелен не просто на проведение имитационного моделирования узлов и деталей машин или процессов, а на получение наиболее простым способом целых зависимостей или тенденций для выбора оптимальных решений по нескольким параметрам.

Книга разделяется на несколько разделов: задачи механики твердого тела, задачи механики жидкости и задачи механики газа. Авторами для повышения интереса исследователей в качестве примеров применения параметрического моделирования умышленно выбраны некоторые военные объекты и процессы, данные по которым в настоящее время общедоступны в Интернете и не являются гостайной.

Хотя ANSYS APDL отказался в настоящее время от поддержки в меню команд FLOTRAN, однако все его команды из языка APDL выполняются ядрами всех современных версий ANSYS. Этот факт позволяет всем читателям последовательно обучиться APDL на любой современной версии при решении задач из раздела механики твердого тела, а затем, используя стандартный набор команд FLOTRAN, приведенный в данной монографии для задания свойств газовой или жидкой среды, решить практически любую задачу газо- или гидродинамики на любой современной версии ANSYS APDL.

ГЛАВА 1. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

1.1. Расчет напряженно-деформированного состояния перекрытия шеек коленчатого вала

Коленчатый вал является одной из наиболее ответственных и сложных в конструктивном и технологическом отношении деталей двигателя. От его прочности в значительной мере зависит возможность форсирования двигателя. Его конструкция и размеры определяют габариты и вес двигателя, что необходимо учитывать при проектировании как коленчатого вала, так и двигателя в целом [1, 2].

Отметим, что прочность этой детали, фактически определяется прочностью каждого из его кривошипов. Поэтому в разделе рассматривается только этот участок коленчатого вала. Составные валы не рассматриваются.

Предлагаемая методика позволяет рассчитывать напряженное состояние в сечении кривошипа коленчатого вала, находящегося в верхней мертвой точках.

На первом этапе анализ напряженного состояния в щеке между коренной и шатунной шейками выполняется на параметризованной модели в ANSYS 10 ED без учета галтелей и наличия масляного канала. На приведенном примере демонстрируются способы учета не только упругого, но и пластического поведения материала коленчатого вала. Решение получено с опцией, допускающей большие перемещения, что уточнит получаемые результаты.

На втором этапе в ANSYS 10 ED создается параметрическая модель с галтелями и масляным каналом, характерным для первого и последнего кривошипа коленчатого вала. Ввиду ограничений на количество элементов задача для уточненной модели не может быть решена в демонстрационной версии ANSYS 10 ED. Однако в данном примере даны полные методические рекомендации по самостоятельному решению данной задачи исследователями на коммерческих версиях ANSYS с необходимой точностью, а также приложен код APDL, решения поставленной задачи.

Отметим также, что шатунные шейки обычно выполняются полыми [2], что снижает вращающиеся массы и дает возможность дополнительной центробежной фильтрации масла в масляных каналах. Однако учет данных конструктивных особенностей невозможен средствами ANSYS 10 ED и остается задачей для самостоятельного изучения с помощью изложенной в примере методологии.

1.1.1. Упрощение геометрии коленчатого вала

Создание модели на первом этапе производится «сверху вниз», в предположении о симметричности нагружения одного колена вала. Остальная часть вала заменяется нулевыми перемещениями вдоль оси OZ плоскостей

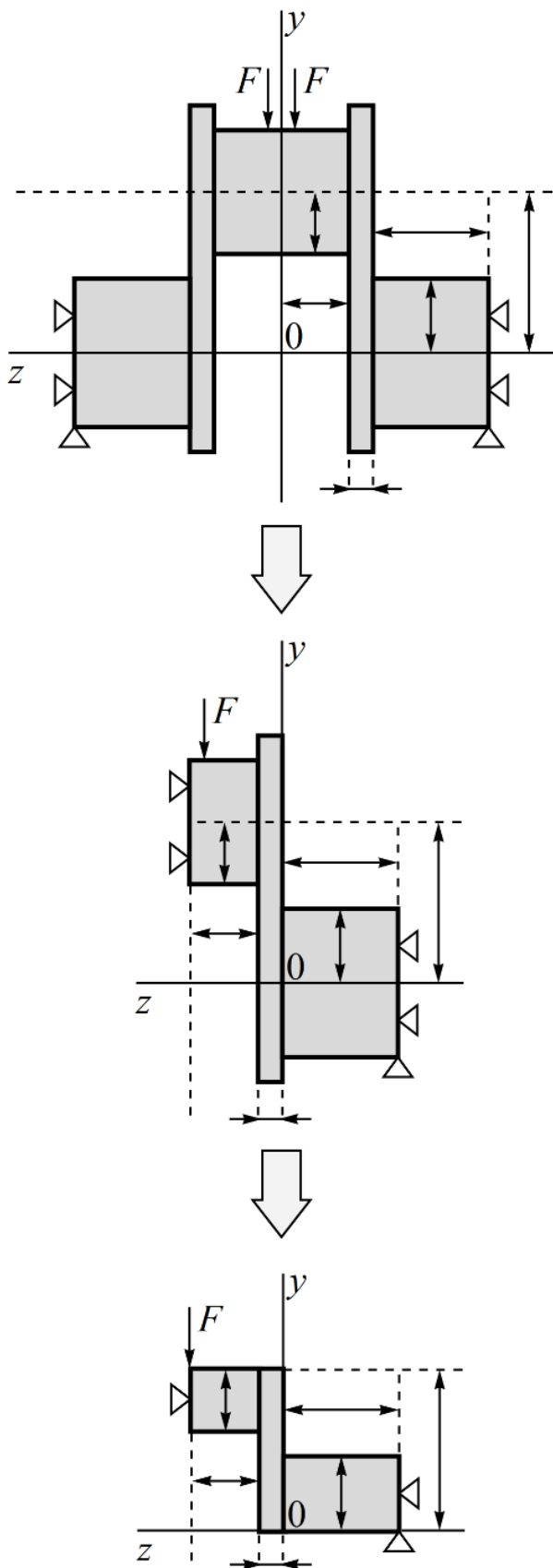


Рисунок 1 – Схема редукции модели одного колена вала к фрагменту его кривошипа

сечений коренных шеек. При этом вертикальная нагрузка должна быть приложена в отрицательном направлении оси OY , а также по этой оси должны быть закреплены нижние элементы коренных шеек для имитации их взаимодействия с вкладышами (Рисунок 1).

В связи с симметрией в плоскости XOY как нагрузок так и геометрии колена, можно перейти уже к рассмотрению одного кривошипа, заменив второй симметричный кривошип нулевыми перемещениями вдоль оси OZ сечения шатунной шейки, когда кривошип находится под действием половинной нагрузки F в верхней мертвой точке (Рисунок 1).

Далее предполагается, что ввиду конструктивной массивности шатунной и коренной шеек могут быть отброшены верхняя и нижняя части кривошипа, не оказывающее влияние на напряженное состояние в наиболее опасной в прочностном смысле области между шейками (Рисунок 1). Таким образом, можно перейти к анализу напряженного состояния усеченного кривошипа.

Учитывая симметрию усеченного кривошипа относительно плоскости YOZ , модель (Рисунок 1), может быть сведена к ее половине (Рисунок 2), находящейся под действием силы величиной $F/2$, а отсутствующая часть заменена закреплением вдоль оси OX плоскости симметрии кривошипа. В модели шатунная шейка расположена сверху, а коренная – снизу (Рисунок 2).

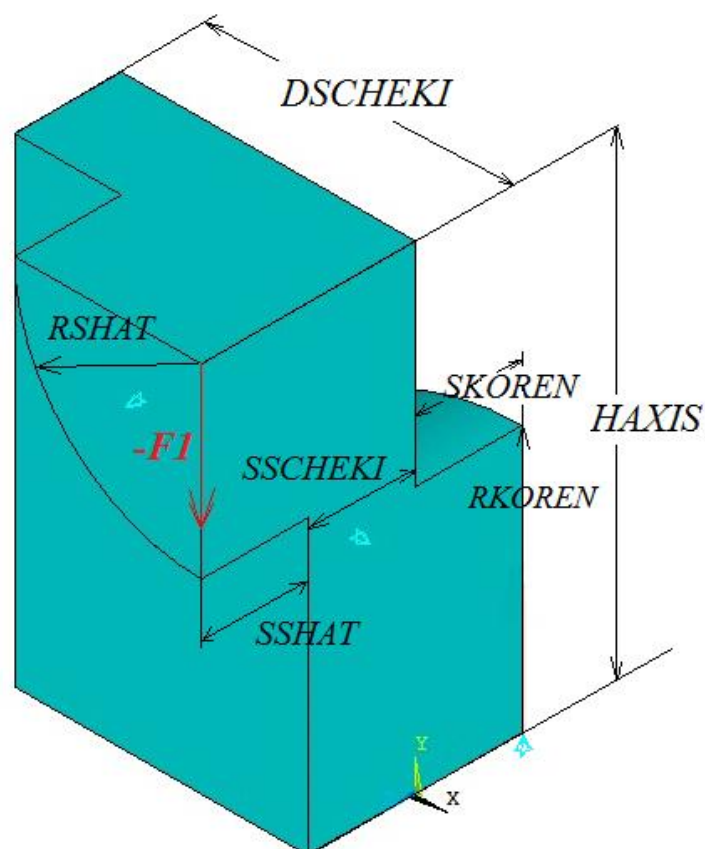


Рисунок 2 – Усеченная модель кривошипа

1.1.2. Построение твердотельной модели кривошипа

Вначале следует задать параметры, которые будут использоваться при создании модели усеченного кривошипа, воспользовавшись пунктом меню *Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters*. В поле *Selection* появившегося окна следует ввести необходимые параметры (Таблица 1).

Отметим, что в первой части данного раздела, посвященного исследованию напряженного состояния в сечении кривошипа между шейками без галтелей и масляных каналов, параметр *RGALTELI* используется неявно при вычислении геометрии щеки кривошипа, а параметр *RMASLKANAL* вовсе не используется. Однако данный параметр необходим, чтобы при изложении материала не возвращаться к пройденным этапам и во второй части сразу перейти к созданию у уже имеющейся модели галтелей и масляного канала.

На первом шаге построения геометрии «сверху вниз» необходимо создать составляющие модель объема [3, 4]. В данном случае объемами являются параллелепипед, моделирующий щеку, и два цилиндрических сектора, моделирующих участки шеек кривошипа.

Создание параллелепипеда осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions*. В окне *Create Block by Dimensions* необходимо ввести координаты противоположных углов параллелепипеда и нажать *OK* (Таблица 2) [3, 4].

Создание двух цилиндрических секторов осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By Dimensions*. В окне *Create Cylinder by Dimensions*, необходимо ввести размеры одного сектора цилиндра, нажать *Apply* и ввести размеры второго сектора цилиндра (Таблица 3) [3, 4].

Таблица 1 – Физические и геометрические параметры модели

Имя и значение	Описание
EX=2.1E11	Модуль Юнга стали (Па)
PRXY=0.29	Коэффициент Пуассона стали
YIELDSTRS=7E8	Предел текучести (Па)
TANGMODS=5E9	Касательный пластический модуль стали (Па)
RGALTELI=0.005	Радиус галтелей между щеками и шейками (м)
RMASLKANAL=0.005	Радиус масляного канала (м)
HAXIS=0.075	Расстояние между осями шеек (м)
RSHAT=0.035	Радиус шатунной шейки (м)
RKOREN=0.05	Радиус коренной шейки (м)
SSHAT=0.02	Половина ширины шатунной шейки (м)
SKOREN=0.02	Половина ширины коренной шейки (м)
DSCHEKI=RKOREN+2*RGALTELI	Глубина щеки (м)
SSCHEKI=0.02	Максимальная толщина щеки (м)
F1=1000	Половина нагрузки на кривошип (Н)

Таблица 2 – Геометрические параметры параллелепипеда

Имя	Значение	
X1, X2	0	HAXIS
Y1, Y2	-DSCHEKI	0
Z1, Z2	0	SSCHEKI

Таблица 3 – Геометрические параметры цилиндрических секторов и масляного канала

Имя	Коренная шейка	Шатунная шейка	Масляной канал
RAD1	RKOREN	RSHAT	RMASLKANAL
RAD2	0	0	0
Z1	0	SSCHEKI	-SKOREN
Z2	-SKOREN	SSCHEKI+SSHAT	HAXIS+SKOREN
THETA1	90	180	0
THETA2	180	270	360

Модель шатунной шейки следует перенести вдоль оси *OY* с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volumes*. В окне выбора следует указать номер 3 или выбрать мышью соответствующий

цилиндр и нажать *Apply*, затем в окне *Move Volumes* заполнить поле *DY* параметром *HAXIS* и нажать *OK* [3, 4].

В заключение построения модели усеченного кривошипа следует провести ряд объединений геометрических компонент, чтобы при дальнейших построениях не превысить ограничения ANSYS 10 ED на их количество. Кроме того, данные промежуточные операции позволят решить поставленную задачу хотя бы при грубом разбиении средствами демонстрационной версии (наличие лишних линий вызывает концентрацию элементов около них) [3, 4].

Для объединения объемов используется пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes*, где следует нажать кнопку *Pick All* [3, 4].

Для объединения поверхностей необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas*, с помощью меню выбора указать поверхности *A19, A25, A17* (Рисунок 3) и нажать *Apply*. Далее требуется выбрать поверхности *A20, A22* (Рисунок 3), нажать *Apply*, а затем выбрать поверхности *A18, A24* (Рисунок 3) и нажать *OK* [3, 4] (Таблица 4).

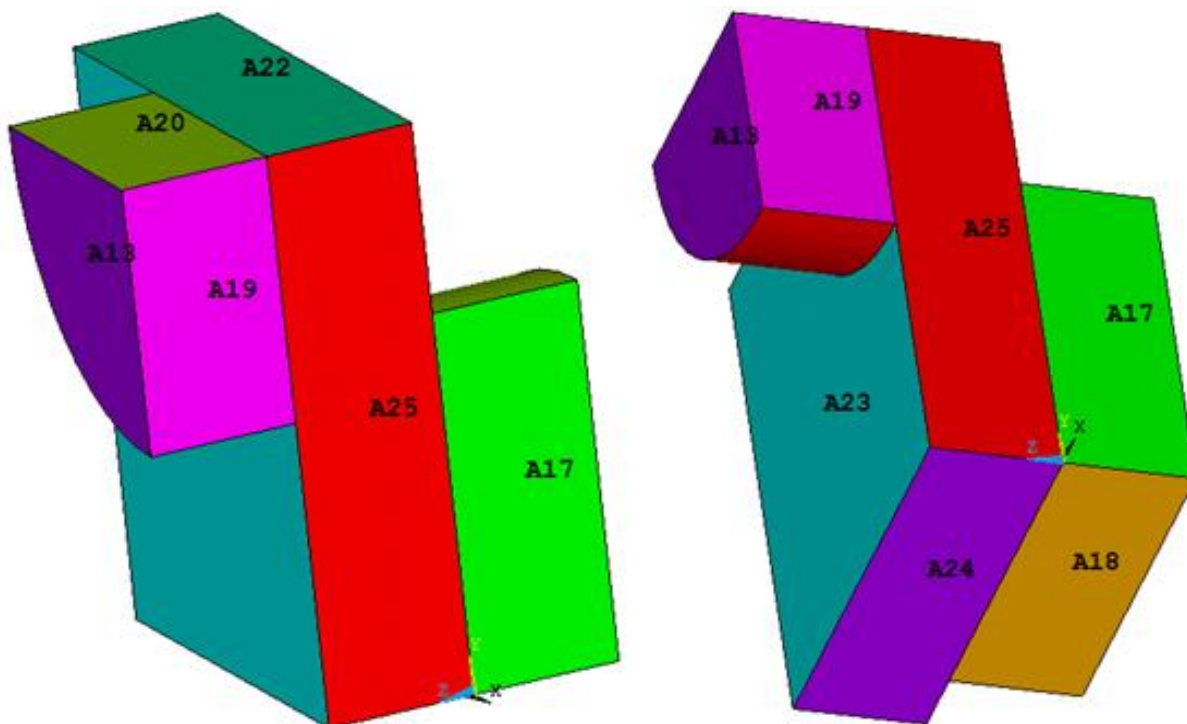


Рисунок 3 – Нумерация поверхностей усеченной модели кривошипа

Таблица 4 – Код APDL построения усеченной модели кривошипа

№	Команда
1.	EX=2.1E11
2.	PRXY=0.29
3.	YIELDSTRS=7E8
4.	TANGMODS=5E9
5.	RGALTELI=0.005
6.	RMASLKANAL=0.005
7.	HAXIS=0.075
8.	RSHAT=0.035
9.	RKOREN=0.05
10.	SSHAT=0.02
11.	SKOREN=0.02
12.	DSCHEKI=RKOREN+2*RGALTELI
13.	SSCHEKI=0.02
14.	F1=1000
15.	/PREP7
16.	BLOCK, 0, -DSCHEKI, 0, HAXIS, 0, SSCHEKI
17.	CYLIND, RKOREN, 0, 0, -SKOREN, 90, 180
18.	CYLIND, RSHAT, 0, SSCHEKI, SSCHEKI+SSHAT, 180, 270
19.	VGEN, 2, 3, , , , HAXIS, , , 1, 1
20.	VADD, ALL
21.	AADD, 19, 25, 17
22.	AADD, 20, 22
23.	AADD, 24, 18

1.1.3. Выбор типа решаемой задачи и указание свойств материалов модели

В соответствии с логикой организации главного меню, выбор типа решаемой задачи следует выполнять на первом шаге перед созданием модели. Однако практика работы в ANSYS 10 ED с дополнительными модулями, такими как LS-DYNA или FLOTRAN, показывает, что выбор типа решаемой задачи лучше производить после подготовки всей геометрии модели. Для этого необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preferences...* и в окне *Preferences for GUI Filtering* указать *Structural* [1595].

При решении данной задачи используется упругопластический материал с кинематическим упрочнением, учитывающем эффект Баушингера, что соответствует поведению всех типов сталей (Таблица 1) [5].

Для указания модели материала необходимо с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models* вызвать окно *Define Material Model Behavior*. В этом окне «по умолчанию» доступен один

материал *Material Number 1* (отображается в левом окне и подсвечивается курсором). В правом окне с помощью пункта *Define Material Model Behavior > Material Models Available > Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate Independent > Kinematic Hardening Plasticity > Mises Plasticity > Bilinear* отмечается, что материал является упругопластическим с билинейной диаграммой растяжения [5]. При этом появится предупреждение о том, что следует задать упругие характеристики. После этого в окне *Linear Isotropic Properties for Material Number 1* требуется ввести необходимые значения упругих констант стали (Таблица 1): модуль Юнга *EX* (Па) в поле с меткой *EX* и коэффициент Пуассона *PRXY* в поле с меткой *PRXY*, а затем нажать *OK* [5].

Далее, в окне *Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1* необходимо ввести параметры пластичности стали (Таблица 1): предел текучести *YIELDSTRS* в поле с меткой *Yield Stss* и касательный модель пластичности *TANGMODS* в поле с меткой *Tang Mods*, а затем нажать *OK* и закрыть окно *Define Material Model Behavior* [5].

1.1.4. Выбор типа элемента для разбиения модели и назначение атрибутов модели

Поскольку поставленная задача соответствует структурному анализу, следует выбрать тип элементов *Structural Solid* и элементы *Brick 8node 45* (к сожалению, только этот тип элементов позволяет решить поставленную задачу в демонстрационной версии). Выбор производится при использовании пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete* после нажатия кнопки *Add* в окне *Element Types*. Затем следует закрыть окно [5].

В ANSYS под атрибутами геометрических компонентов модели понимаются номера материала *Material number* (одинаков для всех компонент), типа элементов *Element type number* (одинаков для всех компонент), набора *Real constant set number* и сечения *Element section* (в данной задаче не используются). Перечисленный набор атрибутов присваивается всей геометрической модели с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Volumes*. В появившемся окне необходимо проверить значения атрибутов и нажать *OK* [5].

1.1.5. Построение разбиения модели

Для построения свободного разбиения модели необходимо установить грубый уровень сетки с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > SmartSize > Basic* (в окне *Basic SmartSize Settings* в списке *Size Level* следует установить уровень *10*) [5].

После этого модель усеченного кривошипа готова к построению разбиения с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Free*. При его использовании появится окно *Mesh Volumes*, в котором с помощью

кнопки *Pick All* следует указать, что будет производиться разбиение всей модели целиком [5].

Далее необходимо произвести локальное улучшение сетки с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Keypoints*. После появления меню выбора следует выбрать ключевые точки 12 и 17 (Рисунок 4) нажать *OK* и в появившемся окне в списке выбрать уровень улучшения (в случае наличия перекрытия шеек, как изображено на рисунке 4, можно выбрать 2, а в случае отсутствия перекрытия – только 1) [5].

1.1.6. Назначение граничных условий

Задание краевых условий на модель усеченного кривошипа следует начать с простейших ограничений. Во-первых, необходимо закрепить сечение кривошипа в плоскости симметрии YOZ , т.е. запретить перемещение поверхности $A1$ вдоль оси OX , во-вторых, закрепить поверхности шеек $A7$ и $A13$ вдоль оси OZ , и, в-третьих, закрепить линию $L14$ вдоль оси OY (Рисунки 4, 6) [6].

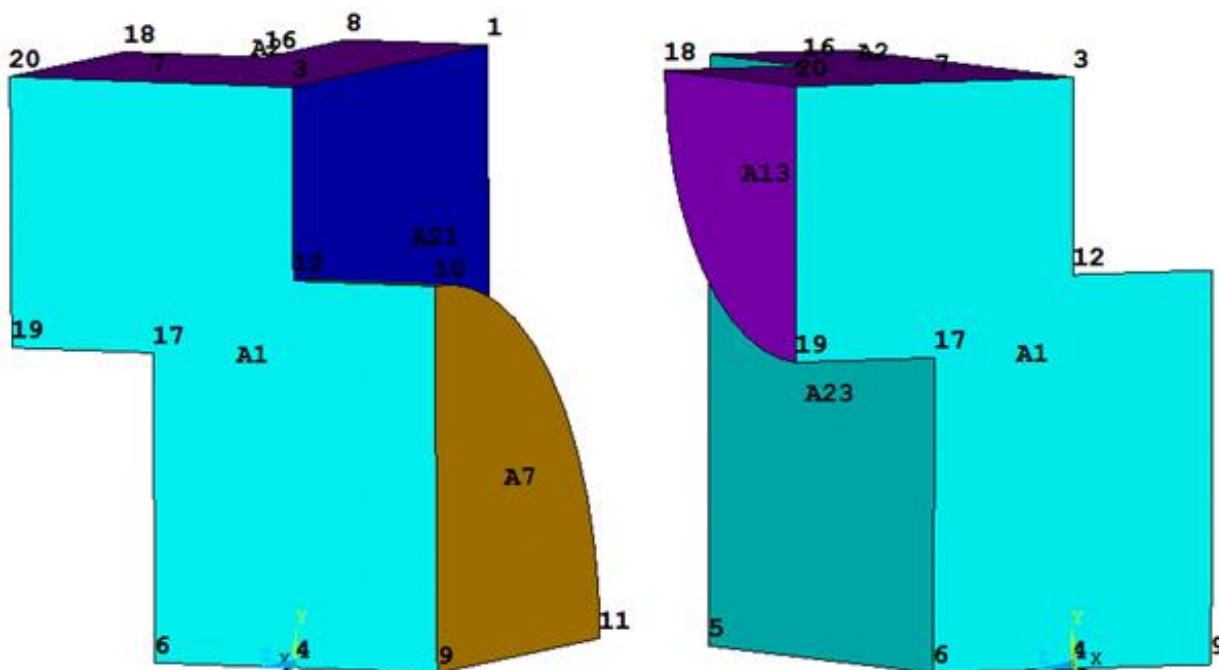


Рисунок 4 – Нумерация поверхностей и ключевых точек усеченной модели кривошипа

Для этого следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas*. Для задания первого граничного условия требуется выбрать поверхность $A1$ (Рисунок 4), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку UX , в поле $VALUE$ задать величину перемещения 0 (м) и нажать кнопку *Apply*. Далее следует выбрать поверхности шеек $A7$ и $A13$ (Рисунок 4), нажать *OK*, в появившемся окне

выбрать метку *UZ*, в поле *VALUE* задать величину перемещения 0 (м) и нажать кнопку *OK*.

Для задания третьего граничного условия, ограничивающего вертикальное перемещение усеченного кривошипа вдоль приложенной силы, необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines*. Далее следует выбрать линию *L14* (Рисунок 6), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку *UY*, в поле *VALUE* задать величину перемещения 0 (м) и нажать кнопку *OK* [6].

В завершении задания краевых условий необходимо приложить силу в точке *20* (Рисунок 4). Для этого следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Keypoints*. Для задания силы, приложенной в точке *20* и действующей вертикально вниз, необходимо выбрать данную точку, нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку *FY*, в поле *VALUE* указать выражение $-F1$, силу величиной, определенной параметром *F1* и действующей в противоположном направлении оси *OY*, (Таблица 1). В завершении необходимо нажать кнопку *OK* [6].

1.1.7. Решение задачи и просмотр результатов

Перед запуском решения, ввиду нелинейности задачи, следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls* и включить опцию *Large Displacement Static* в раскрывающемся списке *Analysis Options*. Кроме того, необходимо задать количество итераций решения *100* в пункте *Number of substeps* (количество итераций задается для нелинейного или нестационарного анализа), а также включить опцию автоматического подбора временного шага решения, выбрав *On* в раскрывающемся списке *Automatic time stepping*. Если не произвести установку шагов интегрирования задачи, сразу после запуска решения появится информационное сообщение о необходимости задания размера итерации или их количества. Для запуска решения задачи следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Solution > Solve > Current LS* [6]. Все пункты меню, изложенные после таблицы 4, могут быть также описаны с помощью команд *APDL* (Таблица 5).

Выбор отображаемого физического параметра, вычисляемого в узлах конечно-элементной модели, производится с помощью пункта меню *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*. В окне *Contour Nodal Solution Data*, в списке *Item to be contoured* следует выбрать требуемый результат. Для отображения первых главных напряжений – одного из основных параметров для расчета прочности деталей – следует указать *Nodal Solution > Stress > 1st Principal Stress* (Рисунок 5) [6].

Поскольку при решении данной задачи наибольшие значения физических параметров будут достигаться в точке приложения сосредоточенной силы, то в удаленных областях точный анализ распределений параметров будет затруднен.

Для масштабирования распределения выбранного параметра в локальной области вне приложения нагрузки следует отобразить разбиение с использованием пункта меню *Utility Menu > Plot > Elements* и указать наиболее удобную проекцию.

Таблица 5 – Код APDL задания материалов, построения разбиения, назначения граничных условий и решения задачи

№	Команда
1.	TB, BKin, 1
2.	MP, EX, 1, EX
3.	MP, PRXY, 1, PRXY
4.	TBDATA, 1, YIELDSTRS, TANGMODS
5.	ET, 1, SOLID45
6.	VSEL, S, VOLUME, , ALL
7.	VATT, 1, , 1
8.	MSHKEY, 0
9.	MSHAPE, 1, 3D
10.	SMRTSIZE, 10
11.	VMESH, ALL
12.	KREFINE, 12, 17, 5, 1
13.	DA, 1, UX, 0
14.	DA, 13, UZ, 0
15.	DA, 7, UZ, 0
16.	DL, 14, , UY, 0
17.	FK, 20, FY, -F1
18.	/SOL
19.	TIME, 1
20.	NSUBST, 100
21.	AUTOTS, ON
22.	NLGEOM, ON
23.	SOLVE

Затем необходимо воспользоваться пунктом меню *Utility Menu > Select > Entities*. При его использовании появится инструмент *Select Entities*, в первом раскрывающемся списке которого следует выбрать *Elements*, а во втором раскрывающемся окне оставить *By Num/Pick* и нажать кнопку *OK*. После этого можно с помощью опции *Box* выбрать элементы в интересующей области и нажать *OK*. Отметим, что для того, чтобы наиболее удобно использовать операцию выделения элементов с включенной опцией *Box* модель следует предварительно повернуть (выделить элементы и с помощью обратного поворота вернуть в исходное положение), но в данном примере этого не делалось.

Единственный вывод, который можно сделать, исходя из проведенного расчета (Рисунок 5) – напряжения в области перекрытия шеек изменяются с

отрицательных значений (напряжений сжатия) на положительные (напряжения растяжения). Очевидно, что для более точных выводов по данной задаче требуется значительно увеличить количество элементов.

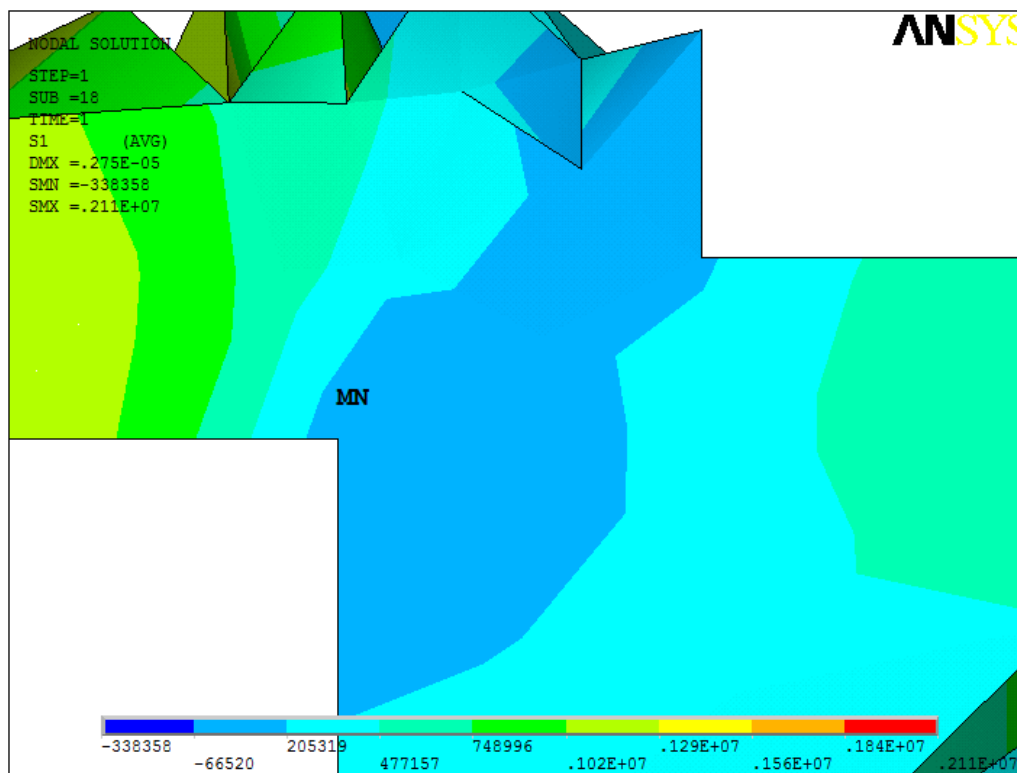


Рисунок 5 – Распределение первых главных напряжений в области перекрытия шеек коленчатого вала

1.1.8. Построение геометрической модели с галтелями и масляным каналом

В качестве основы для продолжения геометрических построений используется модель, созданная с помощью кода APDL, приведенного в таблице 4. Таким образом, исследователю следует либо очистить уже созданную модель от разбиения (*Main Menu > Preprocessor > Meshing > Clear > Volumes*), приложенных ограничений и сил (*Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > All Load Data > All SolidMod Lds*), либо создать новую модель, вставив в командную строку код APDL из таблицы 4 [3, 4].

Для создания скругления (галтели) между двумя парами линий *L20* и *L38*, а также *L28* и *L40* (Рисунок 6) следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Line Fillet*.

С помощью меню выбора необходимо указать линии *L20* и *L38*, нажать *OK*, в окне *Line Fillet* в поле *RAD* ввести параметр *RGALTELI* (Таблица 1) и нажать *Apply*. После этого следует выбрать пару линий *L28* и *L40*, нажать *OK* и повторить ввод параметра *RGALTELI* (Таблица 1) в поле *RAD* окна *Line Fillet*, а затем нажать *OK* (Рисунок 7) [3, 4].

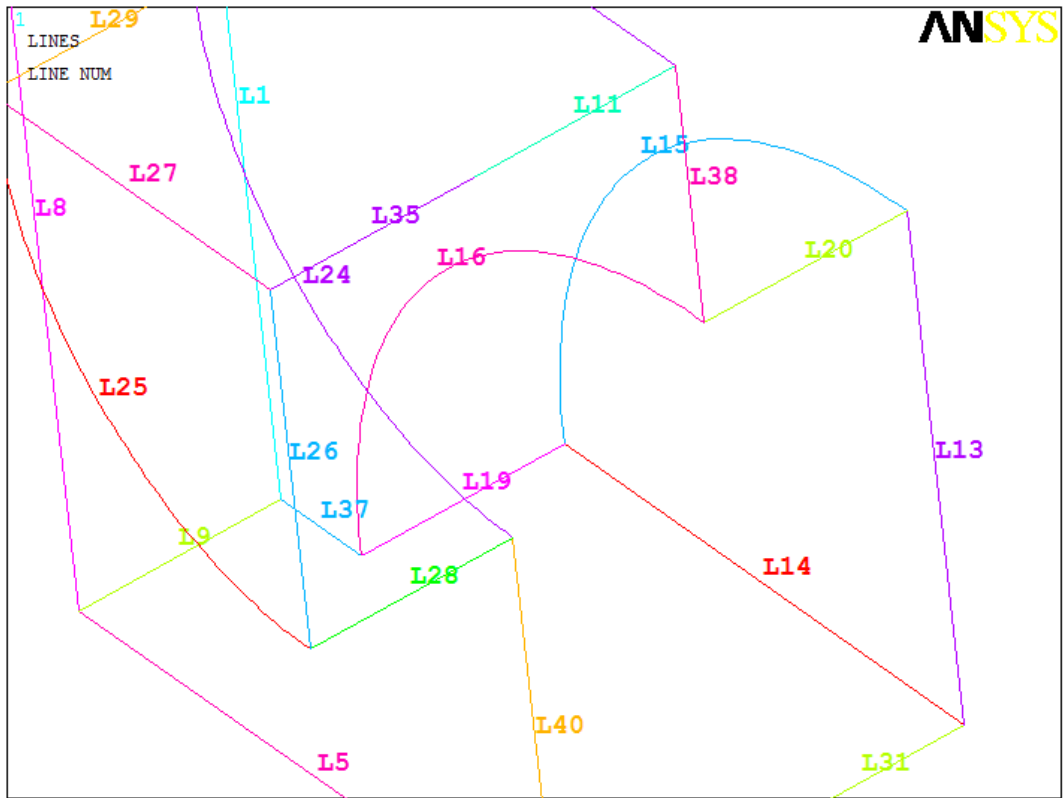


Рисунок 6 – Нумерация линий усеченной модели кривошипа

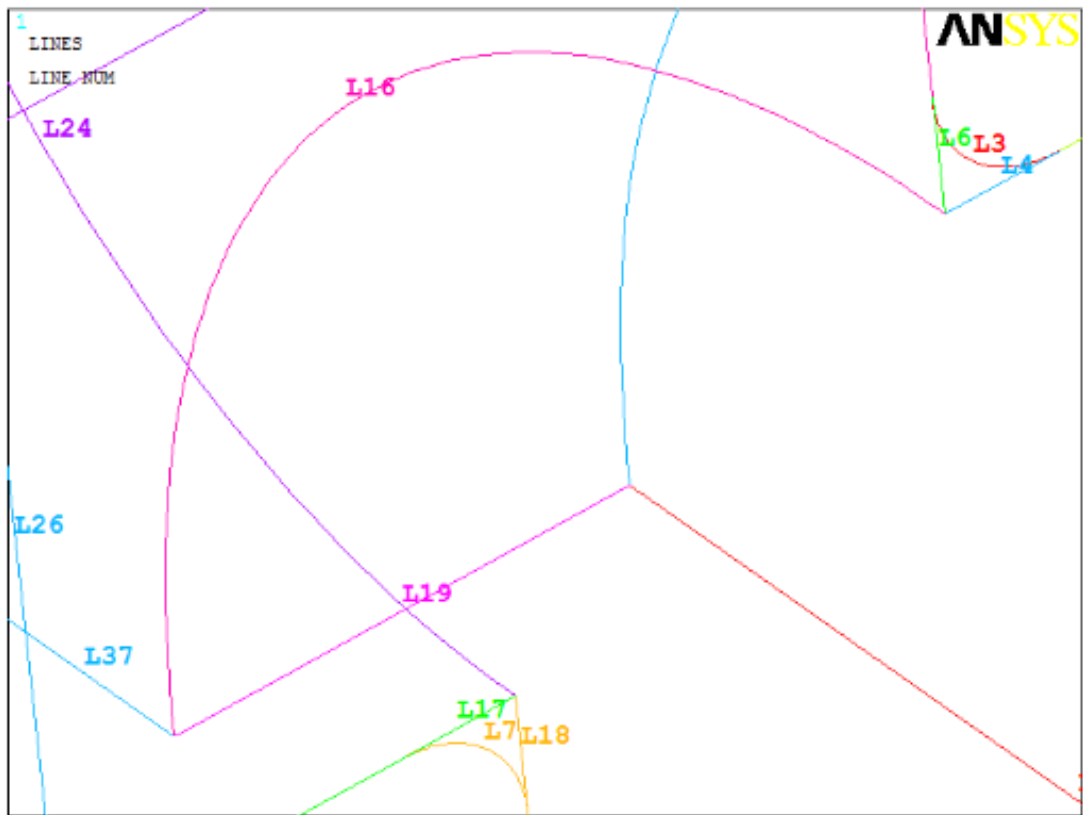


Рисунок 7 – Скругления между двумя парами линий

Для создания поверхностей из линий, полученных после скругления, следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines*. С помощью меню выбора требуется указать линии *L3, L4, L6* (Рисунок 7), нажать *Apply*, а затем указать линии *L7, L17, L18* (Рисунок 7) и нажать *OK* [3, 4].

Далее необходимо провести операции вытягивания поверхности *A4* вдоль линии *L16* (Рисунки 7, 8) и *A6* вдоль *L24* (Рисунки 7, 8) с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Lines*. В меню выбора требуется указать поверхность *A4*, нажать *OK*, а затем выбрать линию *L16* (Рисунки 7, 8) и нажать *Apply*. После этого следует указать поверхность *A6*, нажать *OK*, а затем выбрать линию *L24* (Рисунки 7, 8) и нажать *OK* [3, 4].

Далее требуется провести объединение новых объемов с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes* (следует нажать *Pick All*), а также объединение поверхностей *A1, A4, A6* (Рисунок 8) с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas* (следует указать данные поверхности и нажать *OK*) (Таблица 6) [3, 4].

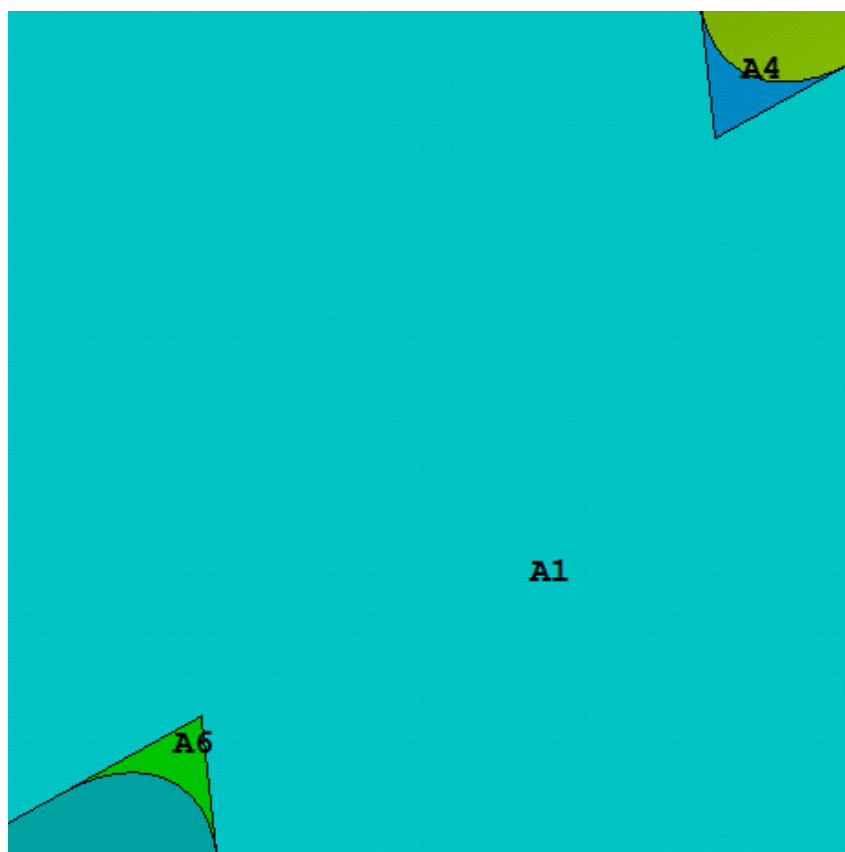


Рисунок 8 – Нумерация поверхностей сечений галтелей усеченной модели кривошипа

Таблица 6 – Код APDL построения галтелей усеченной модели кривошипа

№	Команда
1.	LFILLT, 20, 38, RGALTELI
2.	LFILLT, 28, 40, RGALTELI
3.	AL, 3, 4, 6
4.	AL, 7, 17, 18
5.	VDRAG, 4, , , , , 16
6.	VDRAG, 6, , , , , 24
7.	VADD, ALL
8.	AADD, 1, 4, 6

Исследователь может остановиться на создании моделей галтелей и перейти к заданию краевых условий, разбиению и решению задачи. Для этого следует пропустить участок кода (Таблица 7), посвященный созданию модели масляного канала.

Перед созданием модели масляного канала необходимо построить по одной вспомогательной ключевой точке на двух линиях *L35* и *L31* с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Line into 2 Ln's*. Используя меню выбора, требуется указать линию *L35* (Рисунок 6), нажать *Apply* или *OK* и приблизительно указать точку, делящую линию на две части, а затем нажать *Apply*. Далее необходимо выбрать линию *L31* (Рисунок 6), нажать *Apply* или *OK* и также приблизительно указать еще одну точку, делящую линию на две части, а затем нажать *OK* [3, 4]. После данных построений появятся две ключевые точки *I2* и *I3*, которые следует соединить линией *L16* (Рисунок 9) с помощью пункта главного меню. Эта линия будет являться осью масляного канала.

Данное положение масляного канала характерно для первого и последнего кривошипа коленчатого вала. Другие конструкции в данном примере не рассматриваются [3, 4].

Для создания собственно модели масляного канала необходимо построить цилиндр. Для этого первоначально требуется связать рабочую плоскость с плоскостью, перпендикулярной линии *L16* (Рисунок 9), с помощью пункта меню *Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Plane Normal to Line*. После его использования необходимо выбрать линию *L16* (Рисунок 9), а затем в появившемся окне в поле *Ratio along line* ввести *0*.

Построение цилиндра производится с помощью меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By Dimensions*. В окне *Create Cylinder by Dimensions* следует ввести размеры цилиндра, моделирующего масляный канал (Таблица 3) [3, 4].

Далее необходимо произвести вычитание объема *V1*, моделирующего масляный канал, из объема *V3*, моделирующего кривошип, с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes*, где требуется выбрать объем *V3*, нажать *OK*, выбрать цилиндр *V1* и еще раз нажать *OK* [3, 4].

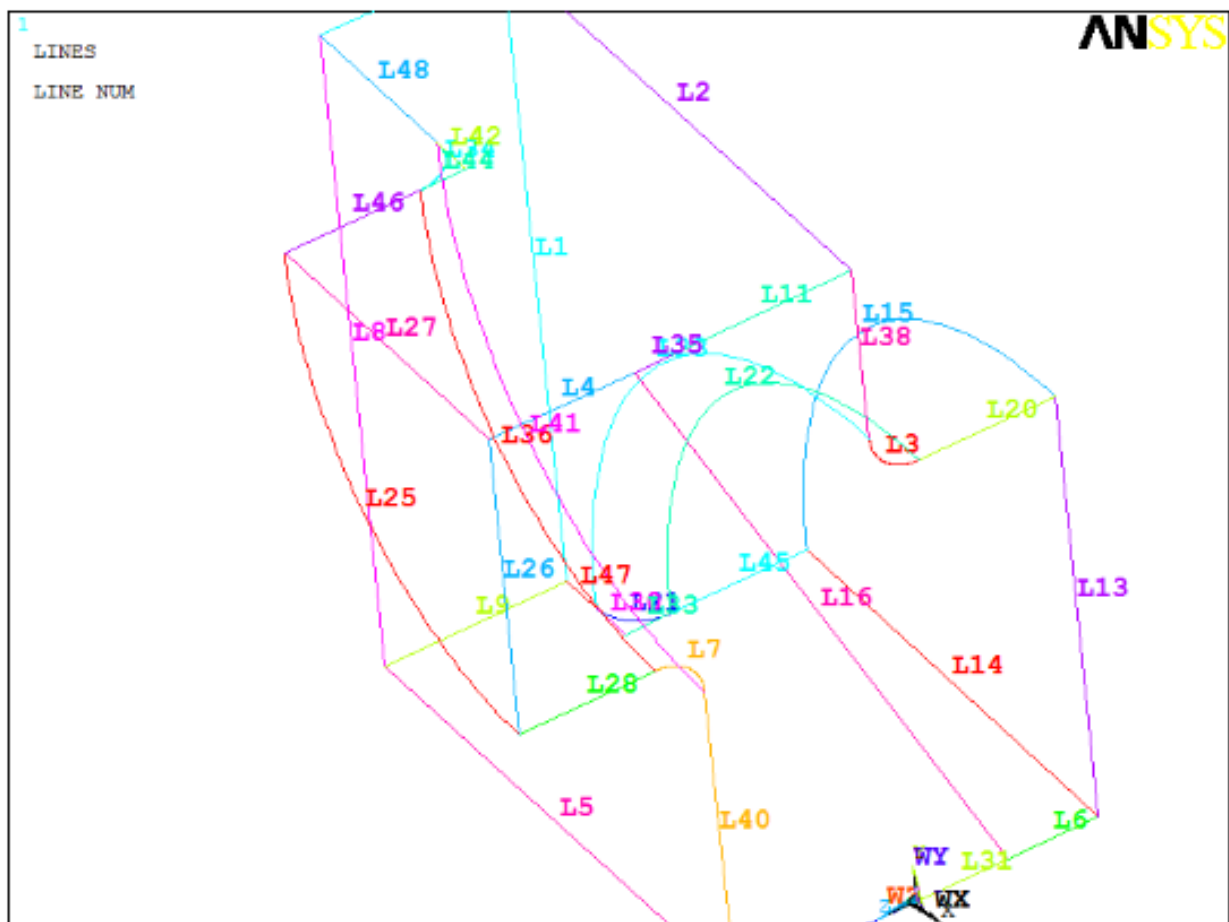


Рисунок 9 – Нумерация линий модели

Таблица 7 – Код APDL построения масляного канала усеченной модели кривошипа

№	Команда
1.	LDIV, 35, 0.2, , , 0
2.	LDIV, 31, 0.5, , , 0
3.	LSTR, 12, 13
4.	LWPLAN, 1, 16, 0
5.	CYLIND,RMASLKANAL,0,- SKOREN,HAXIS+SKOREN,0,360
6.	VSBV, 3, 1, , DELETE, DELETE
7.	WPLANE, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0

После этого следует вернуть рабочую плоскость в исходное положение с помощью пункта меню *Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Global Cartesian* (Рисунок 9). Отметим, что в команде 1 (Таблица 7) указан коэффициент 0.2 . Чем ближе данный коэффициент к нулю, тем ближе отверстие масляного канала к ключевой точке 7 (рис. 4). Если данный коэффициент ближе к 1 , то отверстие масляного канала ближе к ключевой точке 20 (рис. 4). В команде 2 (Таблица 7) ситуация аналогична: чем ближе указанный коэффициент к нулю, тем ближе отверстие масляного канала к ключевой точке 4 (Рисунок 4), в

противном случае – к ключевой точке 9 (Рисунок 4). Очевидно, что значения данных коэффициентов должны определяться, исходя из геометрии коленчатого вала с указанной конструкцией масляного канала (Рисунок 10).

1.1.9. Некоторые комментарии к дальнейшему улучшению модели коленчатого вала

Ограничения, принятые в ANSYS 10 ED, не позволяют произвести разбиение ни модели с галтелями, ни модели с масляным каналом. Однако, исходя из опыта задания материалов, разбиения и решения данной задачи, изложенных в таблице 5, можно сформировать код APDL, который будет давать необходимую точность при решении данной задачи в коммерческих версиях ANSYS.

Очевидно, вне зависимости от того, будет ли решаться задача для модели только с галтелями или с учетом масляных каналов, набор команд, определяющих материалы и разбиение, будет идентичен друг другу (Таблица 8).

Дополнительно команду *AREFINE* исследователь может использовать по своему усмотрению и добавить после кода приведенного в таблице 8 перед кодом из таблицы 9.

Список команд, задающих краевые условия, будет несколько отличаться друг от друга (Таблица 9), а список подготовительных команд 8–22 и команда решения 23 из Таблица 5 задачи останутся без изменений для любой из рассматриваемых краевых задач.

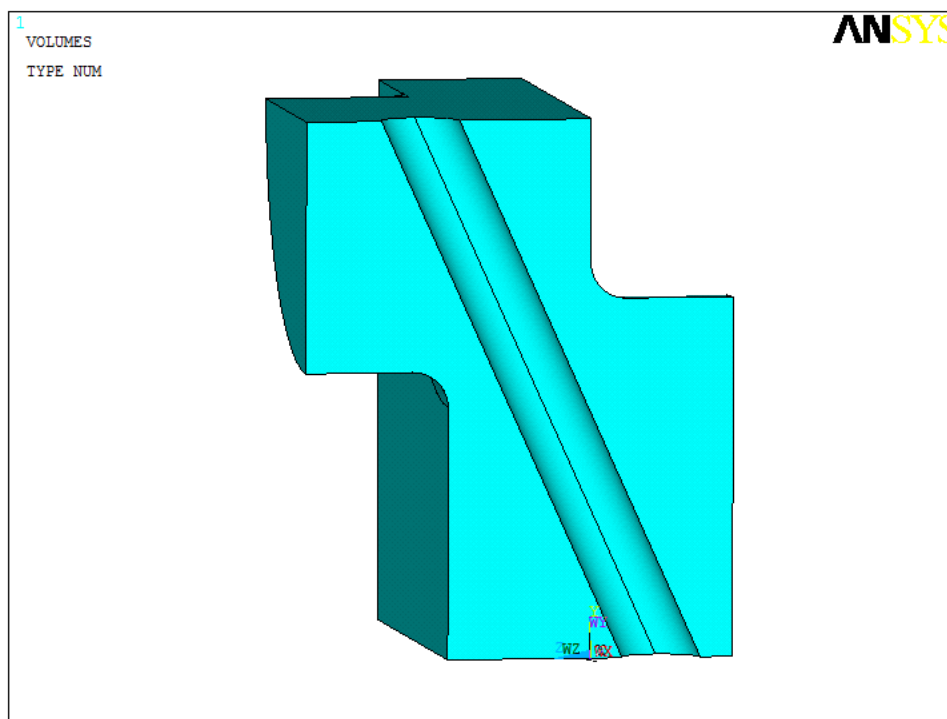


Рисунок 10 – Усеченная модель кривошипа с масляным каналом

Таблица 8 – Код APDL задания материалов и построения разбиения модели с галтелью и масляным каналом

№	Команда
1.	TB, BKin, 1
2.	MP, EX, 1, EX
3.	MP, PRXY, 1, PRXY
4.	TBDATA, 1, YIELDSTRS, TANGMODS
5.	ET, 1, SOLID187
6.	VSEL, S, VOLUME, , ALL
7.	VATT, 1, , 1
8.	MSHKEY, 0
9.	SMRTSIZE, 4
10.	VMESH, ALL

Таблица 9 – Код APDL задания краевых условий для разных моделей

№	Команды для модели с галтелями	Команда для модели с галтелями и каналом
1.	DA, 2, UX, 0	DA, 9, UX, 0
2.	DA, 13, UZ, 0	DA, 10, UX, 0
3.	DA, 7, UZ, 0	DA, 11, UX, 0
4.	DL, 14, , UY, 0	DA, 14, UX, 0
5.	FK, 20, FY, -F1	DA, 13, UZ, 0
6.	---	DA, 7, UZ, 0
7.	---	DL, 14, , UY, 0
8.	---	FK, 20, FY, -F1

1.1.10. Обсуждение результатов моделирования кривошипа коленчатого вала

Предложена методика расчета напряженного состояния в сечении кривошипа коленчатого вала, находящегося в верхней мертвой точке, без учета дополнительных (кроме масляного канала) пустот в шейках.

Решена задача об определении напряженного состояния в перекрытии шеек коленчатого вала в упругопластической постановке с учетом больших перемещений.

Построена параметрическая модель кривошипа коленчатого вала с учетом всех геометрических особенностей его конструкции, в том числе наличия масляного канала. В качестве примера рассмотрено положение масляного канала, характерное для первого и последнего кривошипов коленчатого вала.

Даны полные методические комментарии к предлагаемым моделям, созданным на основе использования ANSYS 10 ED, что позволяет разобраться в построении модели инженерно-конструкторскому составу, уточнить ее в

соответствии с чертежами и выполнить оптимизацию геометрических параметров коленчатого вала по критерию усталостного разрушения.

1.2. Облегченные конструкции шатуна и расчет их напряженного состояния при осевом нагружении

Рассматриваемая конструкция шатуна служит для передачи усилий от поршня к коленчатому валу и, наоборот, в двигателе внутреннего сгорания. Основными элементами шатуна являются: верхняя (поршневая) головка, стержень шатуна и нижняя головка [1, 2].

Ввиду переменных нагрузок, действующих на стержень шатуна, материал его должен обладать высоким сопротивлением усталости [1, 2], а конструкция достаточной жесткостью, чтобы обеспечить усталостную прочность и устойчивость при сжатии (последняя не рассматривается в данном разделе). С другой стороны, он должен быть максимально легким для уменьшения инерционных нагрузок и уменьшения неравномерности изнашивания деталей цилиндропоршневой группы.

1.2.1. Краткое описание постановки задачи для параметрической модели шатуна

Очевидно, что при расчете на долговечность стержня при многоцикловом осевом сжатии шатуна нет необходимости рассматривать верхнюю часть шатунной головки и крышку нижней головки, также можно игнорировать втулку поршневой головки и вкладыши в нижней головке (Рисунок 11). Отметим, что в разделе рассматривается конструкция шатуна без масляного канала.

Все эти упрощения позволяют упростить геометрию шатуна. Читатель сможет совершенно самостоятельно и без труда обобщить предлагаемую в разделе модель на модель с учетом всех отброшенных элементов конструкции шатуна и решить предлагаемую задачу в более точной постановке. Однако эти уточнения не будут иметь решающего значения в выработке рекомендаций по облегчению шатуна согласно предложенной расчетной модели.

Из особенностей рассматриваемой конструкции следует также отметить, что хотя в середине сечение стержня шатуна является двутавровым, однако предполагается, что нижний поперечный размер стержня шатуна несколько шире его верхнего поперечного размера. Таким образом, в плоскости шатуна его стержень представляет собой трапецию. Т.е. предлагаемая параметрическая модель является наиболее общим вариантом конструкции шатунов с двутавровым стержнем стержня (Рисунок 11, Таблица 10).

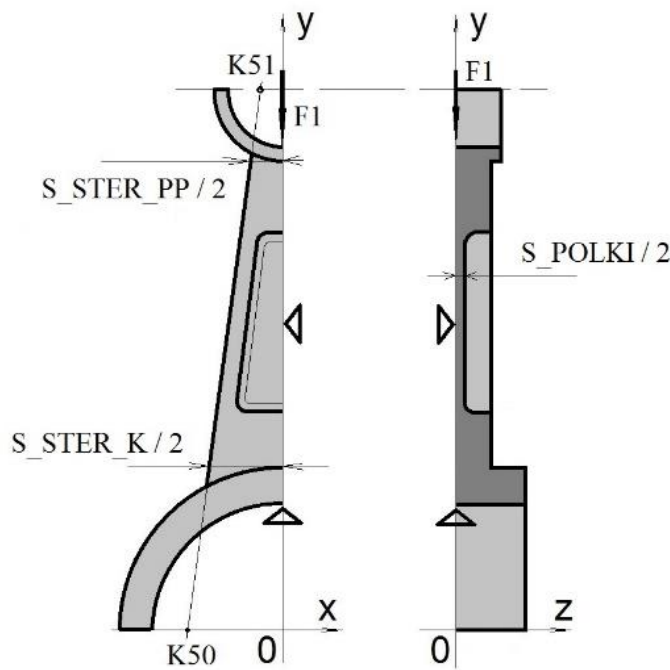
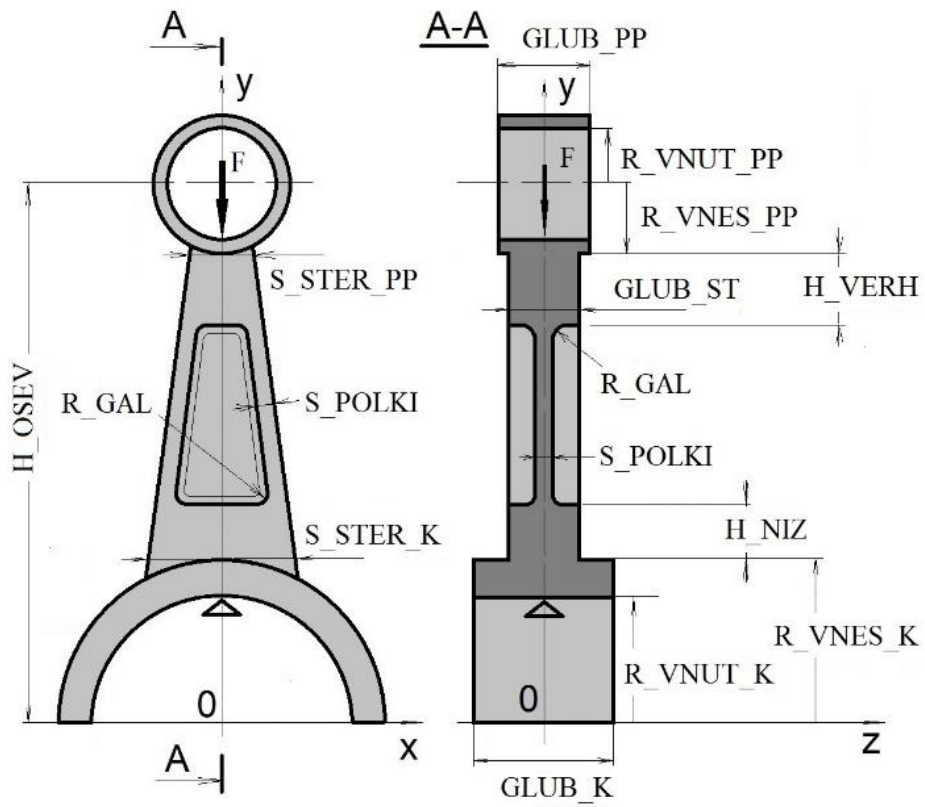


Рисунок 11 – Параметры шатуна при осевой нагрузке и его редукция к геометрической четверти с заменой отброшенных частей креплениями по соответствующим направлениям

Таблица 10 – Физические и геометрические параметры модели шатуна

Идентификатор и его значение	Описание параметра
EX=2.10E11	Модуль Юнга стали (Па)
PRXY=0.29	Коэффициент Пуассона стали
YIELDSTRS=7.E8	Предел текучести (Па)
TANGMODS=5.E9	Касательный пластический модуль стали в билинейной диаграмме Прандтля (Па)
R_VNES_K = 0.05	Внешний радиус нижней головки шатуна (м)
R_VNUT_K = 0.035	Внутренний радиус нижней головки шатуна (м)
GLUB_K = 0.04	Глубина нижней головки (м)
R_VNES_PP = 0.02	Внешний радиус верхней головки (м)
R_VNUT_PP = 0.012	Внутренний радиус верхней головки (м)
GLUB_PP = 0.035	Глубина верхней головки (м)
H_OSEV = 0.25	Межосевое расстояние (м)
S_STER_K = 0.05	Толщина стержня шатуна у колен вала (м)
S_STER_PP = 0.04	Толщина стержня шатуна у пальца поршня (м)
GLUB_ST = 0.03	Глубина стержня шатуна (м)
S_POLKI = 0.006	Толщина полки стержня шатуна (м)
H_VERH = 0.03	Высота утолщения пальца у верхней головки (м)
H_NIZ = 0.03	Высота утолщения пальца у нижней головки (м)
R_GAL = 0.005	Радиус галтелей (предполагается единый) (м)
H_VERH_P = 0.09	Вертикальное расстояние от верхней головки до верхней границы вспомогательной перемычки в облегченной конструкции стержня (м)
H_NIZ_P = 0.07	Вертикальное расстояние от нижней головки до нижней границы вспомогательной перемычки в облегченной конструкции стержня (м)
F = -10000	Полная нагрузка с учетом знака, действующая на шатун от поршня вертикально вниз (Н)
F1 = F / 4	Нагрузка от поршня, действующая на четверть модели шатуна (Рисунки 11-13) вертикально вниз (Н)
$H = \frac{H_OSEV}{R_VNES_K - R_VNES_PP}$	Длина стержня шатуна (м)

В данном разделе рассматривается НДС стержня шатуна исключительно в случае его осевого сжатия без учета влияния коэффициента трения на перераспределение нагрузок. Под осью шатуна в разделе понимается пересечение двух плоскостей его симметрии.

Исходя из общих рекомендаций построения конечноэлементных моделей симметричных объектов с использованием свободного разбиения, будем строить

наименьшую симметричную часть, а именно четверть шатуна, с заменой остального объема соответствующими ограничениями по перемещениям [7]. Это необходимо сделать по многим причинам:

- во-первых, при использовании свободного разбиения в симметричной детали очень сложно получить грубое симметричное конечно-элементное разбиение детали, в связи с этим при решении задачи могут получиться неестественные перекосы, не соответствующие механическому поведению детали;
- во-вторых, при использовании версии ANSYS 10 ED пользователь очень ограничен в количестве элементов и соответственно усечение геометрии до четверти детали позволит адекватно решить поставленную задачу с учетом действующих ограничений;
- в-третьих, в большинстве случаев исследователь заинтересован в распределении напряжений внутри детали, а не только на ее поверхности, и создание дополнительных сечений детали в этих условиях просто необходимо.

1.2.2. Методика вычисления X-координат вспомогательных ключевых точек, определяющих наклон боковых сторон шатуна

Обозначим через x_{50} и x_{51} координаты точек $K50$ и $K51$ (Рисунок 11). Исходя из рассмотрения двух трапеций, можно составить следующие уравнения определения длины линий параллельных основаниям двух трапеций, совпадающих по величине с $S_{STER_K}/2$ и $S_{STER_PP}/2$:

$$\begin{aligned} \frac{S_{STER_K}}{2} &= \frac{S_{STER_PP}}{2} \left(1 - \frac{H}{H + R_VNESH_K} \right) + \\ &+ |x_{50}| \cdot \left(1 - \frac{R_VNESH_K}{H + R_VNESH_K} \right), \\ & \hspace{15em} (1) \\ \frac{S_{STER_PP}}{2} &= |x_{51}| \cdot \left(1 - \frac{R_VNESH_PP}{H + R_VNESH_PP} \right) + \\ &+ \frac{S_{STER_K}}{2} \cdot \left(1 - \frac{H}{H + R_VNESH_PP} \right). \end{aligned}$$

Упрощая (1), получаем явные значения X-координат вспомогательных точек $K50$ и $K51$:

$$x_{50} = -\frac{1}{2}(S_STER_PP + (S_STER_K - S_STER_PP) \times (1 + R_VNESH_K/H)),$$

(2)

$$x_{51} = -\frac{1}{2}(S_STER_K - (S_STER_K - S_STER_PP) \times (1 + R_VNESH_PP/H)).$$

В соответствии с порядком построения модели шатуна последовательно будут рассмотрены следующие конструкции стержня шатуна при их расчете на жесткость: облегченный стержень шатуна без внутренней полки (Рисунок 12), облегченный стержень шатуна с перемычкой (Рисунок 13) и исходная конструкция, когда перемычка по высоте занимает всю внутреннюю полость стержня (Рисунок 11).

1.2.3. Построение параметрической модели четверти облегченного шатуна без стенки в двутавровом стержне

Вначале следует задать параметры, которые будут использоваться при создании модели четверти шатуна, воспользовавшись пунктом меню *Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters*. В поле *Selection* появившегося окна следует ввести необходимые параметры (Таблица 10).

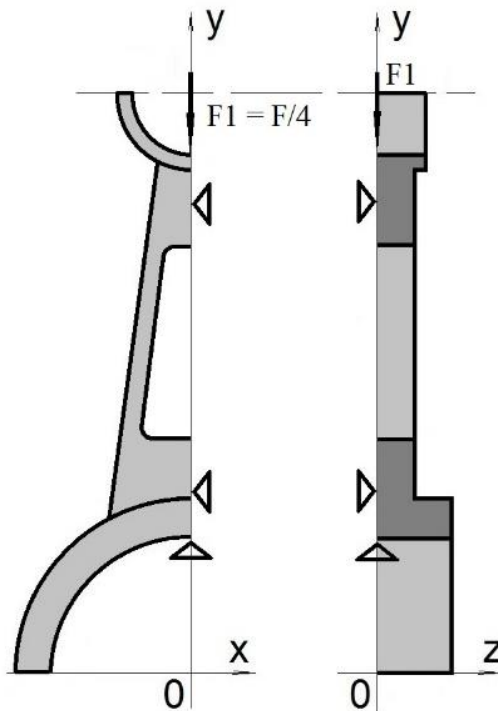


Рисунок 12 – Четверть облегченного шатуна

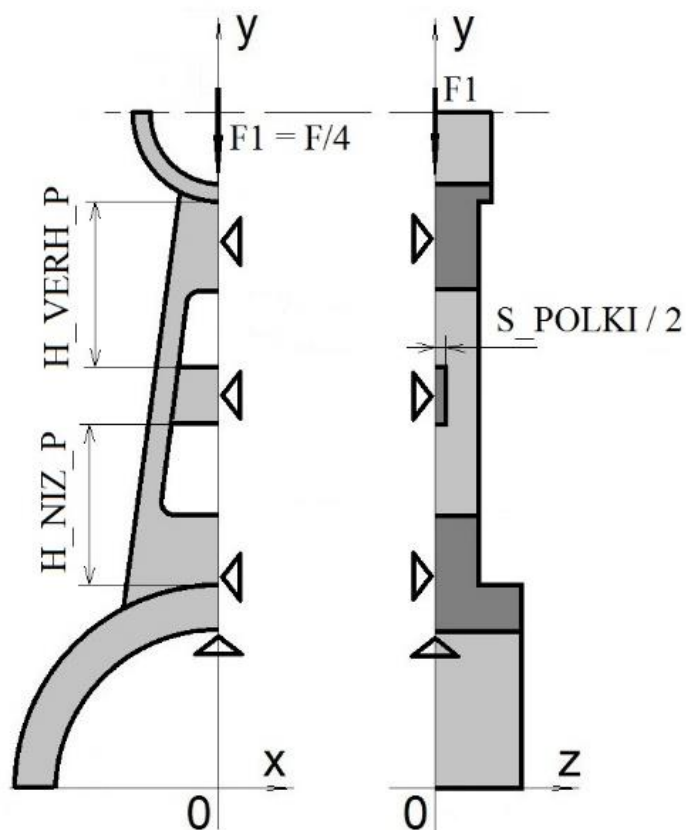


Рисунок 13 – Облегченная конструкция стержня шатуна с узкой перемычкой для усиления конструкции

При построении модели четверти шатуна, отброшенные части которого будут заменены закреплениями по соответствующим направлениям, будет использоваться комбинированная методика: «сверху вниз» (создание объемов с помощью шаблонов с автоматической генерацией ключевых точек, линий и поверхностей) и «снизу вверх» (пользователь сам должен будет создавать сначала ключевые точки, затем линии, поверхности и, наконец, объемы).

На первом шаге построения геометрии «сверху вниз» создадим такие объемы как две четверти цилиндрического кольца, моделирующих верхнюю (поршневую) и нижнюю головки шатуна [3, 4], кроме того, создадим два параллелепипеда, моделирующих утолщения стержня шатуна на границе с головками.

Создание двух цилиндрических секторов осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By Dimensions*. В окне *Create Cylinder by Dimensions* необходимо ввести размеры одного сектора цилиндра (Таблица 11), нажать *Apply* и ввести размеры второго сектора цилиндра (Таблица 11) и нажать в конце *OK* [3, 4].

Далее модель верхней (шатунной головки) надо перенести вдоль оси OY с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volumes*. В появившемся окне выбора надо указать *V2* или кликнуть мышью соответствующий цилиндр и после нажатия кнопки *OK* или *Apply* в окне *Move*

Volumes заполнить только поле *DY* параметром *H_OSEV* и нажать *OK* [3, 4] (Таблица 10).

Создание параллелепипедов осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions*. В окне *Create Block by Dimensions*, необходимо ввести параметрические координаты левого дальнего и правого ближнего угла первого параллелепипеда, нажать кнопку *Apply*, ввести параметрические координаты второго параллелепипеда и нажать кнопку *OK* (Таблица 12) [3, 4].

Таблица 11 – Параметры и их значения, необходимые к заполнению в окне *Create Cylinder by Dimensions*

Имя параметра	Первый цилиндрический сектор (модель нижней головки шатуна)	Второй цилиндрический сектор (модель верхней головки шатуна)
R1	R_VNES_K	R_VNES_PP
R2	R_VNUT_K	R_VNUT_PP
Z1	0	0
Z2	GLUB_K/2	GLUB_PP /2
Theta1	90	180
Theta2	180	270

Таблица 12 – Параметры и их значения, необходимые к заполнению в окне *Create Block by Dimensions*

Имя параметра	Значения для первого параллелепипеда	Значения для второго параллелепипеда
X1	-S_STER_K/2	-S_STER_K/2
Y1	0	H_OSEV - R_VNES_PP - H_VERH
Z1	0	0
X2	0	0
Y2	R_VNES_K + H_VERH	H_OSEV
Z2	GLUB_ST/2	GLUB_ST/2

Далее необходимо выполнить деление объемов с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Volume by Area*. С помощью появившегося окна *Divide Vol by Area* необходимо последовательно выбрать объем с номером *V4* и нажать кнопку *Apply* (или *OK*), а затем поверхность с номером *A9* и нажать кнопку *Apply* (Рисунок 14). Далее выбрать объем с номером *V3* и нажать кнопку *Apply*, а затем поверхность с номером *A3* и нажать кнопку *OK* [3, 4].

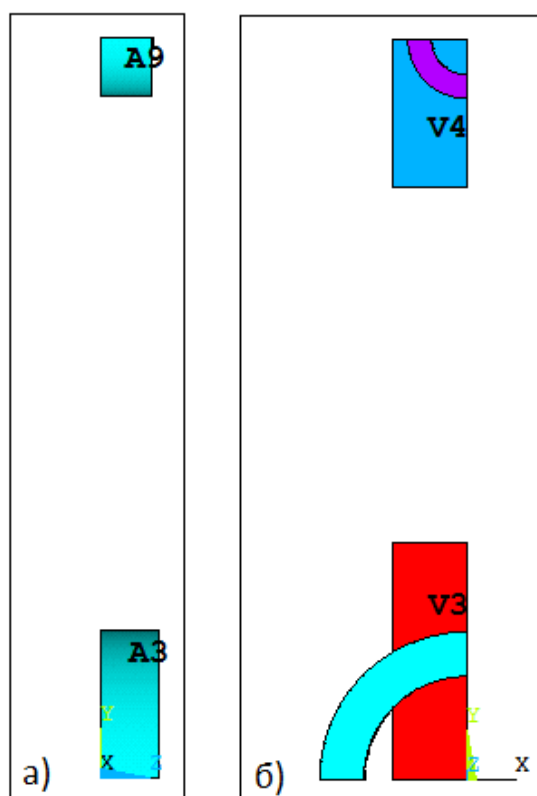


Рисунок 14 – Два вида созданных объемов: а) вид слева со включенной нумерацией поверхностей; б) вид спереди со включенной нумерацией объемов

Удаление отсеченных объемов осуществляется с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Volume and Below*. С помощью появившегося окна *Delete Volume & Below* следует последовательно выбрать объемы V4 и V5 и нажать кнопку OK [3, 4].

Далее проводим уплотнение нумерации всех геометрических компонент трехмерного рисунка с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > NumberingCtrls > Compress Numbers*. В раскрывающемся списке появившегося окна *Compress Numbers* необходимо выбрать пункт *ALL* [3, 4].

Создаем ключевые точки с номерами 50-53, определяющие наклон боковой полки стержня шатуна и ее толщину с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS* [3, 4].

Напомним, что X-координаты точек K50 и K51 определяются уравнениями (2). Соответственно координаты точек K52 и K53 отличаются от точек K50 и K51 только координатой Z на величину половины глубины стержня ($GLUB_ST/2$).

Таким образом, в появившемся окне *Create Keypoints In Active Coordinate System* поля необходимо заполнить в соответствии с каждой из строк таблицы 13, соответствующей номеру ключевой точки. После каждого заполнения координат ключевых точек K50-K52 (т.е. после каждой строки таблицы) необходимо нажать кнопку *Apply*, а после заполнения координат точки K53 следует нажать OK [3, 4].

Таблица 13 – Координаты ключевых точек $K50 - K53$ боковой наклонной полки шатуна

Номер ключ. точки	x	y	z
K50	$-(S_STER_PP + (S_STER_K - S_STER_PP) * (1 + R_VNES_K / H)) / 2$	0	0
K51	$-(S_STER_K - (S_STER_K - S_STER_PP) * (1 + R_VNES_PP / H)) / 2$	H_OSEV	0
K52	$-(S_STER_PP + (S_STER_K - S_STER_PP) * (1 + R_VNES_K / H)) / 2$	0	GLUB_ST/2
K53	$-(S_STER_K - (S_STER_K - S_STER_PP) * (1 + R_VNES_PP / H)) / 2$	H_OSEV	GLUB_ST/2

Создаем боковую наклонную внешнюю поверхность полки стержня шатуна по ключевым точкам $K50-K53$ с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs*. С помощью появившегося меню *Create Area Through KPs* выбираем последовательно ключевые точки $K50, K51, K53, K52$ в последовательности против часовой стрелки, для того, чтобы последующая операция вытягивания полки прошла внутрь стержня шатуна, и нажимаем *OK* (Рисунок 15) [3, 4].

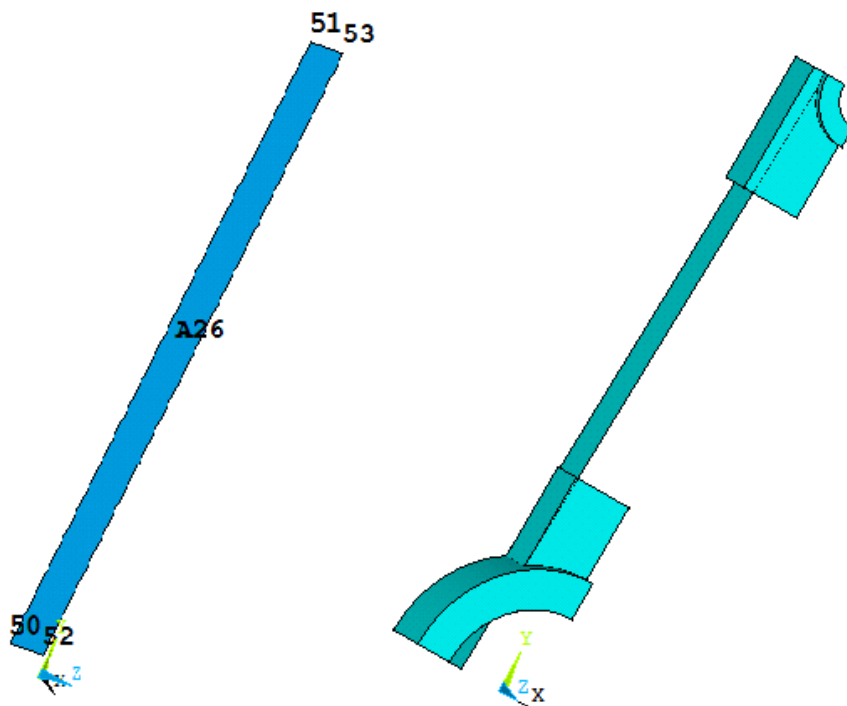


Рисунок 15 – Отдельный вид боковой поверхности стержня шатуна со включенной нумерацией (слева), а также вид боковой поверхности в составе геометрической модели шатуна (справа)

Вытягивание объема смещением внешней боковой поверхности полки вдоль нормали к указанной поверхности (нормаль определяется направление обхода ключевых точек в предыдущем пункте) осуществляется с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal*. С помощью появившегося меню *Extrude Areas by Norm* необходимо выбрать поверхность A26 и в следующем окне *Extrude Areas Along Normal* в окне *DIST* указать толщину предполагаемого объема равную параметру *S_POLKI* (Таблица 10) [3, 4].

Отметим, что номер получившегося после вытягивания объема боковой полки равен 5. Далее проводим разделение ранее построенных объемов *V3* и *V4* (моделирующих утолщение стержня) с помощью поверхности A26 (Рисунок 15). Это действие можно выполнить с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Volume by Area*. С помощью первого меню выбора *Divide Vol by Area* выбрать объемы *V3* и *V4* нажать *OK*, с помощью второго меню выбора *Divide Vol by Area* выбрать поверхность A26 и нажать *OK* [3, 4].

Далее с помощью того же пункта меню следует выбрать объем *V5* (боковой полки), а на втором этапе последовательно указать поверхности A3 и A9 [3, 4].

Необходимо отметить, что описание этого действия с помощью команд (Таблица 14) будет иметь более сложный вид чем приведенный выше способ использования пунктов главного меню, т.к. формально после деления объема *V5* (Рисунок 15) с помощью поверхности A9 (Рисунок 14) образуется два объема с разными номерами и нужный нам в дальнейших построениях будет иметь номер 9, т.е. формально при втором и завершающем делении с помощью команд необходимо выбрать объем уже *V9* и затем поверхность A3 (Таблица 14) [3, 4].

После деления объемов поверхностями их ненужные части необходимо удалить, используя пункт главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Volume and Below*. С помощью появившегося меню выбора *Delete Volume & Below* необходимо выбрать ненужные объемы с номерами *V3, V4, V7, V10* и нажать кнопку *OK* [3, 4].

Далее необходимо для получения единого объема для модели шатуна провести объединение всех созданных объемов. Эта операция больше необходима для того, чтобы при создании сетки автоматическими средствами ANSYS он не создал дополнительные точки на всех внутренних поверхностях и линиях. Для объединения объемов применяется пункт главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes*. В появившемся меню выбора компонент необходимо нажать кнопку *Pick All* [3, 4].

С целью уменьшения количества узлов на поверхности модели необходимо провести последовательное объединение групп поверхностей: первой – на передней границе стержня шатуна, второй и третьей – на боковой справа границе четверти шатуна, а четвертая и наибольшая группа должна быть объединена на задней границе четверти шатуна (Рисунок 16). Для выполнения операции объединения поверхностей необходимо воспользоваться пунктом главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas*. С помощью появившегося меню выбора *Add Areas* на виде спереди

(Рисунок 16) необходимо выбрать поверхности *A14*, *A38*, *A18*, нажать *Apply*, на виде справа (Рисунок 16) выбрать поверхности *A15* и *A22*, нажать *Apply*, затем поверхности *A20* и *A21*, также нажать *Apply*. После этого на виде сзади (Рисунок 16) выбрать поверхности *A13*, *A24*, *A25*, *A17*, *A23* (не по порядку номеров, а так чтобы они имели общую границу) и нажать кнопку *OK* [3, 4].

Далее еще раз проводим уплотнение нумерации всех геометрических компонент трехмерного рисунка с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > NumberingCtrls > Compress Numbers* (Рисунок 17) [3, 4].

Достраиваем галтели внутри полости в стержне шатуна (рис. 1, 7). Для этого используем пункт главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Line Fillet*. С помощью появившегося меню выбора *Line Fillet* выбираем линии *L44* и *L24*, нажимаем кнопку *Apply* или *OK* и в появившемся диалоговом окне *Line Fillet* в поле *RAD* вводим имя параметра *R_GAL* и нажимаем *Apply*. Далее выбираем линии *L38* и *L24*, нажимаем кнопку *Apply* или *OK* и в появившемся диалоговом окне *Line Fillet* в поле *RAD* вводим имя параметра *R_GAL* и нажимаем *OK* (Рисунок 18) [3, 4].

Для перерисовки изображения и отображения новых линий с нумерацией в меню утилит используем пункт *Utility Menu > Plot > Replot* [3, 4].

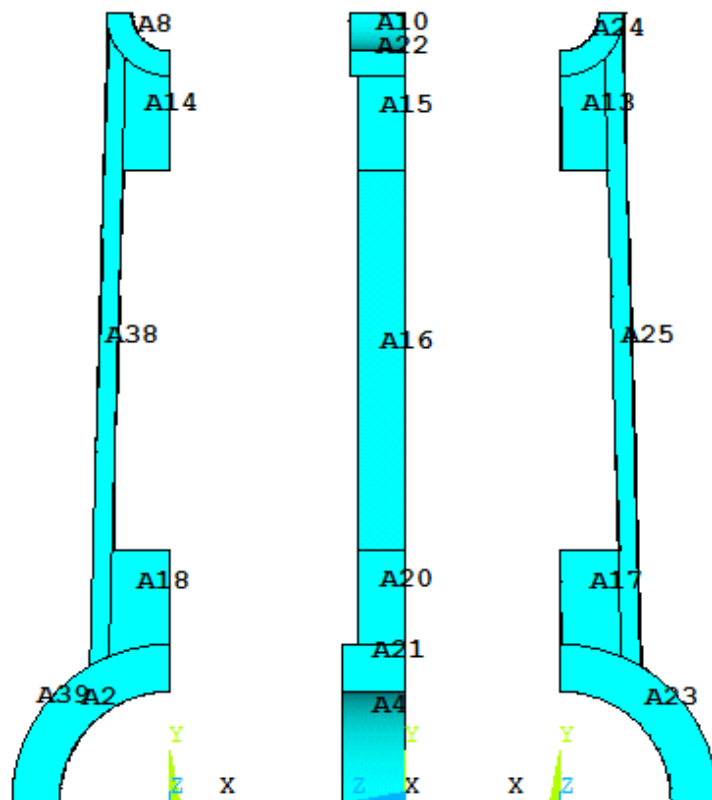


Рисунок 16 – Проекция модели четверти шатуна (справа – налево: вид спереди, справа и сзади) с включенными номерами поверхностей

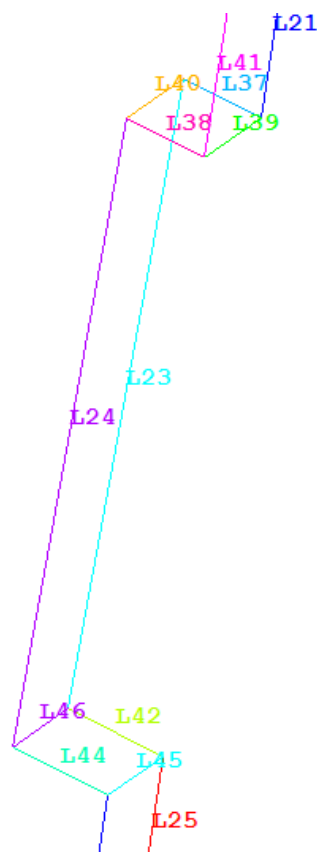


Рисунок 17 – Нумерация линий внутренней полости четверти стержня шатуна

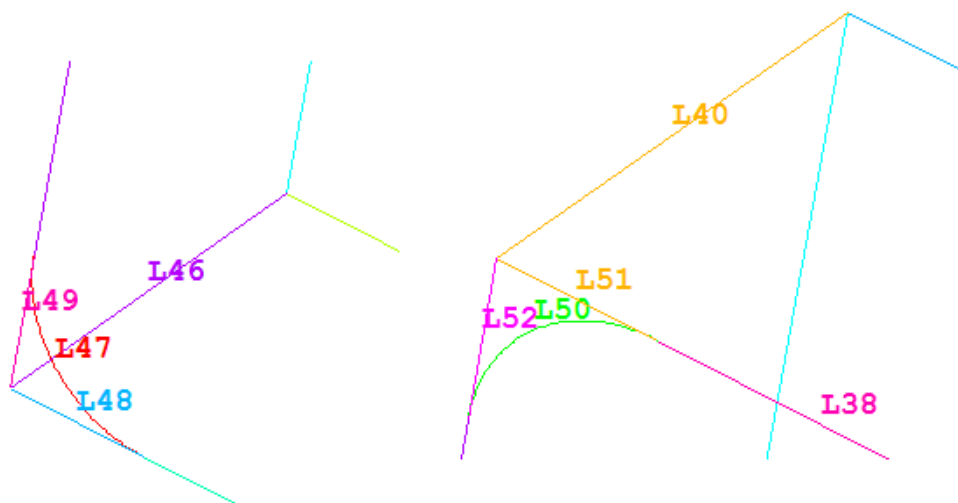


Рисунок 18 – Нумерация линий, из которых будет сформированы галтели (слева-направо: нижняя часть полости и верхняя часть полости в четверти шатуна)

Для построения по линиям поверхности воспользуемся пунктом главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines*. С помощью появившегося меню выбора *Create Areas By Lines* следует выбрать линии *L47, L48, L49* нажать *Apply*, а далее выбрать линии *L50, L52, L51* и нажать *OK*. Правила обхода границ будущей поверхности, очевидно, также должно быть

по часовой стрелке. После этого будут построены две поверхности: по первой группе линий – поверхность *A17*, а по второй группе линий – поверхность *A18* [3, 4].

Далее построим объемы, соответствующие галтелям с помощью вытягивания *A17* вдоль линии *L46* и *A18* вдоль линии *L40*. Для этого воспользуемся пунктом главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Lines*. С помощью появившегося меню выбора *Sweep Areas along Lines* необходимо выбрать вначале поверхность, которую надо вытягивать, нажать *Apply* или *OK*, а затем линию, вдоль которой необходимо вытягивать и также нажать одну из кнопок подтверждения. В данном случае из-за одинаковой длины линий *L40* и *L46* для сокращения количества операций можно выбрать обе поверхности сразу *A17* и *A18* и нажать *OK*. Далее выбрать одну любую из линий *L40* или *L46* (в разделе выбрана линия *L40*). Отметим, что такое упрощение не всегда хорошо срабатывает и проверка осуществляется на следующих операциях объединения объемов и поверхностей – если последние операции прошли нормально, то и предложенное упрощение было сделано верно.

Для объединения объемов используем пункт главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes*. В появившемся меню выбора компонент необходимо нажать кнопку *Pick All* [3, 4].

Далее необходимо провести объединение передней и задней поверхностей стержня шатуна с новыми появившимися поверхностями после построения галтелей. Отметим, что передние поверхности, подлежащие объединению – это поверхности *A1*, *A17*, *A18*, а вторая группа поверхностей (позади четверти шатуна) – *A32*, *A28*, *A27* [3, 4].

Как и ранее для выполнения операции объединения поверхностей необходимо воспользоваться пунктом главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas*. С помощью появившегося меню выбора *Add Areas* необходимо выбрать на виде спереди поверхности *A1*, *A17*, *A18*, нажать *Apply*, после этого на виде сзади выбрать поверхности *A32*, *A28*, *A27* (не по порядку номеров, а так чтобы они имели общую границу) и нажать кнопку *OK* [3, 4].

Полное описание модели после определения параметров (Таблица 10) с помощью команд APDL, соответствующих использованным выше пунктам главного меню приведены в таблице 14.

1.2.4. Выбор типа задачи и указание свойств материалов модели. Выбор типа элемента для разбиения модели. Назначение атрибутов модели

Эти пункты полностью повторяют действия, описанные в разделе [7], поэтому ограничимся кратким описанием пунктов главного меню и полностью продублируем последовательность действий с помощью команд.

Таблица 14 – Код ANSYS APDL для построения параметризованной твердотельной модели четверти облегченного шатуна без центральной стенки

№	Команда
1.	/PREP7
2.	CYLIND, R_VNES_K, R_VNUT_K, 0, GLUB_K/2, 90, 180
3.	CYLIND, R_VNES_PP, R_VNUT_PP, 0, GLUB_PP /2, 180, 270
4.	VGEN, , 2, , , , H_OSEV, , , , 1
5.	BLOCK, -S_STER_K/2, 0, 0, R_VNES_K +H_VERH, 0, GLUB_ST/2
6.	BLOCK, -S_STER_K/2, 0, H_OSEV - R_VNES_PP - H_VERH, H_OSEV, 0, GLUB_ST/2
7.	VSBA, 4, 9, SEPO, DELETE, KEEP
8.	VSBA, 3, 3, SEPO, DELETE, KEEP
9.	VDELE, 4, 5, , 1
10.	NUMCMP, ALL
11.	K, 50, -(S_STER_PP + (S_STER_K - S_STER_PP)*(1 + R_VNES_K / H)) / 2, 0, 0
12.	K, 51, -(S_STER_K - (S_STER_K - S_STER_PP)*(1 + R_VNES_PP / H)) / 2, H_OSEV, 0
13.	K, 52, -(S_STER_PP + (S_STER_K - S_STER_PP)*(1 + R_VNES_K / H)) / 2, 0, GLUB_ST/2
14.	K, 53, -(S_STER_K - (S_STER_K - S_STER_PP)*(1 + R_VNES_PP / H)) / 2, H_OSEV, GLUB_ST/2
15.	A, 50, 51, 53, 52
16.	VOFFST, 26, S_POLKI
17.	VSBA, 3, 27, SEPO, DELETE, KEEP
18.	VSBA, 4, 27, SEPO, DELETE, KEEP
19.	VSBA, 5, 9, SEPO, DELETE, KEEP
20.	VSBA, 9, 3, SEPO, DELETE, KEEP
21.	VDELE, 3, 4, , 1
22.	VDELE, 7, , , 1
23.	VDELE, 10, , , 1
24.	VADD, ALL
25.	AADD, 14, 38, 18
26.	AADD, 15, 22
27.	AADD, 20, 21
28.	AADD, 13, 24, 25, 17, 23
29.	NUMCMP, ALL
30.	LFILLT, 44, 24, R_GAL
31.	LFILLT, 38, 24, R_GAL
32.	AL, 47, 48, 49
33.	AL, 50, 52, 51
34.	VDRAG, 17,18, , , , , 40
35.	VADD, ALL
36.	AADD, 1, 17, 18
37.	AADD, 32, 28, 27

Для выбора типа решаемой задачи необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu* > *Preferences...* и в окне *Preferences for GUI Filtering* указать *Structural* [5, 7].

Для указания модели материала необходимо с помощью пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Material Props* > *Material Models* вызвать окно *Define Material Model Behavior*. В правом окне с помощью пункта *Define Material Model Behavior* > *Material Models Available* > *Structural* > *Nonlinear* > *Inelastic* > *Rate Independent* > *Kinematic Hardening Plasticity* > *Mises Plasticity* > *Bilinear* выбрать упругопластический материал с билинейной диаграммой растяжения. Параметры материала заполняются аналогично работе [7] с использованием параметров из таблицы 10.

Выбор элемента *Brick 8node 45* производится при использовании пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete* после нажатия кнопки *Add* в окне *Element Types*, затем следует закрыть окно [5, 7].

Набор атрибутов присваивается всей геометрической модели четверти шатуна с помощью пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh Attributes* > *All Volumes* [5, 7].

1.2.5. Построение разбиения модели четверти шатуна

Для построения свободного разбиения модели необходимо установить грубый уровень разбиения с помощью пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *Size Cntrls* > *SmartSize* > *Basic* (установить уровень 8) [5, 7]. После этого необходимо построить свободное разбиение с помощью пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh* > *Volumes* > *Free* [5, 7].

1.2.6. Назначение граничных условий для четверти шатуна

Задание краевых условий на модель четверти шатуна следует начать с простейших ограничений. Во-первых, необходимо закрепить сечение шатуна в плоскости симметрии *YOZ* (в данном случае запретить перемещение поверхностей *A3* и *A5* вдоль оси *OX*) и, во-вторых, закрепить поверхности *A1* вдоль оси *OZ* [5, 7].

Для этого следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Loads* > *Define Loads* > *Apply* > *Structural* > *Displacement* > *On Areas*. Для задания первого граничного условия требуется выбрать поверхности *A3* и *A5* (Рисунок 19), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку *UX*, в поле *VALUE* задать величину перемещения 0 (м) и нажать кнопку *Apply*. Далее следует выбрать поверхности шеек *A1* (Рисунок 19), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку *UZ*, в поле *VALUE* задать величину перемещения 0 (м) и нажать кнопку *OK* [5, 7].

Далее необходимо закрепить участок нижней головки шатуна. Поскольку нижняя головка опирается на кривошип, то для простейшего закрепления нижней головки шатуна можно закрепить линию $L10$ (Рисунок 20, а) по направлению OY . Для этого следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Loads* > *Define Loads* > *Apply* > *Structural* > *Displacement* > *On Lines* и повторить действия аналогичные изложенным выше для поверхностей [5, 7].

Для нагружения шатуна можно задать ненулевые перемещения линии $L19$ с помощью которой (Рисунок 20, а) осуществляется передача усилия от поршня на шатун. Однако в данном разделе будет приложена сосредоточенная сила $F1$ к ключевой точке $K11$ (Рисунок 20, Таблица 10). Для этого следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Loads* > *Define Loads* > *Apply* > *Structural* > *Force/Moment* > *On Keypoints*. Для задания силы, приложенной в точке $K11$ и действующей вертикально вниз, необходимо выбрать данную точку, нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку FY , в поле *VALUE* указать выражение $F1$ (Таблица 10). В завершении необходимо нажать кнопку *OK* [5, 7].

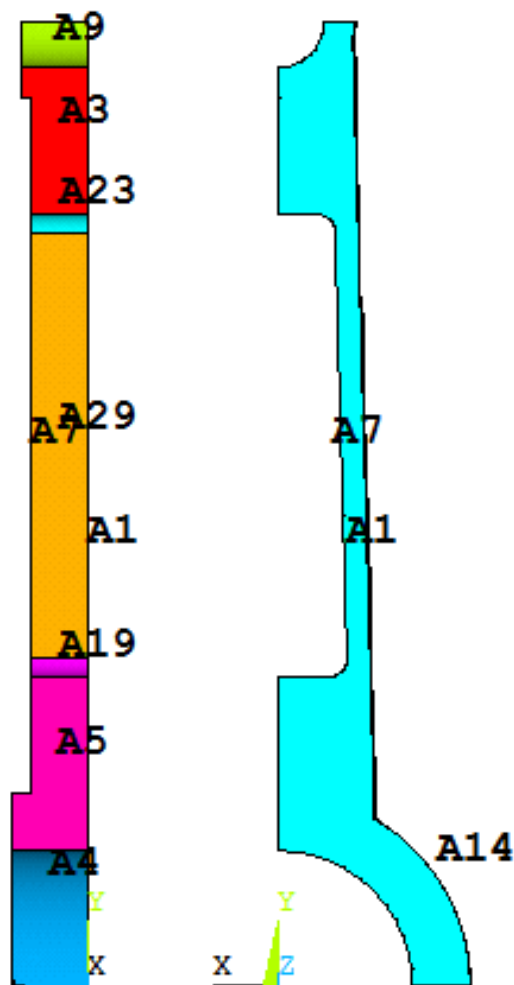


Рисунок 19 – Нумерация поверхностей на виде справа и сзади твердотельной модели четверти шатуна

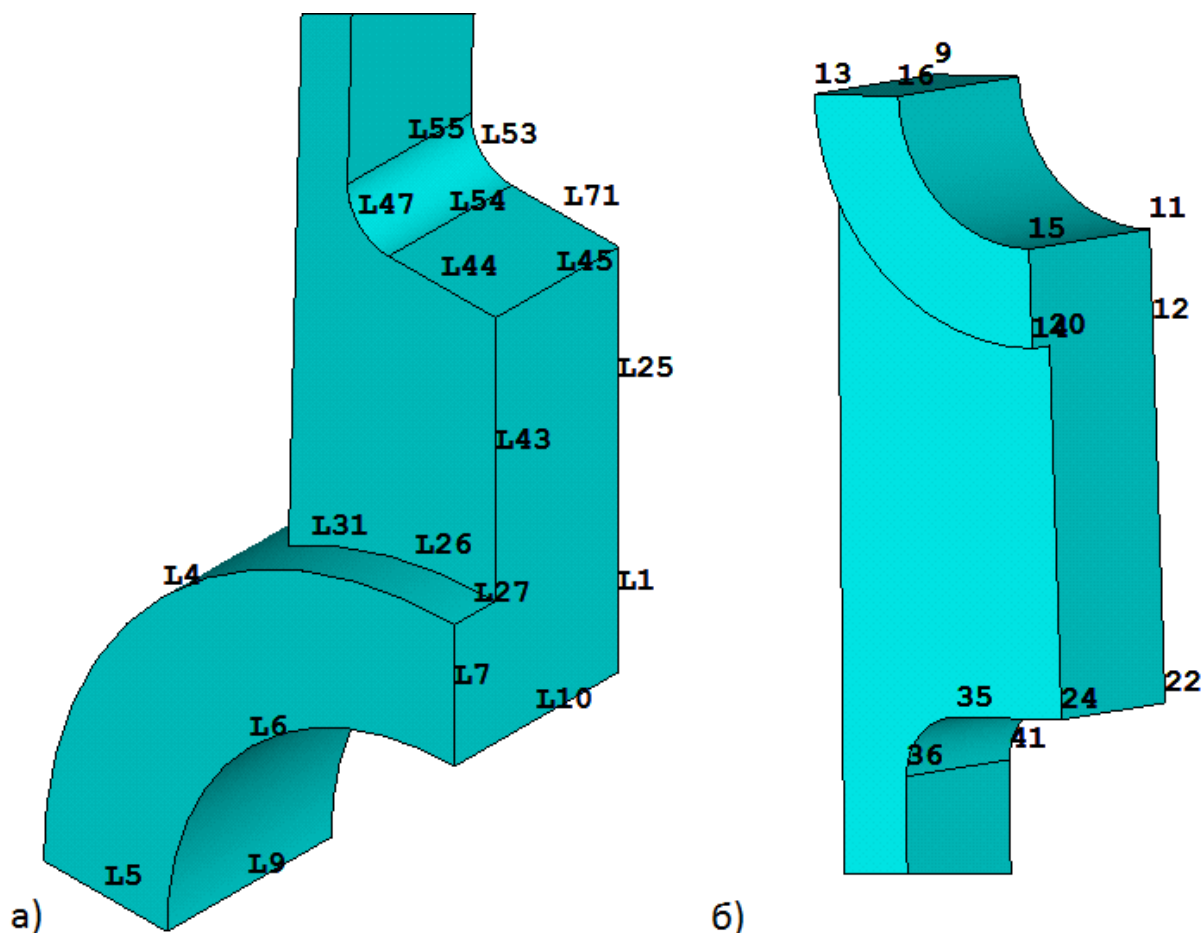


Рисунок 20 – Нумерация линий нижней (а) и нумерация ключевых точек верхней (б) головок шатуна

1.2.7. Решение задачи определения напряженно-деформированного состояния четверти шатуна

Перед запуском решения, ввиду нелинейности задачи (нелинейного поведения материала), следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls* и включить опцию *Large Displacement Static* в раскрывающемся списке *Analysis Options*. Кроме того, необходимо задать количество итераций решения *100* в пункте *Number of substeps* (количество итераций задается для нелинейного или нестационарного анализа), а также включить опцию автоматического подбора временного шага решения, выбрав *On* в раскрывающемся списке *Automatic time stepping*. Если не произвести установку шагов интегрирования задачи, после запуска решения появится информационное сообщение о необходимости задания размера итерации или их количества. Для запуска решения поставленной задачи необходимо воспользоваться пунктом главного меню *Main Menu > Solution > Solve > Current LS* [6, 7]. Все пункты меню, изложенные после таблицы 14 могут быть также описаны с помощью команд APDL (Таблица 15).

Отметим, что в таблице 15 команда № 14 является комментарием, т.к. должна выполняться только после построения дополнительной перемычки между полками стержня шатуна далее в разделе.

Таблица 15 – Код ANSYS APDL для задания материалов, построения разбиения, выбора и приложения нагрузок к геометрической модели четверти шатуна (Таблица 14)

№	Команда
1.	TB, BKIN, 1
2.	MP, EX, 1, EX
3.	MP, NUXY, 1, PRXY
4.	TBDATA, 1, YIELDSTRS, TANGMODS
5.	ET, 1, SOLID45
6.	VSEL, S, VOLUME, , ALL
7.	VATT, 1, , 1
8.	MSHKEY, 0
9.	MSHAPE, 1, 3D
10.	SMRTSIZE, 8
11.	VMESH, ALL
12.	DA, 3, UX, 0
13.	DA, 5, UX, 0
14.	!DA, 20, UX, 0
15.	DA, 1, UZ, 0
16.	DL, 10, , UY, 0
17.	FK, 11, FY, F1
18.	/SOL
19.	TIME, 1
20.	NSUBST, 100
21.	AUTOTS, ON
22.	NLGEOM, ON
23.	SOLVE

1.2.8. Просмотр результатов

С использованием пункта меню утилит *Utility Menu > Plot > Elements* и выбираем наиболее интересную для исследователя часть детали [6, 7], т.е. в данном случае стержень шатуна. После этого ANSYS автоматически отмасштабирует распределение любого указанного исследователем параметра в выбранной ранее локальной зоне исследуемой детали.

Кроме того, для симметричного отображения результатов решения необходимо выбрать пункт меню утилит *Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > Periodic/Cyclic Symmetry...* В окне *Periodic/Cyclic Symmetry Expansion* следует выбрать *Reflect about YZ* [8].

Вызов окна выбора отображаемого физического параметра, вычисляемого в узлах конечно-элементной модели, осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu.* Далее в окне *Contour Nodal Solution Data*, в списке *Item to be contoured* необходимо выбрать требуемый для отображения результат [6, 7].

Вывод, который можно сделать исходя из сделанного расчета (Рисунок 21), что шатун можно облегчить за счет исключения средней стенки в его стержне. При этом наибольшие растягивающие напряжения концентрируются в галтелях стержня шатуна. Однако они существенно меньше задаваемого предела текучести (Таблица 15) и их можно существенно уменьшить, если использовать узкую перемычку.

Предложенная параметрическая модель может быть успешно применена для оптимизации конструкций стержня шатуна по критерию снижения материалоемкости, не только благодаря устранению стенки в стержне, но и выбора толщин боковых полок стержня шатуна, а также радиусов галтелей.

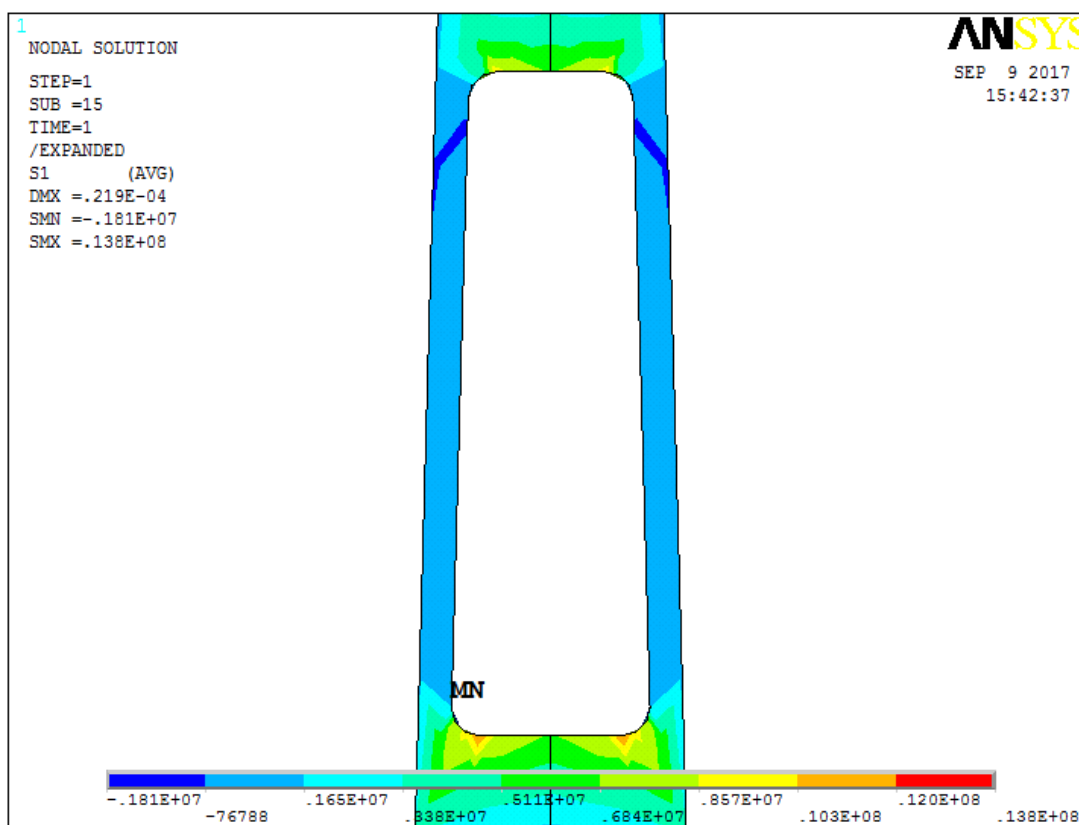


Рисунок 21 – Распределение первого главного напряжения в стержне облегченного шатуна предлагаемой конструкции при его осевом сжатии с включенной опцией *Reflect about YZ* (пункт меню *Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > Periodic/Cyclic Symmetry...*) [9]

1.2.9. Повышение жесткости шатуна с помощью дополнительной локальной перемычки между боковыми полками стержня

Одним из технологически наиболее простых способов увеличения жесткости шатуна предлагаемой конструкции является создание узкой перемычки между боковыми полками стержня. Это конструктивное решение позволит разгрузить галтели и дополнительно сделать более тонкими еще и боковые стенки стержня (Рисунки 13, 22).

Достроим перемычку в твердотельной модели, приведенной в командном коде APDL в таблице 14. Построение перемычки фактически сводится к созданию параллелепипеда с размерами, соответствующими параметрам модели (Таблица 10) и его усечения до размеров, соответствующих размерам стержня шатуна.

Поскольку выполнение всех этих шагов с помощью графического интерфейса ANSYS были подробно рассмотрены ранее и продублированы набором команд, то на этом этапе нет необходимости повторять описание действий и, на взгляд авторов, достаточно привести программный код ANSYS APDL для построения перемычки и галтелей (Рисунок 13), (Таблица 16).

Необходимо отметить, что после команд таблицы 16, как и ранее необходимо выполнить команды таблицы 15, с тем отличием, что в команде № 14 необходимо убрать восклицательный знак (знак комментария). Тогда эта команда определит ограничения на поверхности A20 построенной перемычки.

Результаты вычислений, приведенные на рисунке 22, подтверждают сделанные ранее предположения, т.к. при наличии тонкой перемычки максимальные значения первых главных напряжений уменьшились не менее чем на 15%. Очевидно, что в реальной конструкции они будут еще меньше за счет скругления внешних углов, не учтенных в данной модели.

Таблица 16 – Код ANSYS APDL для создания перемычки в четверти облегченного шатуна (Таблица 14)

№	Команда
1.	BLOCK, -R_VNES_K, 0, R_VNES_K + H_NIZ_P, H_OSEV - R_VNES_PP - H_VERH_P, 0, S_POLKI / 2
2.	VSBA, 1, 29, , DELETE, KEEP
3.	VDELE, 2, , , 1
4.	VADD, ALL
5.	AADD, 13, 27

1.2.10. Построение исходной необлегченной модели шатуна

Хотя раздел посвящен разработке параметрической модели облегченного стержня шатуна, но с методической точки зрения необходимо построить четверть исходной необлегченной модели.

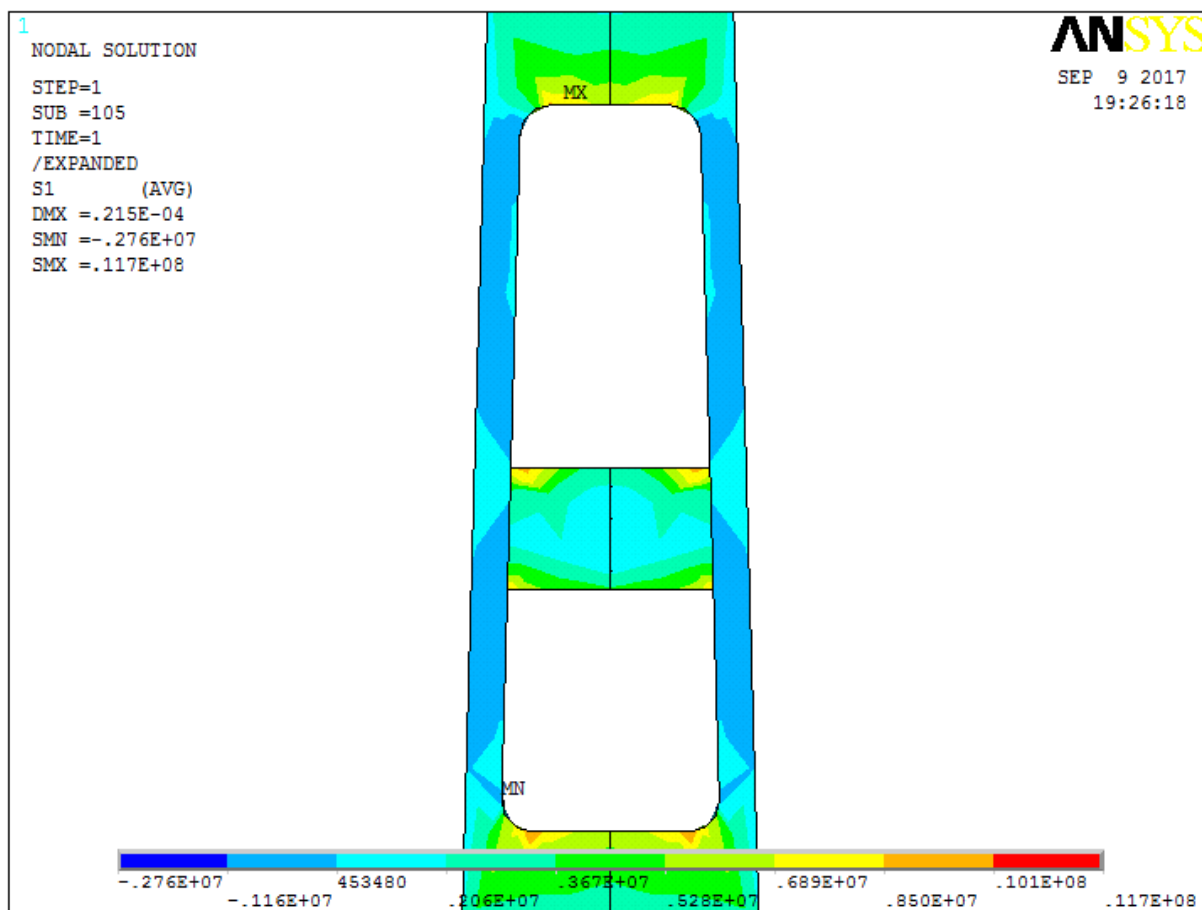


Рисунок 22 – Распределение первого главного напряжения в стержне облегченного шатуна с узкой перемычкой с включенной опцией *Reflect about YZ* (пункт меню *Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > Periodic/Cyclic Symmetry...*) [9]

Таблица 17 – Код ANSYS APDL для создания полной задней стенки в четверти шатуна (Таблица 14)

№	Команда
1.	BLOCK, -R_VNES_K, 0, R_VNES_K, H_OSEV - R_VNES_PP, 0, S_POLKI / 2
2.	VSBV, 1, 4, SEPO, KEEP, KEEP
3.	VDELE, 1, 2, 1, 1
4.	VADD, ALL
5.	AADD, 22, 37
6.	AADD, 21, 32, 20

Тем более что методику построения узкой перемычки легко обобщить на создание всей задней стенки четверти шатуна с той лишь разницей, что перемычка строилась с помощью параллелепипеда меньших размеров, чем высота проема в стержне шатуна, а полная стенка будет строиться с помощью параллелепипеда большего размера, чем проем в стержне шатуна.

Так же, не комментируя уже изученные ранее пункты графического интерфейса и соответствующие команды, приведем в таблице 17 список команд, соответствующих построению задней стенки.

Методические особенности упрощения некоторых геометрических элементов. В ряде случаев построить полностью совпадающую с заданной геометрией деталь сложно. Необходимо прямо написать, что, несмотря на полноту команд ANSYS APDL для построения твердотельных объектов, существуют множественные конфликтные ситуации, при которых исследователь, уже применивший ранее некоторые команды, не сможет их корректно применить вновь из-за специфики местной геометрии детали.

Так в данном примере ранее были построены галтели, а построить еще раз галтели между боковыми полками и стенкой шатунного пальца авторам уже не удалось из-за сложности пути вытягивания.

Поскольку это неоднократно повторяемая проблема на разных задачах, то на взгляд авторов уместно продемонстрировать способ упрощения и приближенного создания геометрии в данном случае внутренних галтелей в стержне.

Заменяем данный геометрический элемент (галтель) созданием вспомогательного призматического объема (Рисунок 23), очевидно, мало чем уступающего по жесткости исходной галтели.

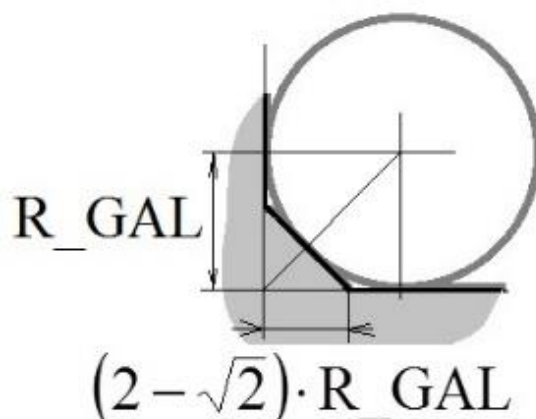


Рисунок 23 – Упрощение внутренних галтелей и замена их равнобедренным прямоугольным треугольником [9]

Для того, чтобы нарисовать равнобедренный прямоугольный треугольник со стороной равной $(2 - \sqrt{2}) \cdot R_GAL$ (Рисунок 23) на первом шаге следует воспользоваться средством рисования галтелей между линиями *LFILLT*. Далее созданная вспомогательная дуга будет удалена, а созданные ключевые точки будут соединены прямой линией, с помощью которой будет создан треугольная поверхность. Именно вытягивание в объем гораздо более простого элемента, как прямоугольный треугольник, позволяет избежать ошибок с дальнейшим объединением объемов и поверхностей модели шатуна. Также, как и ранее, приведем список команд для построения упрощенных галтелей (Таблица 18).

Таблица 18 – Код ANSYS APDL для создания имитации галтели между задней стенкой в четверти шатуна и боковыми полками

№	Команда
1.	LFILLT, 40, 84, (2-SQRT(2))*R_GAL
2.	LDELE, 21
3.	LSTR, 21, 22
4.	AL, 25, 39, 21
5.	VDRAG, 5, , , , , 92, 88, 90, 80, 94
6.	VADD, ALL
7.	AADD, 5, 49, 40

Таким образом, при решении задачи осевого сжатия исходного необлегченного шатуна для построения четверти шатуна можно воспользоваться командами таблиц 10, 14, 17 и 18. Кроме того в таблице 15 необходимо внести следующие коррективы: в команде № 10 необходимо использовать более грубое значение (*SMRTSIZE, 10*), а команды № 13 и № 14, вообще не использовать (Рисунок 24).

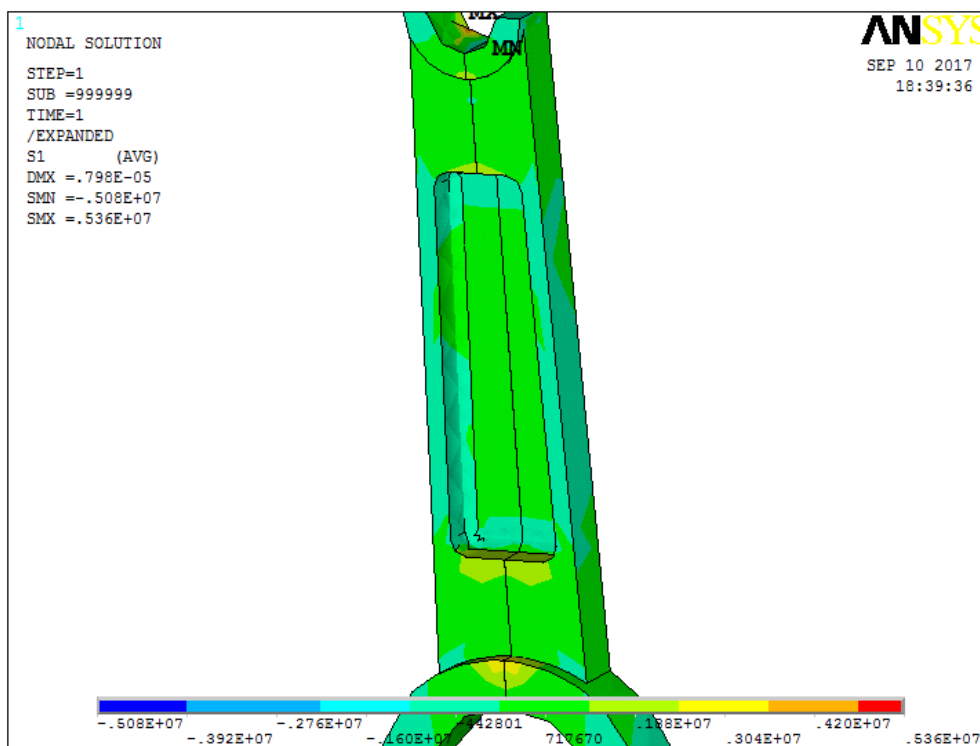


Рисунок 24 – Результаты расчета необлегченной конструкции шатуна с включенной опцией *Reflect about YZ* (пункт меню *Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > Periodic/Cyclic Symmetry...*) [9]

1.2.11. Обсуждение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния шатунов

Предложены две конструкции облегченного стержня шатуна: первая – стержень состоит только из двух боковых полков и вторая, в которой между боковыми полками сделана тонкая перемычка.

Для предлагаемых конструкций разработаны параметрические модели, с помощью которых можно подобрать необходимые геометрические параметры, исходя из напряженного состояния шатунов, указанных конструкций при осевом сжатии. Кроме того, в завершении разработана параметрическая модель стандартного шатуна двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в наиболее общем виде, позволяющая проводить расчеты для существующих необлегченных конструкций данной детали.

Предлагаемая методика демонстрирует возможность редукции полной модели детали к ее четверти с заменой отброшенных частей соответствующими закреплениями и позволяет расчищать напряженно-деформированное состояние шатуна, находящегося под действием осевых нагрузок.

Впервые задача об определении напряженного состояния в стержне шатуна решена в упругопластической постановке с учетом больших перемещений.

Даны полные комментарии к предлагаемым моделям, созданным на основе использования ANSYS 10 ED, что позволяет разобраться в методике построения моделей инженерно-конструкторскому составу.

Использование значений $SMRTSIZE = 3$ или 4 , будет давать необходимую точность при решении данной задачи в коммерческих версиях ANSYS.

1.3. Расчет напряженно-деформированного состояния зубьев в передаче винт-гайка

Передача винт-гайка применяется в конструкциях машиностроения для преобразования вращательного движения в поступательное. При этом одно из звеньев передачи закреплено от осевого перемещения и его вращение вызывает поступательное перемещение другого звена. Такие передачи используются в механизмах управления воздушных и водных судов, в приводах станков, манипуляторов и измерительных машин, а также в различных строительных инструментах [10].

В разделе представлена методика расчета изгибной жесткости зубьев произвольного профиля передачи винт-гайка скольжения с помощью программы конечно-элементного анализа ANSYS 10 ED на примере решения контактной задачи для трапециевидного профиля резьбы. Технический смысл расчета состоит в том, чтобы за счет выбора геометрии профиля зубьев обеспечить полное прилегание их контактирующих рабочих поверхностей и исключить

перераспределение контактных напряжений из-за изгибных деформаций. Кроме того, снижение изгибных деформаций зубьев в передаче винт-гайка при проектировании снизит их склонность к излому.

Таким образом, методика заключается в вычислении первых главных напряжений и контактных давлений, действующих на контактирующих рабочих поверхностях передачи винт-гайка, для определения на их основе оптимальных геометрических параметров зубьев, при которых заданное нагружение передачи, соответствующее эксплуатационному режиму, не приведет к их излому и местному усталостному выкашиванию рабочих поверхностей. При этом предлагаемая методика учитывает возможность применения различных материалов в звеньях передачи винт-гайка.

1.3.1. Краткое описание постановки задачи

Рассматривается осевое сечение передачи винт-гайка, винт которой выполнен из стали, а гайка – из антифрикционной оловянной бронзы. При оценочном решении с учетом ограничений, налагаемых на количество элементов в ANSYS 10 ED, игнорируется наклон резьбы по отношению к осям винта и гайки. При этом допущении задача сводится к взаимодействию осесимметричных зубчатых тел, что позволяет перейти от пространственной задачи для винтовой резьбы к плоской задаче для радиального сечения винта и гайки (Рисунок 25).

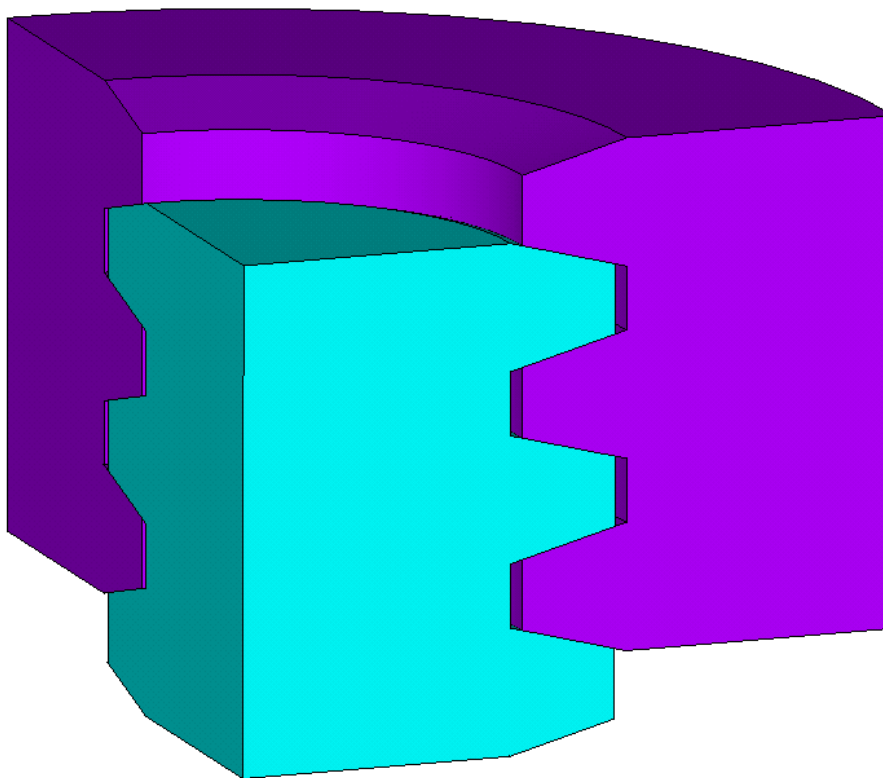


Рисунок 25 – Взаимодействие зубьев в модели передачи винт-гайка

Это несущественное с точки зрения точности вычислений упрощение приводит к большой экономии ресурсов системы и позволяет произвести решение с помощью демонстрационной версии ANSYS 10 ED [3-6]. Кроме того, предполагается, что для демонстрации методики достаточно оставить по три зуба на винте и гайке для получения физически достоверных значений контактных напряжений при взаимодействии зубьев.

Учитывая то, что трапециевидный профиль резьбы передачи обладает пониженным приведенным коэффициентом трения из-за того, что на рабочие поверхности зубьев нанесена смазка, то трением в области контакта модели при решении задачи будем пренебрегать [10].

1.3.2. Построение твердотельной модели радиального сечения передачи винт-гайка

Создание модели будет производиться «снизу вверх», с учетом того, что осью симметрии конструкции является ось OY , и вся модель должна быть построена в первой четверти координатной плоскости XOY [3, 4]. При создании модели все геометрические размеры будут задаваться параметрическим образом. При решении данной задачи будут использоваться размеры профиля $Tr16\times4$ (Рисунок 26), соответствующие ГОСТ 9484–81 [11] и ГОСТ 24737–81 [12].

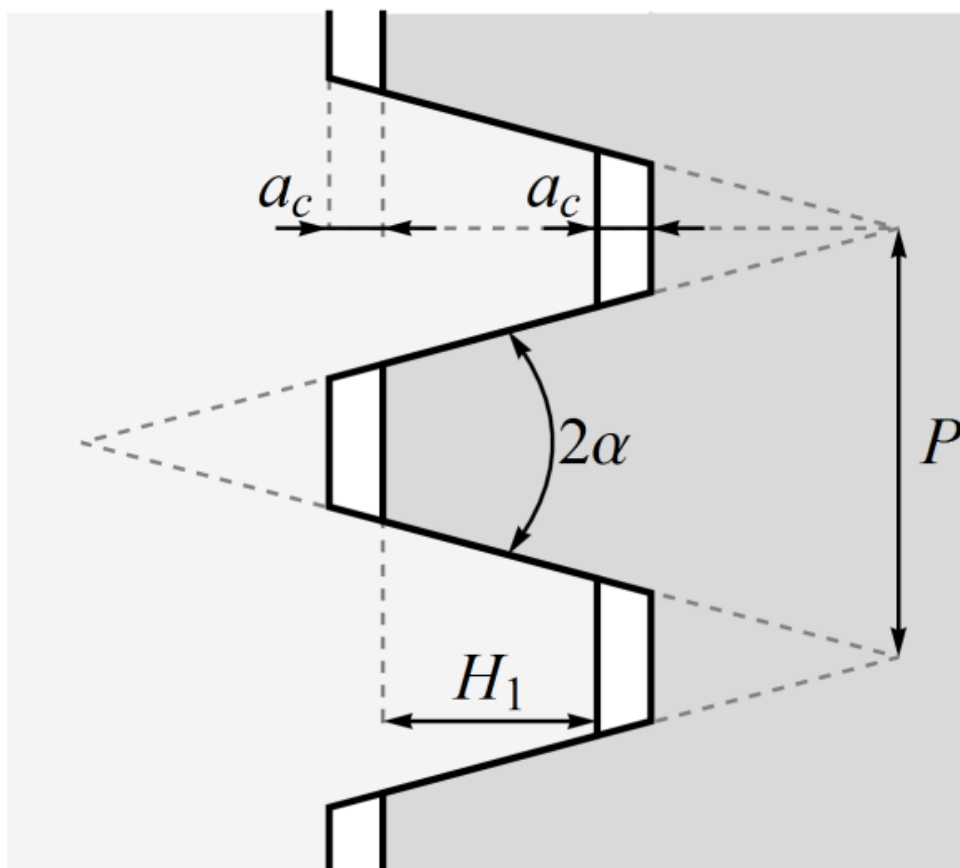


Рисунок 26 – Размеры трапециевидального профиля передачи винт-гайка [13]

Для упрощения построения модели следует произвести смену единиц измерения углов с помощью пункта *Utility Menu > Parameters > Angular Units*. В появившемся окне требуется выбрать *Degrees* в списке *Units for angular-parametric functions*. Далее следует задать параметры, которые будут использоваться при создании модели передачи винт-гайка, воспользовавшись пунктом меню *Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters*. В поле *Selection* появившегося окна следует ввести необходимые параметры (Таблица 19) [13].

Таблица 19 – Физические и геометрические параметры модели [13]

Обозначение и величина параметра	Описание параметра
$E1=2.10E11$	Модуль Юнга стали, $E_{ст}$ (Па)
$NU1=0.29$	Коэффициент Пуассона стали, $\nu_{ст}$
$E2=1.22E11$	Модуль Юнга оловянной бронзы, $E_{бр}$ (Па)
$NU2=0.33$	Коэффициент Пуассона оловянной бронзы, $\nu_{бр}$
$P=4.00E-3$	Шаг резьбы, P (м)
$H1=2.00E-3$	Рабочая высота профиля, H_1 (м)
$AC=0.25E-3$	Зазор по вершине зуба резьбы, a_c (м)
$RV=5.75E-3$	Внутренний радиус винта, R_v (м)
$TG=TAN(15)$	Половина угла профиля, α (°)
$DY=5.00E-7$	Перемещение гайки, Δy (м)
$X0=H1+AC$	Высота зуба резьбы, x_0 (м)
$Y0=X0*TG$	Полуразность основания и вершины зуба, y_0 (м)
$H0=P/2-H1*TG$	Вершина зуба резьбы, h_0 (м)
$RG=RV+X0+AC$	Внутренний радиус модели гайки, R_r (м)

На первом шаге производится построение ключевых точек модели передачи винт-гайка. В данном случае ключевыми точками являются угловые точки сечения модели зуба винта, а также точки, лежащие на оси симметрии сечения. Создание ключевых точек осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS*. В окне *Create Keypoints in Active Coordinate System*, необходимо ввести номера и координаты точек в полях *Keypoint number* и *X, Y, Z Location in active CS* (Таблица 20) [13].

На втором шаге производится построение поверхности радиального сечения модели зуба винта. Поскольку границы создаваемого сечения являются прямыми линиями, ANSYS позволяет создавать поверхность сразу по ключевым точкам, не производя построение ограничивающих ее линий. Линии будут созданы автоматически при создании поверхности с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs*. Указание точек модели зуба следует производить только в одном направлении обхода области (по/против часовой стрелки, например, 1, 2, 3, 4) [13].

Таблица 20 – Ключевые точки радиального сечения модели зуба винта [13]

№	X-Loc (м)	Y-Loc (м)
1	RV	0
2	RV+X0	Y0
3	RV+X0	Y0+H0
4	RV	2*Y0+H0
13	0	2*(P+Y0)+H0
14	0	0

Третьим шагом является копирование поверхности, определяющей сечение модели зуба, два раза со сдвигом в шаг резьбы P вдоль оси OY . Для этого используется пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Areas*. В появившемся окне следует указать количество копий (включая оригинал) 3 в поле *Number of copies – including original* и шаг копирования P (м) в поле *Y-offset in active CS* [13].

Следующим шагом является создание поверхности радиального сечения модели тела винта. После использования пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs*, следует последовательно указать точки, лежащие на внутреннем радиусе на оси симметрии сечения модели винта. Проводить выбор точек необходимо только в одном направлении обхода области (по/против часовой стрелки, например, 1, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 14) (Рисунок 27) [13].

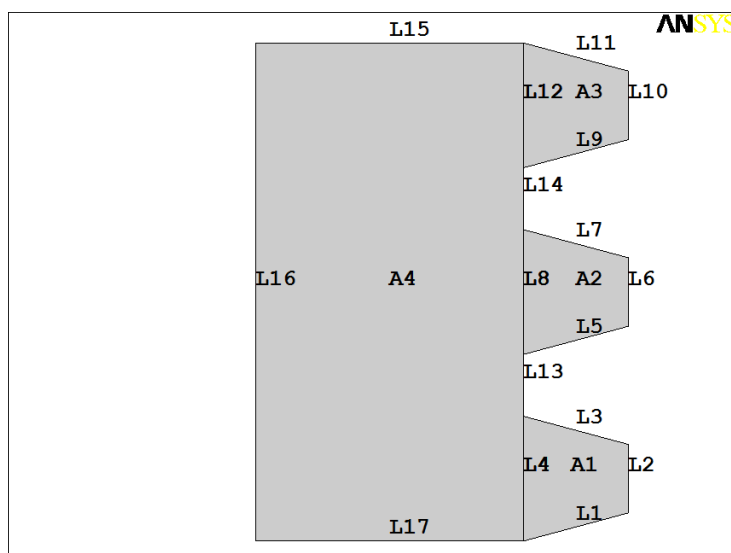


Рисунок 27 – Радиальное сечение модели винта [13]

На четвертом шаге производится построение поверхности радиального сечения модели гайки, толщина тела которой предполагается равной внутреннему радиусу тела винта R_g . Для этого требуется произвести отражение поверхностей, соответствующих модели винта, относительно плоскости $Y-Z$, используя пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas*, в

списке с меткой *MOVE* следует указать, что поверхности копируются (Рисунок 28) [13].

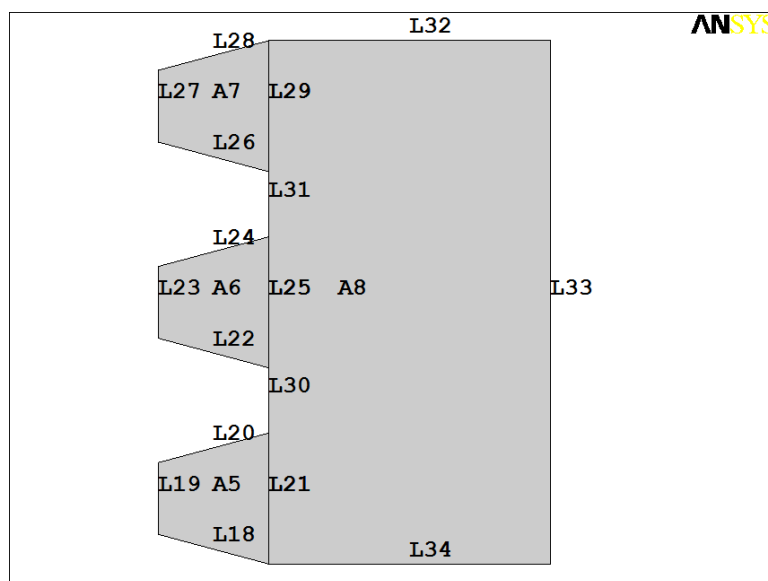


Рисунок 28 – Радиальное сечение модели гайки [13]

Новые поверхности необходимо переместить вдоль оси *OX* на величину суммы внутренних радиусов винта R_6 и гайки R_2 , вдоль оси *OY* на половину шага резьбы $P/2$ с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move / Modify > Areas > Areas*. Для этого в появившемся окне следует указать количество копий (включая оригинал) 1 в поле *Number of copies – including original* и шаги копирования $RV + RG$ (m) и $P/2$ (m) в полях *X-offset in active CS* и *Y-offset in active CS*, соответственно. Очевидно, что вращением вокруг оси *OY* можно получить объемную модель передачи в пределах принятых геометрических упрощений [13].

1.3.3 Выбор типа задачи, указание свойств материалов модели и построение упорядоченного разбиения

В соответствии с логикой организации главного меню, выбор типа решаемой задачи следует выполнять на первом шаге перед подготовкой геометрической модели. Однако практика работы в ANSYS 10 ED с дополнительными модулями, такими как LS-DYNA или FLOTRAN, показывает, что выбор тип решаемой задачи лучше производить после подготовки всей геометрии модели. Для этого необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preferences...* и в окне *Preferences for GUI Filtering* указать *Structural* [13].

При решении данной задачи будут использоваться линейно упругие материалы: сталь для модели винта и антифрикционная оловянная бронза для модели гайки (Таблица 21) [10]. Для создания двух моделей материалов необходимо с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor >*

Material Props > *Material Models* вызвать окно *Define Material Model Behavior*. Используя пункты верхнего раскрывающегося меню и разделы библиотеки доступных материалов *Material Models Available* (справа в общем окне *Define Material Model Behavior*), требуется указать физические характеристики двух разных материалов, перечисление и конкретные значения которых заносятся в левое окно *Material Models Defined* общего окна *Define Material Model Behavior* [13].

В окне *Define Material Model Behavior* «по умолчанию» доступен один материал *Material Number 1* (отображается в левом окне и подсвечивается курсором). В правом окне с помощью пункта *Define Material Model Behavior* > *Material Models Available* > *Structural* > *Linear* > *Elastic* > *Isotropic* отмечается, что материал является линейно упругим, и в появившемся окне *Linear Isotropic Properties for Material Number 1* требуется ввести необходимые значения упругих констант стали (Таблица 19): модуль Юнга $E1$ ($Па$) в поле с меткой EX и коэффициент Пуассона $NU1$ в поле с меткой $NUXY$, а затем нажать *OK* [13].

Далее, вернувшись в общее окно *Define Material Model Behavior*, для добавления второго материала необходимо использовать пункт меню *Define Material Model Behavior* > *Material* > *New Model*. После подтверждения, что номер добавляемого материала следует оставить «по умолчанию» (т.е. 2), можно выбрать еще одну модель поведения материала с другими характеристиками. В данном случае материал также будет линейно упругий (это указывается через пункт меню *Define Material Model Behavior* > *Material Models Available* > *Structural* > *Linear* > *Elastic* > *Isotropic*) с упругими константами, которые соответствуют оловянной бронзе (Таблица 19): модулем Юнга $E2$ ($Па$) и коэффициентом Пуассона $NU2$. Их следует ввести в появившемся окне *Linear Isotropic Properties for Material Number 2* в полях EX и $NUXY$, соответственно, а затем нажать *OK* [13].

Выбор типа элемента для разбиения модели. Поскольку поставленная задача соответствует структурному анализу, следует выбрать тип элементов *Structural Solid* и элементы *Quad 4node 182*. Выбор производится при использовании пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete* после нажатия кнопки *Add* в окне *Element Types*. После этого в окне *Element Types* следует нажать кнопку *Options* и в списке *Element Behavior* включить опцию *Axisymmetric*, затем нажать *OK* и закрыть окно [13].

Назначение атрибутов поверхностям модели. В ANSYS под атрибутами геометрических компонентов модели понимаются номера материала *Material number* (различается для моделей винта и гайки), типа элементов *Element type number* (одинаков для всех компонент модели), набора *Real constant set number* и сечения *Element section* (не используются). Перечисленный набор атрибутов присваивается каждой компоненте геометрической модели отдельно с помощью пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh Attributes* > *Picked Areas*. В появившемся меню необходимо выбрать поверхности, соответствующие сечению модели винта ($A1, A2, A3, A4$), а затем нажать *OK* (Рисунок 27). В окне *Area Attributes* все

значения следует оставить «по умолчанию» и нажать *Apply*. Затем требуется выбрать поверхности, соответствующие сечению модели гайки (A5, A6, A7, A8), нажать *OK* и в окне *Area Attributes* в списке *Material number* сменить номер материала на 2 (Рисунок 28) [13].

Построение упорядоченного разбиения модели. Для построения упорядоченного разбиения модели необходимо произвести конкатенацию нескольких линий (логическое объединение) с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Lines*. Используя появившееся меню, следует выбрать линии, лежащие на внутреннем радиусе сечения модели винта (L4, L8, L12, L13, L14), а затем нажать *Apply* (Рисунок 27). Далее необходимо произвести выбор линий, лежащих на внутреннем радиусе сечения модели гайки (L21, L25, L29, L30, L31), и нажать *OK* (Рисунок 28) [13].

Для задания размера разбиения поверхностей необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Areas > All areas* и в появившемся окне указать длину стороны элемента $(P-2*Y0-H0)/4$ (м), что соответствует разбиению линий, моделирующих впадины резьбы, на четыре части. Поскольку при решении контактной задачи может использоваться более грубая сетка вдали от области контакта, ввиду наличия ограничения на количество элементов в ANSYS 10 ED, следует уменьшить линейный размер элемента в радиальном направлении для поверхностей, моделирующих сечения тел винта и гайки. Для этого, используя пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Lines > Picked Lines*, требуется выбрать линии сечения моделей винта и гайки, которые лежат перпендикулярно оси симметрии модели гайки (например, L15 и L32), а затем в окне *Element Size on Picked Lines* в поле *No of element divisions* указать количество делений 6 (Рисунки 27, 28) [13].

После выполнения вышеперечисленных действий сечение модели передачи готово к построению упорядоченного разбиения с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided*. При использовании данного пункта меню появится окно *Mesh Areas*, в котором с помощью кнопки *Pick All* следует указать, что будет производиться разбиение всей модели целиком (Рисунок 29) [13].

После построения разбиения следует удалить конкатенацию линий с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Del Concats > Lines*. При появлении меню выбора необходимо нажать *Pick All*.

Используя пункт меню *Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > 2D Axi-Symmetric...*, выбрав в появившемся окне размер расширения, можно увидеть, каким образом работает опция *Axisymmetric* для элементов *Quad 4node 182* (Рисунок 29). Для возвращения к исходному плоскому виду необходимо нажать *No Expansion* [13].

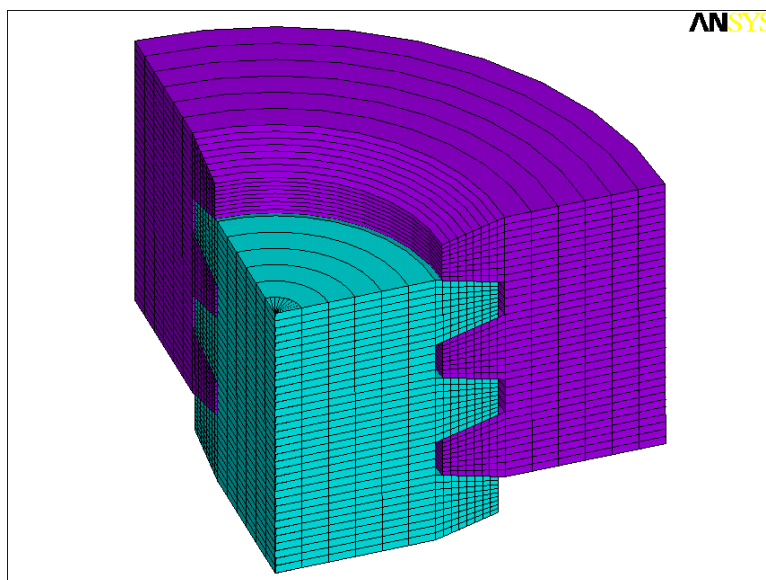


Рисунок 29 – Упорядоченное разбиение модели передачи винт-гайка [13]

1.3.4. Назначение граничных условий.

Задание краевых условий на модель передачи винт-гайка следует начать с простейших ограничений. Во-первых, необходимо закрепить сечение модели винта по оси симметрии (в данном случае запретить его перемещение вдоль оси OY) и, во-вторых, назначить ненулевое перемещение внешней границы модели гайки в осевом направлении (в данном случае задать перемещение в отрицательном направлении оси OY). Для этого следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Displacement > On Lines*. Для задания первого граничного условия требуется выбрать линии сечения модели гайки, которые лежат перпендикулярно ее оси симметрии ($L15$ и $L17$), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку UY , в поле *VALUE* задать величину перемещения 0 (m) и нажать кнопку *Apply* (Рисунок 27). После этого для задания второго граничного условия следует выбрать линии сечения модели винта, лежащие перпендикулярно оси симметрии сечения модели гайки ($L32$ и $L34$), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку UY и в поле *VALUE* задать величину перемещения $-DY$ (m) [13].

Одним из самых сложных типов краевых условий в структурной механике является создание контактных пар между взаимодействующими поверхностями твердых тел. При создании контактных пар в двумерном случае необходимо задать линии внедрения и контактные линии. Линиями внедрения в данном случае являются верхние линии сечения моделей зубьев резьбы гайки ($L3$, $L7$, $L11$), контактными линиями являются нижние линии сечения моделей зубьев резьбы винта ($L18$, $L22$, $L26$) (Рисунки 27, 28). Для создания контактной пары необходимо запустить *Contact Manager* с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Contact Pair*, нажать кнопку *Contact Wizard* и с ее помощью запустить мастер создания контактных пар. В первом появившемся окне следует оставить все опции «по умолчанию»

(поверхность внедрения является линией), нажать кнопку *Pick Target*, выбрать линии внедрения (*L3, L7, L11*), подтвердить выбор нажатием кнопки *OK*, а затем перейти к следующему окну мастера нажатием *Next* (Рисунок 27). В новом окне мастера следует оставить все опции «по умолчанию» (поверхность и область контакта являются линиями), нажать кнопку *Pick Contact*, выбрать контактные линии (*L18, L22, L26*), подтвердить выбор нажатием *OK*, и перейти к следующему окну с помощью кнопки *Next* (Рисунок 28). В последнем окне необходимо также оставить все настройки «по умолчанию» (не создавать симметричный контакт ввиду ограничения на количество элементов в ANSYS 10 ED, учитывать начальное внедрение, пренебрегать трением, а также другие опции в разделе *Optional settings*) и создать контактную пару нажатием кнопки *Create*. После этого в окне ANSYS Graphics будут отображены созданные контактные элементы. Вообще говоря, в качестве контактирующих поверхностей следует указывать обе боковые поверхности сечения моделей зубьев резьбы, однако это приводит к превышению ограничения на количество элементов в учебной версии ANSYS 10 ED [13].

1.3.5. Решение задачи и просмотр результатов

Перед запуском решения, ввиду нелинейности задачи, следует воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls* и включить опцию *Large Displacement Static* в раскрывающемся списке *Analysis Options*. Кроме того, необходимо задать количество итераций решения *100* в пункте *Number of substeps* (количество итераций задается для нелинейного или нестационарного анализа), а также включить опцию автоматического подбора временного шага решения, выбрав *On* в раскрывающемся списке *Automatic time stepping* [13].

Если не произвести установку шагов интегрирования задачи, после запуска решения появится информационное сообщение (предупреждение) о необходимости задания размера итерации или их количества. Для запуска решения поставленной задачи необходимо воспользоваться пунктом главного меню *Main Menu > Solution > Solve > Current LS* [13].

Для отображения результатов решения в осесимметрично расширенной модели передачи винт-гайка необходимо воспользоваться пунктом меню *Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > 2D Axi-Symmetric...* и выбрать в появившемся окне размер расширения. Для возвращения к исходному виду необходимо нажать *No Expansion*. Вызов окна выбора отображаемого физического параметра, вычисляемого в узлах конечно-элементной модели, осуществляется с помощью пункта главного меню *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*. Далее в появившемся окне *Contour Nodal Solution Data*, в списке *Item to be contoured* необходимо выбрать требуемый для отображения результат [13].

Для отображения первых главных напряжений – одного из основных параметров для расчета прочности деталей – следует выбрать *Nodal Solution >*

Stress > *1st Principal Stress* (Рисунок 30). Для отображения контактных давлений необходимо выбрать пункт *Nodal Solution* > *Contact* > *Contact Pressure* (Рисунок 31) [13].

Ниже приведен код APDL (Таблица 21) [13], с помощью которого можно получить решение задачи при различных значениях физических и геометрических параметров модели (Таблица 19) [13].

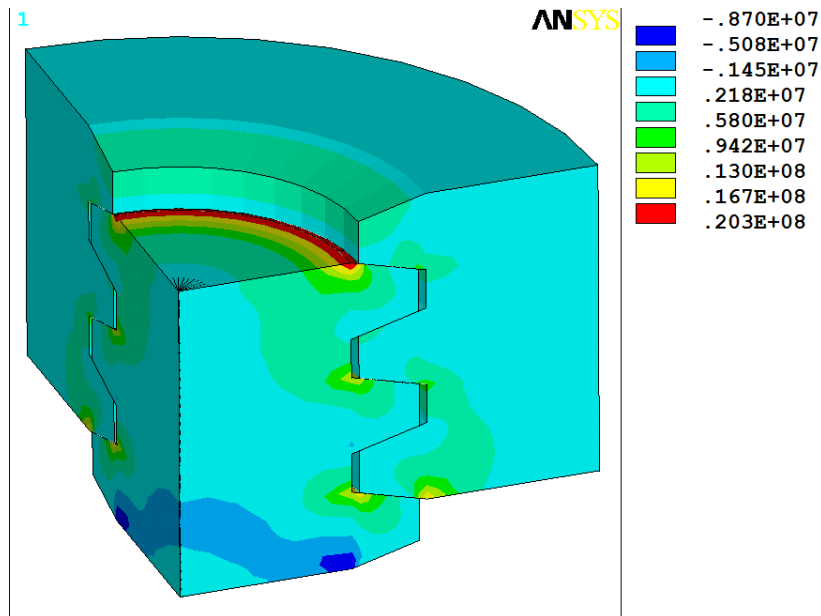


Рисунок 30 – Распределение первых главных напряжений в модели передачи винт-гайка [13]

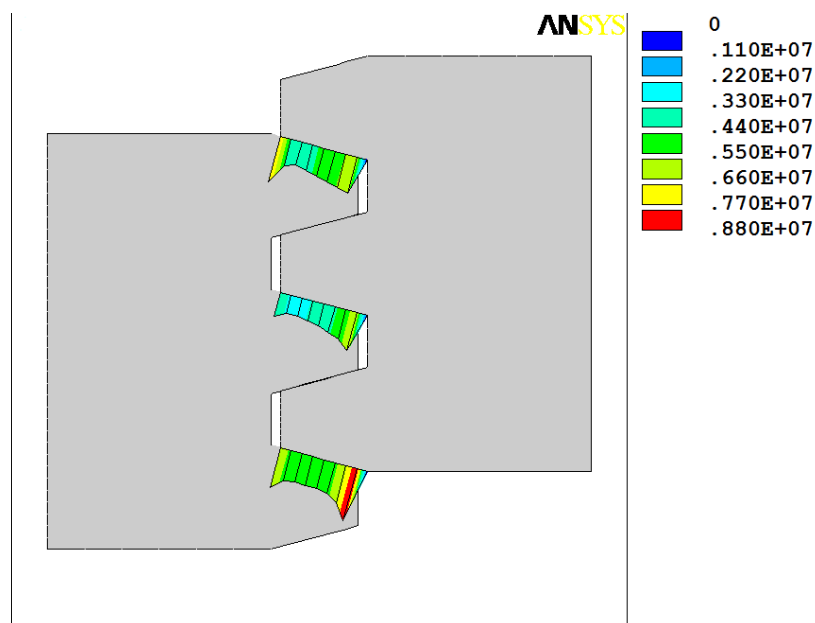


Рисунок 31 – Распределение контактных давлений в сечении модели передачи винт-гайка [13]

Таблица 21 – Программный код ANSYS APDL для решения поставленной задачи [13]

№	Команда	№	Команда
1.	*AFUN,DEG	46.	LSEL,A,LOC,X,RG+RV/2
2.	E1=2.10E11	47.	LESIZE,ALL,,,6
3.	NU1=0.29	48.	MSHKEY,1
4.	E2=1.22E11	49.	AMESH,ALL
5.	NU2=0.33	50.	LSEL,S,LCCA
6.	P=4.00E-3	51.	LDELE,ALL
7.	H1=2.00E-3	52.	LSEL,S,LOC,X,RV/2
8.	AC=0.25E-3	53.	DL,ALL,,UY,0
9.	RV=5.75E-3	54.	LSEL,S,LOC,X,RG+RV/2
10.	TG=TAN(15)	55.	DL,ALL,,UY,-DY
11.	DY=5.00E-7	56.	ALLSEL,ALL
12.	X0=H1+AC	57.	MP,MU,1,0
13.	Y0=X0*TG	58.	MAT,1
14.	H0=P/2-H1*TG	59.	ET,2,TARGE169
15.	L0=2*(P+Y0)+H0	60.	ET,3,CONTA172
16.	RG=RV+X0+AC	61.	KEYOPT,3,5,1
17.	/PREP7	62.	KEYOPT,3,9,0
18.	K,1,RV,0	63.	KEYOPT,3,10,2
19.	K,2,RV+X0,Y0	64.	LSEL,S,LOC,Y,3*Y0/2+H0
20.	K,3,RV+X0,Y0+H0	65.	LSEL,A,LOC,Y,3*Y0/2+H0+P
21.	K,4,RV,2*Y0+H0	66.	LSEL,A,LOC,Y,3*Y0/2+H0+2*P
22.	K,13,0,2*(P+Y0)+H0	67.	CM,_TARGET,LINE
23.	K,14,0,0	68.	TYPE,2
24.	A,1,2,3,4	69.	NSLL,S,1
25.	AGEN,3,ALL,,,0,P,0,,1,0	70.	ESLN,S,0
26.	A,1,4,5,8,9,12,13,14	71.	ESURF
27.	ARSYM,X,ALL,,,1,0	72.	LSEL,S,LOC,Y,Y0/2+P/2
28.	AGEN,1,5,8,,RV+RG,P/2,0,,1,1	73.	LSEL,A,LOC,Y,Y0/2+3*P/2
29.	MP,EX,1,E1	74.	LSEL,A,LOC,Y,Y0/2+5*P/2
30.	MP,NUXY,1,NU1	75.	CM,_CONTACT,LINE
31.	MP,EX,2,E2	76.	TYPE,3
32.	MP,NUXY,2,NU2	77.	NSLL,S,1
33.	ET,1,PLANE182	78.	ESLN,S,0
34.	KEYOPT,1,3,1	79.	ESURF
35.	ASEL,S,AREA,,1,4	80.	CMDEL,_TARGET
36.	AATT,1,,1	81.	CMDEL,_CONTACT
37.	ASEL,S,AREA,,5,8	82.	ALLSEL,ALL
38.	AATT,2,,1	83.	FINISH
39.	LSEL,S,LOC,X,RV	84.	/SOL
40.	LCCAT,ALL	85.	TIME,1
41.	LSEL,S,LOC,X,RG	86.	NSUBST,100
42.	LCCAT,ALL	87.	AUTOTS,ON
43.	ALLSEL,ALL	88.	NLGEOM,ON
44.	AESIZE,ALL,(P-2*Y0-H0)/4	89.	SOLVE
45.	LSEL,S,LOC,X,RV/2	90.	--

1.3.6. Обсуждение результатов моделирования

Предложена методика определения прочности и износостойкости передачи скольжения винт-гайка на основе решения контактной задачи для ее радиального сечения с учетом различия материалов деталей передачи [13].

В качестве примера представлено решение задачи для трапециевидного профиля резьбы, методически разобраны все основные особенности решения данной задачи в ANSYS 10 ED, а также представлен параметризованный код APDL, позволяющий выбирать оптимальные геометрические параметры передачи и механические параметры ее деталей с точки зрения долговечности.

Методика может найти широкое применение в проектных организациях, занимающихся разработкой данного типа механизмов.

1.4. Определение изменения осевых размеров сферических линз при обжатию в цанге для двустороннего шлифования

Важной задачей научно-технического прогресса является повышение производительности и точности обработки изделий путем разработки и внедрения прогрессивных технологических процессов [14-16]. В связи с этим особую актуальность приобретают применение новых и перспективных методов обработки, дающих возможность выпускать детали более высокого качества [15-17].

Прогрессивной в настоящее время считается технология одновременной двусторонней обработки деталей [18-23]. Однако возникает ряд сложностей, снижающих точность выполнения данной операции. Решению данных проблем посвящены в настоящее время многие работы [24-27].

Так, например, при реализации технологии двустороннего шлифования сферических линз заготовки крепятся за боковую нерабочую поверхность [28, 29] с помощью обжимающего приспособления. При этом происходит изменение размеров линз в осевом направлении, что объясняется наличием ненулевого коэффициента Пуассона у их материалов. Соответственно при изготовлении возможно значительное нарушение геометрии линз.

До настоящего времени в оптическом приборостроении предложена только первичная упрощенная методика определения величины осевой деформации линз при их закреплении за боковую поверхность посредством цанги при обработке [28, 29]. Кроме того, в ней используется ряд допущений, которые существенно сужают точность получаемых результатов.

Так, например, линзы крепятся в цанге не непосредственно, а с использованием промежуточной полимерной цилиндрической прокладки. Однако в предыдущих публикациях [28, 29] не обсуждается влияние ни размеров этой прокладки, ни ее положения на линзе на результаты обжатия, т.е. искривления шлифуемой поверхности линзы. Кроме того, даже не приводятся ее

упругие характеристики. Следует отметить также несколько неудачное задание краевых условий в работах [28, 29] при обжати линзы через давление, хотя логичнее было бы задать условие через заданное радиальное перемещение.

Более того уровень изложения в [28, 29] методики решения этой технологически важной и интересной задачи фактически не позволяет другим исследователям применить ее на практике самостоятельно.

В данном разделе впервые приводятся параметрические модели расчета напряженно-деформированного состояния двояковогнутой, вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой линз, приводятся листинги моделей, и любой исследователь может самостоятельно выполнить расчеты деформированных сферических поверхностей линз в зависимости от заданных технологических параметров обжатия, механических свойств материалов линзы и прокладки, а также геометрического положения последней.

Необходимо отметить, что в данном исследовании двояковыпуклые линзы не рассматриваются, т.к. в силу особенности их геометрии осевые изменения в центре при обжати цангой будут незначительными [28].

1.4.1. Постановка задачи

При моделировании линз предполагается, что их материал является изотропным и линейно упругим. Кроме того, изотропным и линейно упругим является материал полимерной прокладки.

Задача для любых типов линз является осесимметричной. Соответственно ее решение строится для плоского радиального сечения системы «линза-пластиковая цилиндрическая прокладка». Ось линз совпадает с осью OY . Моделирование радиального сечения сферических линз по требованиям ANSYS выполняется в плоскости XOY [3-5]. Уже после решения задачи ее результаты можно просмотреть средствами постпроцессинга ANSYS в объеме [30].

В данном разделе использовались следующие геометрические параметры решаемой задачи: H – толщина линзы в центре (м), $R0$ – радиус определяющий размер линзы в плоскости, перпендикулярной оси (м), $R1$ и $R2$ – радиус верхней и нижней сферических поверхностей линзы (м). Будем рассматривать вспомогательную плоскость, проходящую перпендикулярно оси линзы через нижний край линзы (Рисунки 32, 33). Тогда $H1$ – это высота от нижнего края линзы до нижнего края полимерной прокладки (м), а $H2$ – высота самой прокладки (м), S – толщина прокладки (м) (Рисунки 32, 33) [30].

Кроме того использовались физические параметры модели: $EX1$, $EX2$ – модули упругости (Па) материалов линзы и прокладки соответственно; $PRXY1$, $PRXY2$ – коэффициенты Пуассона материалов линзы и прокладки соответственно (Таблица 22) [30].

Не ограничивая общность построенной модели, для проведения численного эксперимента предполагалось, что линза выполнена из стекла ЛК 8, а прокладка из полиэтилена (Таблица 22) [30].

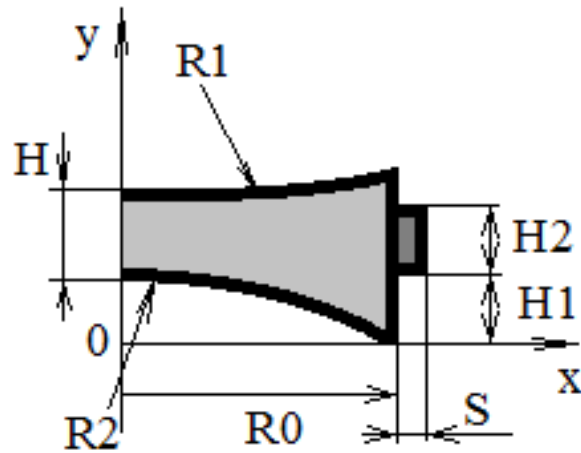


Рисунок 32 – Схема геометрических параметров радиального сечения двояковогнутой линзы [30]

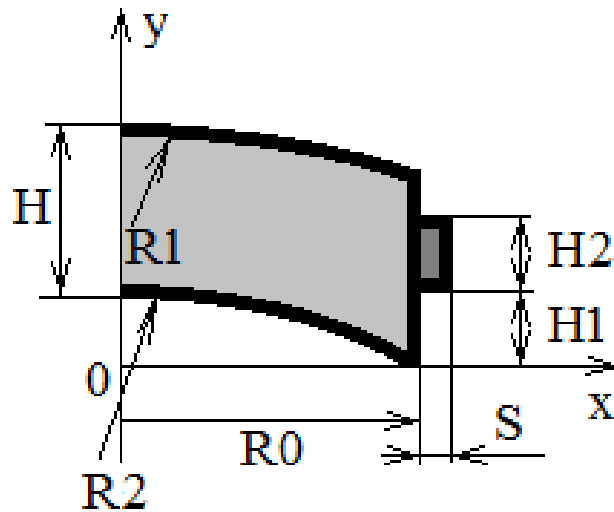


Рисунок 33 – Схема геометрических параметров радиального сечения вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой линз [30]

Таблица 22 – Механические характеристики линзы и прокладки

Материалы	Модуль упругости (Па)	Коэффициент Пуассона
Стекло ЛК 8 [28]	69 790 Е6	0.184
Полиэтилен	700 Е6	0.44

1.4.2. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения двояковогнутой линзы

Команды, выбирающие тип элемента и задающие значения геометрических параметров, а также список команд построения геометрии рассматриваемой модели приведены в таблице 23.

Команда № 1 (Таблица 23) – вход в препроцессор.

Команды № 2, 3 (Таблица 23) производят выбор двумерного элемента текущей среды *PLANE42* с опцией осесимметричности задачи относительно Y-оси.

Команды № 5-10 (Таблица 23) устанавливают значения используемых геометрических параметров.

Команды № 11-36 (Таблица 23) производят построение радиального сечения линзы с прокладкой посредством создания ключевых точек и рисования окружностей (команды № 11-14, Таблица 23), удаление вспомогательных линий и ключевых точек (команды № 15-17, Таблица 23), создание еще одной пары вспомогательных ключевых точек для создания внешней границы сечения линзы (команды № 18, 19, Таблица 23) и построения двух прямых линий (команды № 20, 21, Таблица 23).

Команда № 24 (Таблица 23) завершает построение границы радиального сечения линзы.

С помощью команд № 25 и 26 (Таблица 23) выполняется вспомогательная операция. Дуги, соответствующие верхней и нижней границе радиального сечения линзы, делятся на 5 равных частей, каждая для того, чтобы в дальнейшем повысить точность построенной геометрии сечения, а также точность построения разбиения и вычисляемых результатов.

Команда № 27 (Таблица 23) удаляет лишние линии.

С помощью команды № 28 (Таблица 23) создается твердотельная поверхность, соответствующая плоскому сечению линзы.

Командой № 29 (Таблица 23) осуществляется перенос сечения линзы вдоль оси OY так, чтобы все сечение находилось в первой четверти координатной плоскости XOY и соответствовала рисунку 32.

Далее с помощью команд № 30-35 (Таблица 23) строится радиальное прямоугольное сечение полимерной цилиндрической прокладки.

Команда № 36 (Таблица 23) – вспомогательная перерисовка отображения сечения после переноса.

1.4.3. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой линз

Описание команд таблицы 24 построения новой твердотельной модели в командах с № 1 по 26 полностью соответствует предыдущему случаю, поэтому чтобы не повторяться перейдем к комментированию отличий таблицы 24 от таблицы 23.

Таблица 23 – Код построения геометрии модели радиального сечения двояковогнутой линзы с полимерной цилиндрической прокладкой [30]

№	Команда	№	Команда
1.	/PREP7	19.	K, 6, R0, -R2
2.	ET, 1, PLANE42	20.	LSTR, 5, 8
3.	KEYOPT, 1, 3, 1	21.	LSTR, 1, 6
4.	R0 = 0.03	22.	LSBL, 4, 2, , DELETE, KEEP
5.	R1 = 0.05	23.	LSBL, 5, 2, , DELETE, KEEP
6.	R2 = 0.06	24.	LSTR, 3, 4
7.	H = 0.005	25.	LDIV, 6, , , 5, 0
8.	H1 = 0.01	26.	LDIV, 7, , , 5, 0
9.	H2 = 0.005	27.	LDELE, 2, 4, 1, 1
10.	S = 0.001	28.	AL, ALL
11.	K, 1, 0, H+R1	29.	AGEN, 1, 1, , , , R2-SQRT(R2*R2-R0*R0), , , , 1
12.	CIRCLE, 1, R1, , , , 4	30.	K, 1, R0+S, H1
13.	K, 6, 0, -R2	31.	K, 2, R0+S, H1+H2
14.	CIRCLE, 6, R2, , , , 4	32.	LANG, 5, 1, 90, , 0.1
15.	LDELE, 1, 3, 1, 1	33.	LANG, 5, 2, 90, , 0.1
16.	LDELE, 6, 8, 1, 1	34.	LSTR, 1, 2
17.	KDELE, 1, 6, 5	35.	AL, 3, 4, 16, 17
18.	K, 1, R0, R1+H	36.	APLOT

С помощью команды № 27, 28 (Таблица 24) выполняется удаление вспомогательных линий. В данном случае используется две команды, поскольку номера удаляемых линий идут с пропуском.

С помощью команда № 29 (Таблица 24) создается твердотельная поверхность, соответствующая плоскому сечению.

Командой № 30 (Таблица 24) осуществляется перенос сечения линзы вдоль оси OY так, чтобы все сечение находилось в первой четверти координатной плоскости XOY и соответствовало рисунку 33.

Далее с помощью команд № 31-36 (Таблица 24) строиться радиальное прямоугольное сечение полимерной цилиндрической прокладки.

1.4.4. Задание констант материалов, построение упорядоченного разбиения модели, назначение краевых условий и решение поставленных задач

Необходимость построения упорядоченного конечноэлементного разбиения модели диктуется требованием получить качественное решение рассматриваемых задач, а также ограничениями на количество используемых элементов в ANSYS 10 ED.

Таблица 24 – Код построения геометрии модели радиального сечения вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой линз с полимерной прокладкой [30]

№	Команда	№	Команда
1.	/PREP7	19.	K, 6, R0, -R2
2.	ET, 1, PLANE42	20.	LSTR, 3, 8
3.	KEYOPT, 1, 3, 1	21.	LSTR, 1, 6
4.	R0 = 0.03	22.	LSBL, 1, 3, , DELETE, KEEP
5.	R1 = 0.05	23.	LSBL, 5, 3, , DELETE, KEEP
6.	R2 = 0.06	24.	LSTR, 4, 5
7.	H = 0.005	25.	LDIV, 6, , , 5, 0
8.	H1 = 0.001	26.	LDIV, 7, , , 5, 0
9.	H2 = 0.001	27.	LDELE,3,4,1,1
10.	S = 0.001	28.	LDELE, 1, , , 1
11.	K, 1, 0, H-R1	29.	AL, ALL
12.	CIRCLE, 1, R1, , , , 4	30.	AGEN, 1, 1, , , , R2-SQRT(R2*R2-R0*R0), , , , 1
13.	K, 6, 0, -R2	31.	K, 1, R0+S, H1
14.	CIRCLE, 6, R2, , , , 4	32.	K, 2, R0+S, H1+H2
15.	LDELE, 2, 4, 1, 1	33.	LANG, 5, 1, 90, , 0.1
16.	LDELE, 6, 8, 1, 1	34.	LANG, 5, 2, 90, , 0.1
17.	KDELE,1,6,5	35.	LSTR, 1, 2
18.	K, 1, R0, 2*H	36.	AL, 3, 4, 16, 17

Список команд, приведенный в таблице 25, является практически универсальным для обоих рассматриваемых случаев линз. Т.е. пользователь может ввести в командную строку ANSYS ED последовательно набор команд из таблиц 23 и 25 (после этого просмотреть результат), а если рассматривается линза, соответствующая таблице 24, то в таблице 25 для решения интересующей задачи необходимо заменить только одну команду № 19 на аналогичную ($DL, 2, 1, UX, 0$) с другим номером линии приложения ограничения по направлению OX .

Проведем краткое описание результатов выполнения команд в таблице 25. Команды № 1-5 (Таблица 25) задают величину обжатия цангой (м) и далее определяют величины модулей Юнга и коэффициентов Пуассона материалов линзы и цилиндрической прокладки в соответствии с таблицей 22. Для обозначения величины радиального обжатия цангой любого типа линз использовалось имя DVR (м) (Таблица 25). Он имеет отрицательное значение, указывающее на сжатие цангой системы «линза-прокладка». Команды № 6-8 (Таблица 25) задают упругую модель материала с номером 1 (для линзы) и определяют его упругие характеристики. В командах № 9-11 (Таблица 25) эти действия повторяются только для второго материала (для цилиндрической прокладки). Команды № 12 и 13 (Таблица 25) выбирают первую поверхность (плоскую область) и назначают ей атрибуты (номер материала 1 и

тип конечных элементов 1). Команды № 14 и 15 (Таблица 25) повторяют те же действия для назначения другого материала и того же типа конечного элемента для плоской области, моделирующей радиальное сечение цилиндрической прокладки. Команда № 16 (Таблица 25) делает доступными все компоненты модели после выборок с помощью команды *ASEL* отдельных областей.

Таблица 25 – Код APDL задания материалов, построения разбиения, назначения граничных условий и решения задачи [30]

№	Команда	№	Команда
1.	DVR = -0.0002	15.	AATT, 2, , 1
2.	EX1 = 69790E6	16.	ALLSEL, ALL
3.	EX2 = 20700E6	17.	AMAP, 1, 3, 4, 5, 8
4.	PRXY1 = 0.184	18.	AMAP, 2, 1, 2, 7, 6
5.	PRXY2 = 0.44	19.	DL, 1, 1, UX, 0
6.	TB, ELASTIC, 1	20.	DL, 17, 2, UX, DVR
7.	MP, EX, 1, EX1	21.	DL, 17, 2, UY, 0
8.	MP, PRXY, 1, PRXY1	22.	/SOL
9.	TB, ELASTIC, 2	23.	TIME, 1
10.	MP, EX, 2, EX2	24.	NSUBST, 100
11.	MP, PRXY, 2, PRXY2	25.	AUTOTS, ON
12.	ASEL, S, , , 1, , , 1	26.	NLGEOM ,ON
13.	AATT, 1, , 1	27.	SOLVE
14.	ASEL, S, , , 2, , , 1	28.	FINISH

Команды № 17-18 (Таблица 25) создают упорядоченное разбиение обеих областей, а № 19-21 (Таблица 25) накладывают краевые условия по перемещениям на осевую линию 1 (для первой модели) и линию 17 (правую крайнюю линию прокладки, контактирующую с цангой).

Далее команда № 22 (Таблица 25) – вход в раздел «решателя» ANSYS. Ввиду решения задачи, с большими деформациями, руководство ANSYS рекомендует выполнять его итерационно даже в статическом случае. Для этого необходимо установить время решения задачи (команда № 23, Таблица 25). Задать количество итераций (команда № 24), включить опцию автоматического подбора временного шага решения (команда № 25, Таблица 25), включить опцию, позволяющую учитывать большие деформации (команда № 26, Таблица 25). Для запуска решения задачи следует воспользоваться командой № 27 (Таблица 25).

1.4.5. Отображение результатов решения

Для того чтобы просмотреть результаты, например, вертикальные перемещения в осевом сечении линзы, необходимо инициализировать список команд постпроцессора с помощью первой команды из таблицы 26. Поскольку

задача решалась итерационно, то, чтобы получить доступ к результатам решения, необходимо прочесть последние по времени данные решения. Выполняется это с помощью второй команды из таблицы 26.

Для просмотра результатов решения осесимметричной задачи в объеме необходимо выполнить осесимметричное отображение плоскости осевого сечения с помощью третьей команды из таблицы 26. Далее, с помощью четвертой команды, можно просмотреть распределение суммарных перемещений (параметр *SUM*) или перемещений вдоль координатных направлений (вместо параметра *SUM*, либо *X*, либо *Y*, либо *Z*) (Рисунок 34).

Таблица 26 – Список команд для работы с постпроцессором и просмотра распределения суммарных перемещений [30]

№	Команда	№	Команда
1.	/POST1	3.	/EXPAND, 27, AXIS, HALF, ,10
2.	SET, LAST	4.	PLNSOL, U, SUM

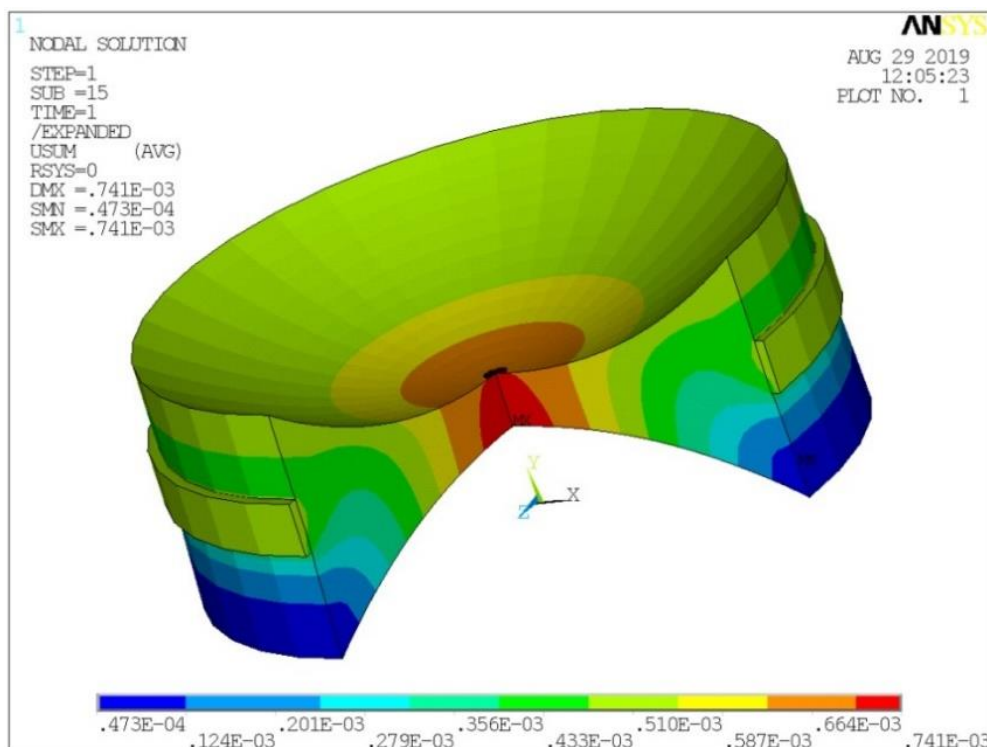


Рисунок 34 – Результат решения задачи для двояковогнутой линзы [30]

1.4.6. Обсуждение результатов моделирования

Предложена параметрическая модель расчета изменения геометрии двояковогнутых, вогнуто-выпуклых и выпукло-вогнутых линз, обжимаемых цангой через полимерную цилиндрическую прокладку при двустороннем шлифовании.

Данная задача впервые поставлена и решена с учетом больших деформаций и в наиболее близкой к инженерным приложениям постановке.

Отметим, что если задать идеальную геометрию линзы, и нагрузить ее через прокладку боковой нагрузкой от цанги, то в результате исследователь получит геометрию, до которой необходимо вести обработку, чтобы после снятия нагрузки от бокового закрепления оптические поверхности приобрели идеальную форму.

Установлено, что на осевое деформирование линз влияют все параметры задачи: геометрические размеры прокладки, ее положение на линзе, величина обжатия. Причем величина осевого деформирования сопоставима с величиной обжатия.

Каждый интересующийся исследователь может самостоятельно воспользоваться результатами данного раздела и с помощью любой учебной бесплатной версии ANSYS ED выполнить расчеты деформированных поверхностей сферических линз в зависимости от заданных технологических параметров обжатия, механических свойств материалов линзы и прокладки, а также геометрического положения последней.

Необходимо отметить, что в данном исследовании двояковыпуклые линзы не рассматривались, т.к. в силу особенности их геометрии сторонними исследователями было установлено, что осевые изменения в центре при обжатии цангой будут незначительными по сравнению с величиной обжатия.

Даны полные методические комментарии к предлагаемым моделям, созданным на основе использования бесплатной версии ANSYS 10 ED, что позволяет разобраться в построении модели инженерно-конструкторскому составу.

1.5. Параметрическое моделирование упругопластического вдавливания шара и конуса

Одной из самых известных контактных задач, имеющих большое практическое значение, является моделирование вдавливания инденторов. Это связано с тем, что оборудование для испытания на твердость гораздо компактнее и дешевле, чем разрывная машина. Поэтому представляется перспективным определять механические характеристики твердого тела в рамках той или иной модели по результатам вдавливания инденторов.

В настоящее время сложилось несколько подходов к решению данной проблемы. Исторически первым было решение, предложенное Ишлинским А.Ю. [31, 32] и продублированное Шилдом Р.Т. [33]. Необходимо отметить большую вычислительную сложность и низкую автоматизацию решения задач в подобной постановке [31-34]. Это направление не получило дальнейшего развития, т.к. исследователи сконцентрировались на методиках, основанных на применении аналитической формулы Герца для шара, например, с использованием линеаризованных упругопластических характеристик объекта, чья твердость исследуется.

Однако теория Герца создана при использовании гипотезы о малой деформации твердого тела (объекта индентирования) и даже в упругом случае дает только качественное, но не количественное совпадение с экспериментом даже для тела, выполненного из стекла [35]. Применение же ее к исследованию случая конечных деформаций вообще ничем не оправдано, т.к. при внедрении индентора перемещения приповерхностных слоев соизмеримы с размерами внедряемой части индентора. Это полностью отрицает возможность применения геометрических гипотез Герца, гарантирующих малую глубину внедрения индентора в полупространство по сравнению с размерами области контакта. Поэтому данный подход даже условно нельзя назвать адекватным в случае решения постеленной задачи.

Одновременно в литературе развивался другой подход к описанию контактного взаимодействия – это использование основания Винклера [36, 37]. Сильной стороной этой теории является то, что она пригодна как для малых, так и для конечных деформаций. Это и определяет возможность ее применения к решению задач пластического внедрения инденторов. Однако, несмотря на уже достигнутые успехи [37], пока сложно с помощью данной теории определить модуль упругости или условную толщину покрытия при моделировании теста на твердость в случае массивного объекта.

Еще одно направление изучения контактного взаимодействия – это применение программ FEM анализа. Хотя решение ряда задач приводится в литературе [13, 38], однако опубликованных научных работ, касающихся моделирования испытаний на твердость, до настоящего времени не было.

Кроме определенной новизны данное исследование является очень актуальным, что определяется высокой степенью автоматизации процесса решения, возможностью рассмотрения нескольких моделей пластичности, а также доступностью и бесплатностью самих программ ANSYS версии ED.

Особенно важным является построение именно параметрической модели, которая дает возможность перейти к решению уже обратной задачи, так как позволит организовать процесс выбора оптимальных параметров по критерию близости практической и теоретической диаграмм вдавливания.

1.5.1. Постановка задачи

При моделировании предполагается, что материал образца, в который осуществляется вдавливание индентора любой формы, является однородным изотропным и упругопластическим по кинематической модели пластичности. Эта модель соответствует поведению сталей. Кроме того, изотропным и линейно упругим является материал индентора, который обычно изготавливается из высокопрочных сталей и закаливается до высокой твердости, либо для микро- и наноизмерений твердости может использоваться индентор с алмазным наконечником.

Предполагается, что деталь при испытаниях на твердость можно мысленно заменить цилиндрическим образцом достаточных размеров (значительно

превосходящих радиус области контакта). При этом напряженное состояние границ мысленно высеченного из детали цилиндра не оказывают влияния на напряженное состояние в области контакта.

Предполагается, что поверхность вдавливания индентора у цилиндрического образца имеет отклонения гораздо меньшие, чем глубина вдавливания, а, следовательно, можно предположить, что поверхность вдавливания образца ровная.

В рамках сделанных предположений поставленная задача для любых рассматриваемых типов инденторов является осесимметричной. Ось симметрии задачи совпадает с осью OY . Моделирование радиального сечения индентора и цилиндрического образца по требованиям ANSYS выполняется в плоскости XOY [3-5]. Уже после решения задачи ее результаты можно просмотреть средствами постпроцессинга ANSYS в объеме.

В данном разделе использовались следующие геометрические параметры: H – высота цилиндрического образца (м), R – радиус образца, R_0 – радиус сферического индентора или радиус конического индентора (м), $ALFA$ – угол, образующей конуса с осью OY (градусы), $DELTA$ – глубина вдавливания любого из инденторов, изображенных на рисунках 35 и 36.

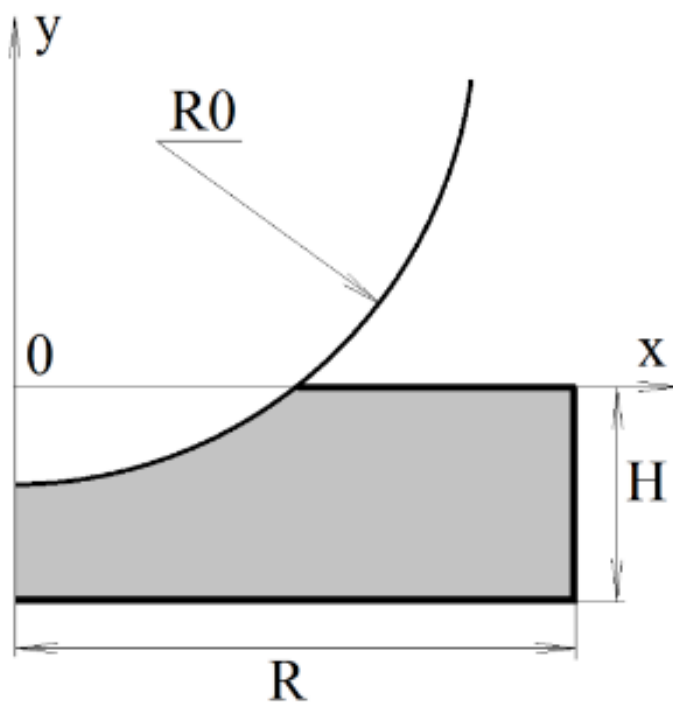


Рисунок 35 – Схема геометрических параметров радиального сечения шара и цилиндрического образца

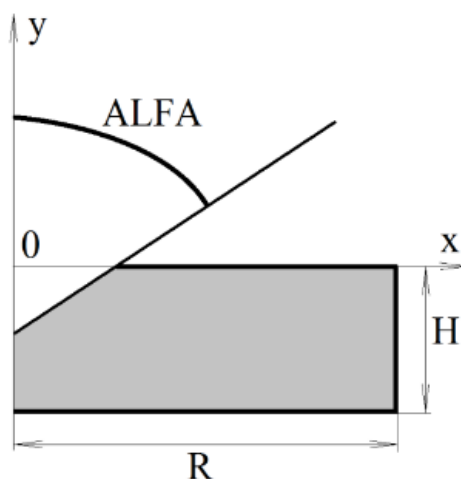


Рисунок 36 – Радиальное сечение конуса и цилиндрического образца

Кроме того будут использоваться физические параметры модели: E_X , E_{X0} – модули упругости (Па) материалов образца и индентора соответственно; PR_{XY} , PR_{XY0} – коэффициенты Пуассона материалов образца и индентора соответственно (Таблица 27), $YIELDSTRS$ – предел текучести материала образца (Па) и $TANGMOD$ – касательный пластический модуль материала образца в билинейной диаграмме Прандтля (Па)

Не ограничивая общность построенной модели, для проведения численного эксперимента предполагалось, что параметры материалов определяются величинами, приведенными в таблице 27.

Таблица 27 – Механические характеристики инденторов и образца

Материалы	Модуль упругости (Па)	Коэффициент Пуассона	Предел текучести материала образца (Па)	Касательный пластический модуль материала образца в билинейной диаграмме Прандтля (Па)
Сталь	2.1 E11	0.3	----	---
Свинец	0.18 E11	0.42	5 E6	0

1.5.2. Вдавливание шарового индентора. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения образца и индентора

Команды, выбирающие тип элемента, задающие значения геометрических параметров, а также список команд построения геометрии рассматриваемой модели, приведены в таблице 28.

Команда № 1 (Таблица 28) – вход в препроцессор. Команды № 2, 3 (Таблица 28) производят выбор двумерного элемента текущей среды *PLANE42* с опцией осесимметричности задачи относительно *Y*-оси. Команды № 4-7 (Таблица 28) устанавливают значения используемых геометрических параметров (Рисунок 35).

Таблица 28 – Код APDL для построения геометрии модели радиального сечения вдавливания шарового индентора

№	Команда	№	Команда
1.	/PREP7	12.	LDIV, 10, , , 4, 0
2.	ET, 1, PLANE42	13.	LANG, 1, 8, 90, , 0.1
3.	KEYOPT, 1, 3, 1	14.	ASEL, S, AREA, , 1, 4, 3, 1
4.	H = 0.015	15.	ALLSEL, ALL, LINE
5.	R = 0.025	16.	ASBL, ALL, 14, --, DELETE, DELETE
6.	R0 = 0.005	17.	ALLSEL, ALL
7.	DELTA = 0.001	18.	AGLUE, 2, 3
8.	RECTNG, 0, R, 0, H	19.	AGLUE, 5, 6
9.	CYL4, 0, H+R0, R0, 270, 0, 360	20.	LCOMB, 6, 8, 0
10.	RECTNG, 0, R0, H+R0, H+R0+0.1*H	21.	LCOMB, 6, 9, 0
11.	AADD, 2, 3	22.	LCOMB, 7, 13, 0

Команды № 8-19 (Таблица 28) производят построение радиального сечения цилиндрического образца и шара в оправке посредством:

- создания плоских поверхностей, таких как два прямоугольника и четверть круга (команды № 8-10, Таблица 28);
- сложения четверти круга и одного из прямоугольников, имитирующих оправку (команда № 11, Таблица 28);
- деления верхней границы оправки на 4 части (команда № 12, Таблица 28) с целью построения перпендикулярной линии к основанию из одной из точек, полученных после деления (команда № 13, Таблица 28);
- деления построенной линией обеих поверхностей, моделирующих внедрение шарового индентора в оправку в цилиндрический образец (команды №14-16, Таблица 28);
- отмены выбора компонентов модели (команда № 17, Таблица 28);
- последовательного попарного склеивания поверхностей *A2* и *A3*, а также *A5* и *A6* (команды №18, 19, Таблица 28).

Последними командами № 20-22 (Таблица 28) являются команды парного объединения вспомогательных линий в модели шара в оправке.

1.5.3. Шаровой индентор. Задание констант материалов. Построение упорядоченного разбиения геометрической модели

Необходимость построения упорядоченного конечно-элементного разбиения модели диктуется требованием получить качественное решение рассматриваемых задач при действующих ограничениях на количество используемых элементов в ANSYS 10 ED. Проведем краткое описание результатов выполнения команд в таблице 29.

Таблица 29 – Код APDL задания материалов, построения разбиения, назначения граничных условий и решения задачи для шарового индентора

№	Команда	№	Команда
1.	EX = 0.18E11	26.	AMAP, 5, 15, 8, 10, 6
2.	EX0 = 2.1E11	27.	DL, 4, 2, UX, 0
3.	PRXY = 0.42	28.	DL, 7, 6, UX, 0
4.	PRXY0 = 0.3	29.	DL, 1, 2, ALL, 0
5.	YIELDSTRS = 5E6	30.	DL, 11, 3, ALL, 0
6.	TANGMOD = 0	31.	DL, 12, 5, UX, 0
7.	TB, BKIN, 1	32.	DL, 6, 6, UY, 0
8.	MP, EX, 1, EX	33.	DL, 10, 5, UY, 0
9.	MP, PRXY, 1, PRXY	34.	MP, MU, 1, 0
10.	TBDATA, 1, YIELDSTRS, TANGMOD	35.	MAT, 1
11.	TB, ELASTIC, 2	36.	ET, 2, TARGE169
12.	MP, EX, 2, EX0	37.	ET, 3, CONTA172
13.	MP, PRXY, 2, PRXY0	38.	KEYOPT, 3, 5, 1
14.	ASEL, S, AREA, , 2, 3, 1, 1	39.	KEYOPT, 3, 9, 2
15.	AATT, 1, , 1	40.	LSEL, S, LINE, , 20
16.	ASEL, S, AREA, , 5, 6, 1, 1	41.	TYPE,2
17.	AATT, 2, , 1	42.	NSLL,S,1
18.	ALLSEL, ALL	43.	ESLN,S,0
19.	LESIZE, 15, , , 20	44.	ESURF
20.	LESIZE, 20, , , 20	45.	LSEL, S, LINE, , 15
21.	LESIZE, 7, , , 4	46.	TYPE,3
22.	LESIZE, 4, , , 10	47.	NSLL,S,1
23.	AMAP, 2, 1, 4, 14, 13	48.	ESLN,S,0
24.	AMAP, 3, 13, 14, 3, 2	49.	ESURF
25.	AMAP, 6, 5, 11, 8, 15	50.	ALLSEL, ALL

Команды № 1-6 (Таблица 29) определяют величины модулей Юнга и коэффициентов Пуассона материалов шаровидного индентора и цилиндрического образца из свинца, а также значения его предела текучести и касательного модуля в соответствии с таблицей 27. В командах № 7-13 (Таблица 29) задаются две модели материалов (материал с номером 1 –

упругопластический для образца, материал с номером 2 – упругий для индентора). Группы команды № 14, 15 и № 16, 17 (Таблица 29) попарно назначают атрибуты (номер материала и номер конечного элемента) геометрическим поверхностям радиального сечения модели (Таблица 29). Команда № 18 (Таблица 29) отменяет выбор компонентов модели, выполненный на предыдущем шаге. В командах № 19-22 (Таблица 29) назначается количество ребер элементов на линиях для сгущения сетки в области контакта и ее разрежения в остальной части модели. Команды № 23-26 (Таблица 29) осуществляют последовательное упорядоченное разбиение всех поверхностей модели. Ограничения по перемещениям накладываются на линии модели в командах № 27-33 (Таблица 29). В командах № 34-49 (Таблица 29) устанавливается значение коэффициента трения, выбираются типы элементов для построения контактных пар, устанавливаются две опции со значениями не «по умолчанию», а также строится разбиение контактными элементами линий, по которым будет происходить взаимодействие осевых сечений индентора и образца. Команда № 50 (Таблица 29) отменяет выбор компонентов модели, сделанный на предыдущих шагах.

1.5.4. Вдавливание конического индентора. Определение значений параметров и построение твердотельной модели радиального сечения образца и индентора

Команды № 1-3 (Таблица 30) повторяют команды № 1-3 (Таблица 28).

Команды № 4-7 (Таблица 30) устанавливают значения используемых геометрических параметров (Рисунок 36).

Команды № 8-20 (Таблица 30) производят построение радиального сечения цилиндрического образца и конуса в оправке посредством:

- создания плоских поверхностей, таких как два прямоугольника (команды № 8, 9, Таблица 30);
- проведения линии, соответствующей образующей конуса (команда № 10, Таблица 30);
- деления верного прямоугольника, построенной образующей конуса (команда № 11, Таблица 30);
- удаление части отрезанной поверхности (команда № 12, Таблица 30);
- деления верхней границы оправки на 2 части (команда № 13, Таблица 30) с целью построения перпендикулярной линии к основанию из точки, полученной после деления (команда № 14, Таблица 30);
- деления построенной линией обеих поверхностей, моделирующих внедрение конического индентора в оправку в цилиндрический образец (команды № 15-17, Таблица 30);
- отмены выбора компонентов модели (команда № 18, Таблица 30);

- последовательного попарного склеивания A2 и A3, а также A5 и A6 поверхностей (команды № 19, 20, Таблица 30).

Таблица 30 – Геометрия модели радиального сечения при вдавливании конического индентора

№	Команда	№	Команда
1.	/PREP7	11.	ASBL, 2, 10, , DELETE, DELETE
2.	ET, 1, PLANE42	12.	ADELE, 3, , , 1
3.	KEYOPT, 1, 3, 1	13.	LDIV, 7, , , 2, 0
4.	H = 0.005	14.	LANG, 1, 6, 90, , 0.1
5.	ALFA = 60	15.	ASEL, S, AREA, , 1, 4, 3, 1
6.	R = 0.015	16.	ALLSEL, ALL, LINE
7.	DELTA = 0.001	17.	ASBL, ALL, 11, --, DELETE, DELETE
8.	RECTNG, 0, R, 0, H	18.	ALLSEL, ALL
9.	RECTNG, 0, H, H, 2*H	19.	AGLUE, 2, 3
10.	LANG, 6, 5, 180-ALFA, , 0.1	20.	AGLUE, 5, 6

1.5.5. Конический индентор. Задание констант материалов. Построение упорядоченного разбиения геометрической модели. Общие команды решения обеих задач

Описание последовательности команд и их номера, приведенные в таблице 31 полностью соответствуют уже описанному случаю в таблице 28 для шарового индентора.

К сожалению, хотя описание действий и в таблице 28, и таблице 31 совпадают полностью, но номера компонент модели, с которыми проводятся те или иные преобразования отличаются друг от друга. Это определит необходимость включения таблицы 31 в текст данного раздела.

В данном случае к списку команд из раздела решателя ANSYS отнесена еще и одна команда препроцессора (№ 1, Таблица 32), которая смещает модель осевого сечения любого из инденторов вместе с конечноэлементным разбиением вдоль оси Oz на –DELTA.

Далее в команде № 2 (Таблица 32) осуществляется вход в раздел «решателя» ANSYS. В соответствии с документацией ANSYS 10ED и более ранних версий, ввиду нелинейной постановки задачи рекомендуется решать даже статические задачи итерационно. Для этого установить время решения задачи (команда № 3, Таблица 32), задать количество шагов в каждой итерации (команда № 4, Таблица 32), включить опцию автоматического подбора временного шага решения (команда № 5, Таблица 32), включить опцию, позволяющую учитывать большие деформации (команда № 6, Таблица 32). Для запуска решения задачи следует воспользоваться командой № 7 (Таблица 32).

Отметим, что в более новых версиях ANSYS, использование команды № 6 (Таблица 32) для включения больших перемещений приводит к расходящемуся вычислительному процессу. В этом случае команду № 6 (Таблица 32) следует просто игнорировать.

Таблица 31 – Код APDL задания материалов, построения разбиения, назначения граничных условий и решения задачи

№	Команда	№	Команда
1.	EX = 0.18E11	26.	AMAP, 6, 12, 6, 7, 9
2.	EX0 = 2.1E11	27.	DL, 4, 2, UX, 0
3.	PRXY = 0.42	28.	DL, 8, 5, UX, 0
4.	PRXY0 = 0.3	29.	DL, 1, 2, ALL, 0
5.	YIELDSTRS = 5E6	30.	DL, 6, 3, ALL, 0
6.	TANGMOD = 0	31.	DL, 9, 6, UX, 0
7.	TB, BKIN, 1	32.	DL, 5, 5, UY, 0
8.	MP, EX, 1, EX	33.	DL, 7, 6, UY, 0
9.	MP, PRXY, 1, PRXY	34.	MP,MU,1,0
10.	TB,DATA,1,YIELDSTRS,TAN GMOD	35.	MAT,1
11.	TB, ELASTIC, 2	36.	ET,2,TARGE169
12.	MP, EX, 2, EX0	37.	ET,3,CONTA172
13.	MP, PRXY, 2, PRXY0	38.	KEYOPT,3,5,1
14.	ASEL, S, AREA, , 2, 3, 1, 1	39.	KEYOPT,3,9,2
15.	AATT, 1, , 1	40.	LSEL, S, LINE, , 15
16.	ASEL, S, AREA, , 5, 6, 1, 1	41.	TYPE,2
17.	AATT, 2, , 1	42.	NSLL,S,1
18.	ALLSEL, ALL	43.	ESLN,S,0
19.	LESIZE, 15, , , 20	44.	ESURF
20.	LESIZE, 12, , , 20	45.	LSEL, S, LINE, , 12
21.	LESIZE, 8, , , 4	46.	TYPE,3
22.	LESIZE, 4, , , 10	47.	NSLL,S,1
23.	AMAP, 2, 1, 4, 11, 10	48.	ESLN,S,0
24.	AMAP, 3, 10, 11, 3, 2	49.	ESURF
25.	AMAP, 5, 5, 8, 6, 12	50.	ALLSEL, ALL

Таблица 32 – Код APDL переноса модели индентора и решения задачи

№	Команда
1.	AGEN, 2, 5, 6, 1, , -DELTA, , , 1
2.	/SOL
3.	TIME, 1
4.	NSUBST, 20
5.	AUTOTS, ON
6.	NLGEOM, ON
7.	SOLVE

1.5.6. Вычисление значений интегральной нагрузки на индентор по величинам действующих напряжений. Просмотр результатов решения

К сожалению, не всегда можно определить требуемые значения встроенными средствами ANSYS. Иногда есть необходимость в написании программного кода для автоматического вычисления значений.

Так при решении поставленных задач возникает необходимость определения величины интегральной нагрузки, приложенной к индентору вертикально вниз. В качестве примера в данном разделе приведен код программы для модели внедрения шарового индентора (Таблица 33).

Известно [35], что в осесимметричном случае в выбранной на системе координат (Рисунок 35, Рисунок 36) величина силы может быть определена с помощью формулы:

$$P = -2\pi \cdot \int_0^a \sigma_y \cdot x dx, \quad (3)$$

где a – радиус области контакта, σ_y – нормальное напряжение, действующее на площадках перпендикулярных оси Oy , в области контакта.

Однако этот подход является чрезмерно сложным, поскольку требует еще и определения размеров области контакта (3). Авторам представляется более экономичным способ интегрирования по верхней плоской границе модели индентора. В этом случае, очевидно, область интегрирования будет постоянной.

В качестве численного метода вычисления соответствующего интеграла предлагается использовать правило правых прямоугольников [39]. Действия, выполняемые в листинге, приведенном в таблице 33, имеют следующий смысл:

- создание массива из значений напряжений σ_y , действующих на верхней границе индентора (команды № 1-9, Таблица 33)
- создание массива координат узловых точек, находящихся на верхней границе индентора (команды № 10-18, Таблица 33);

- задание константы PI (команда № 19, Таблица 33);
- вычисление интегральной суммы с учетом обратного порядка формирования массива координат и массива действующих напряжений (команды № 20-23, Таблица 33);
- определение реальной глубины внедрения с учетом упругой деформации индентора (команда № 24, Таблица 33).

Таблица 33 – Код APDL вычисления действующей нагрузки на шаровой индентор и глубины его внедрения [40]

№	Команда	№	Команда
1.	*DIM, Stress, ARRAY, 24	13.	*GET, COORD(3), NODE, 387, LOC, X
2.	*GET, Stress(1), NODE, 382, S, Y	14.	*GET, COORD(4), NODE, 276, LOC, X
3.	*GET, Stress(2), NODE, 386, S, Y	15.	*DO, I, 0, 18, 1
4.	*GET, Stress(3), NODE, 387, S, Y	16.	*GET, COORD(5+I), NODE, 278+I, LOC, X
5.	*GET, Stress(4), NODE, 276, S, Y	17.	*ENDDO
6.	*DO, I, 0, 18, 1	18.	*GET, COORD(24), NODE, 277, LOC, X
7.	*GET, Stress(5+I), NODE, 278+I, S, Y	19.	PI=ACOS(-1)
8.	*ENDDO	20.	INTEGRAL = 0
9.	*GET, Stress(24), NODE, 277, S, Y	21.	*DO, I, 1, 23, 1
10.	*DIM, COORD, ARRAY, 24	22.	INTEGRAL = INTEGRAL+PI*Stress(I)*COORD(I)*(COORD(I+1)- COORD(I))
11.	*GET, COORD(1), NODE, 382, LOC, X	23.	*ENDDO
12.	*GET, COORD(2), NODE, 386, LOC, X	24.	*GET, PENETRATION, NODE, 32, U, Y

Для того чтобы посмотреть значения вычисленной интегральной силы (значение параметра *INTEGRAL*) и реальной глубины внедрения индентора с учетом его упругой деформации (значение параметра *PENETRATION*) необходимо посмотреть список значений всех параметров, используемых программой, например, с помощью пункта меню утилит: *Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...* . Также можно вывести значения параметров в файл с помощью команды *PARSAVE*. В любом случае все параметры распределяются в списке по алфавитному порядку вне зависимости от порядка их использования в программе.

Для того чтобы просмотреть результаты с помощью графического интерфейса, необходимо инициализировать список команд постпроцессора с помощью команды № 1 (Таблица 34). Поскольку задача решалась итерационно (Таблица 32), то, чтобы получить доступ к результатам решения, необходимо

прочитать последние по времени данные решения. Выполняется это с помощью команды № 2 (Таблица 34).

Для просмотра, например, контактных давлений в осевом сечении индентора и образца необходимо использовать команду № 3 (Таблица 34, Рисунок 37).

Для просмотра результатов решения осесимметричной задачи в объеме необходимо выполнить осесимметричное отображение плоскости осевого сечения с помощью команды № 4 (Таблица 34). Далее, с помощью команды № 5, (Таблица 34) можно просмотреть распределение суммарных перемещений (параметр *SUM*) или перемещений вдоль координатных направлений (вместо параметра *SUM*, либо *X*, либо *Y*, либо *Z*) (Рисунок 38).

Таблица 34 – Просмотр результатов с помощью графического интерфейса [40]

№	Команда
1.	/POST1
2.	SET, LAST
3.	PLNSOL, CONT[4], PRES
4.	/EXPAND, 27, AXIS, HALF, ,10
5.	PLNSOL, U, SUM

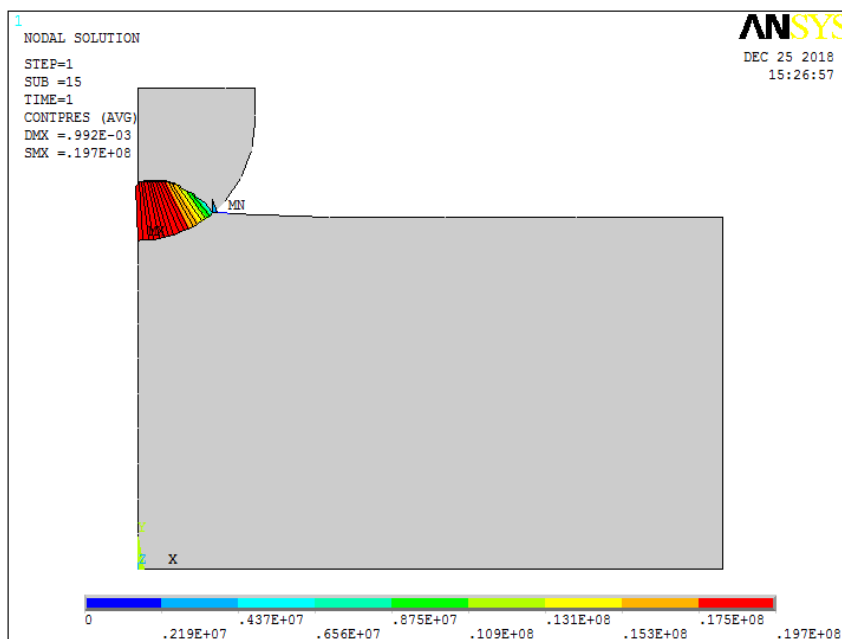


Рисунок 37 – Распределение контактных давлений в осевом сечении модели вдавливаемого шара в цилиндрический образец [40]

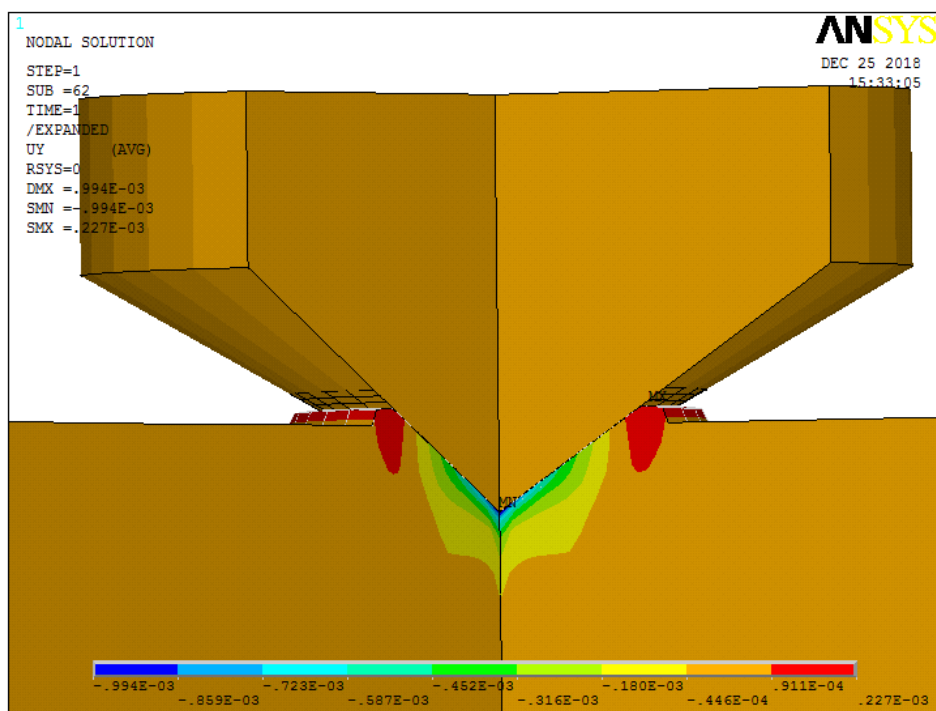


Рисунок 38 – Объемный вид распределения вертикальных перемещений U_Y при вдавливании конуса [40]

1.5.7. Обсуждение результатов моделирования

Впервые предложена параметрическая модель расчета упругопластического внедрения шарового и конического инденторов.

Предложен метод определения вертикальной нагрузки на индентор, соответствующий некоторой заданной глубине перемещения оправки.

Установлено, что на разность перемещения границы оправки и реальной глубины внедрения вершины любого из инденторов оказывают существенное влияние механические характеристики как индентора, так и образца.

ГЛАВА 2. ЗАДАЧИ СТАЦИОНАРНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ¹

2.1. Моделирование турбулентного потока вязкой несжимаемой жидкости в фитингах труб

До настоящего времени все гидродинамические расчеты трубопроводов проводились с использованием полуэмпирических формул, полученных в основном для ламинарного течения вещества в трубопроводе, в которых присутствуют экспериментально определяемые коэффициенты с учетом чисел Рейнольдса. С помощью такого подхода учитываются разнообразные эффекты, возникающие при повышении скорости перекачки среды и возможного возникновения в этих случаях вихрей и других явлений, снижающих скорость движения среды [41-43].

Основной слабостью данных методик является интуитивность и сложность адекватного определения необходимых значений чисел Рейнольдса, т.к. в ряде случаев предлагается вычислять отдельно числа Рейнольдса для потока в целом и локально для потока около ограничивающей поверхности.

Предлагаемые параметрические модели позволяют отказаться от этого промежуточного этапа в расчетах, т.к. распределение скоростей движения потока и вихревые явления ANSYS ED/FLOTRAN вычисляет самостоятельно.

Следует обратить внимание читателей, что в подавляющем числе примеров для ANSYS ED/FLOTRAN пункты меню и/или команды, назначающие атрибуты областям моделирования, будут опущены за ненадобностью – это можно рассматривать как специфику ANSYS ED/FLOTRAN, в котором при решении задач используется только одна жидкая или газообразная среда. Если рассматривается две среды, то вторая среда всегда является твердым телом, имеющим исключительно тепловые характеристики. Вероятнее всего это сделано чтобы исключить рассмотрение вопросов, связанных с перемешиванием сред.

2.1.1. Краткое описание задачи

Рассматривается параметрическая трехмерная модель внутреннего объема отвода и, в силу симметричности задачи и необходимости экономии элементов, параметрическая модель внутреннего объема половины тройника, полученного его сечением продольной плоскостью. Отброшенная часть объема тройника заменяется соответствующими краевыми условиями для потока. При течении в

¹ Настоящая глава частично написана на основе магистерской диссертации Михиевича А.П. и дипломной работы Гайса Н.Ю., выполненных под руководством и при непосредственном участии одного из авторов данного издания доктора физико-математических наук, доцента Кравчука А.С.

отводе при больших скоростях можно наблюдать значительное повышение скорости потока на внешней границе отвода, что может приводить к его повышенному эрозионному износу и значительному падению давления. В тройнике, в силу особенностей геометрии и различных краевых условиях на выходных отверстиях могут образовываться вихри. Решение поставленной задачи позволяет оценить размеры областей, в которых происходит торможение потока и подобрать геометрические размеры данного соединения. Во всех задачах используются краевые условия «прилипания» [44] (полной остановки) потока на стенках фитингов.

2.1.2. Конечно-элементная модель внутреннего пространства отвода

В случае построения модели внутреннего пространства отвода (Рисунок 39) используются следующие соответствующие ГОСТ-у параметры [45, 46]: $D = 0.3$ (м) – наружный диаметр торцов отвода; $R = 0.2$ (м) – радиус поворота отвода; $\theta = 180$ (градусы) – угол между плоскостями торцов отвода; $T = 0.004$ (м) – толщина стенки на торцах отвода; $V = 1$ (м/с) – скорость перекачки жидкости; $P = 3 \cdot 10^5$ (Па) – манометрическое давление в трубопроводе (Рисунок 39).

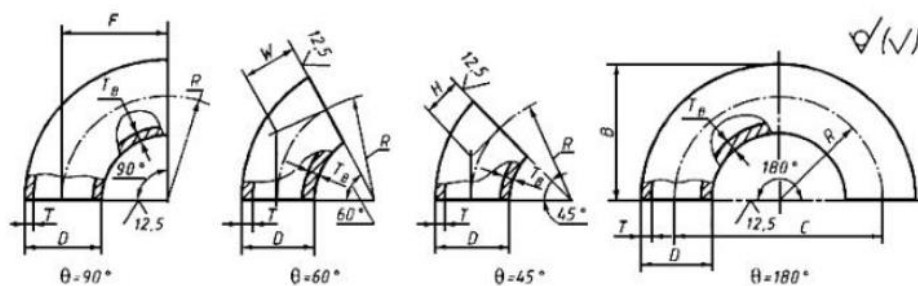


Рисунок 39 – Геометрические параметры отвода для разных видов углов [45]

Модуль FLOTTRAN в ANSYS 10ED очень чувствителен к выбору рабочего каталога (путь не должен содержать папок на кириллице) и рабочему файлу. Выбор папки и назначение имени рабочего файла должно выполняться с помощью ANSYS Product Launcher [8].

Так как строящаяся модель будет параметрической, то необходимо ввести перечисленные параметры и их значения до начала построения модели с помощью пункта меню утилит: *Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters*.

Для построения параметрической модели внутреннего пространства отвода необходимо воспользоваться пунктом меню: *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Torus* [3, 4]. В нем последовательно указываются радиус поворота отвода R , внутренний радиус трубы $D/2 - T$, начальный угол («по умолчанию» 0) и конечный угол отвода θ .

Далее необходимо удлинить внутритрубное пространство на входе и выходе отвода, для того чтобы построить более адекватную картину вихревого течения в самом отводе. Естественно удлинение строиться достаточно большим,

чтобы характер начального входа потока в модель и его выхода из нее не оказывал значительного влияния на процессы в отводе. Для этого воспользуемся пунктом главного меню: *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Operate* > *Extrude* > *Areas* > *Along Normal* [3, 4]. Необходимо указать поверхность *A3*, от которой будет вытягиваться объем, нормаль выбирается автоматически, а также указывается расстояние $2*D$, на которое будет вытягиваться объем. Будем считать это удлинение достаточным для адекватного моделирования потока. По окончании первой операции вытягивания необходимо нажать *Apply*, а далее выбрать уже поверхность *A4* и ее вытянуть также на расстояние $2*D$.

В силу простоты построенной геометрии можно воспользоваться средствами создания упорядоченного разбиения на конечные элементы путем вытягивания. Для управления качеством разбиения при вытягивании воспользуемся возможностью задания глобального размера элементов с помощью пункта меню: *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *SizeCtrls* > *ManualSize* > *Global* > *Size* [5]. В появившемся окне следует указать размер элементов, привязанный к какому-либо размеру параметрической модели. В данном случае в поле *ESIZE* укажем $D/10$. Для улучшения разбиения в качестве значения *ESIZE* можно указать $D/40$. Однако ED версия ANSYS не сможет решить задачу с подобным «плотным» разбиением.

Далее следует выбрать тип конечных элементов, который будет использоваться в дальнейшем при решении, в пункте главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete*. После его использования появится окно *Element Types*, в котором следует нажать *Add*, а в следующем окне *Library of Element Types* необходимо выбрать элемент *3D FLOTRAN 142* [5].

После этого, командой вытягивания сетки *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh* > *Volume Sweep* > *Sweep* [5] последовательно выбирается сначала объем *V1*, указываются поверхность начала и конца вытягивания сетки, нажимается кнопка *Apply* и последовательность рассмотренных действий повторяется с объемом *V2* и *V3* (Рисунок 40).

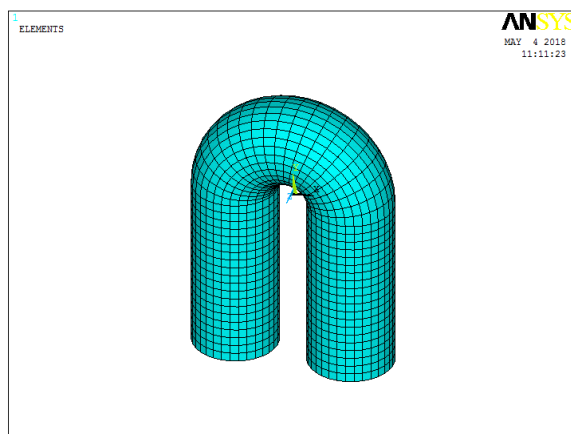


Рисунок 40 – Упорядоченное конечно-элементное разбиение параметрической модели внутреннего пространства отвода

Для задания краевых условий при течении жидкости во внутреннем объеме отвода воспользуемся условиями полного прилипания [44] на боковых поверхностях отвода. С помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Fluid/CFD > Velocity > On Areas* выбираются поверхности *A1, A2, A6, A7, A8, A9, A11, A12, A13, A14* и после подтверждения выбора нажатием кнопки *OK* в следующем появившемся диалоговом окне задаются равные нулю все проекции скоростей потока *Vx load value, Vy load value, Vz load value* на выбранных ранее поверхностях, при этом надо установить флаг *Yes* в поле *Apply to Boundary lines*.

На поверхностях *A10* следует с помощью указанного на предыдущем шаге пункта меню установить направление входного потока вдоль оси *OY* (*Vy load value*) и величину скорости равную параметру *V*.

С помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Fluid/CFD > Pressure DOF > On Areas* следует указать инкремент давления на выходе потока из отвода (поверхность *A5*) по отношению к манометрическому (*0*).

Список команд для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения геометрии отвода, создания конечно-элементной сетки и задания краевых условий приведен в таблице 35.

Таблица 35 – Список команд построения конечно-элементной модели внутреннего объема отвода

№	Команда	№	Команда
1.	/FILNAME, BranchPipe, 0	14.	VSWEEP, 1, 3, 4
2.	D = 0.3	15.	VSWEEP, 2, 4, 5
3.	R = 0.2	16.	VSWEEP, 3, 3, 10
4.	T = 0.004	17.	ASEL, S, AREA, , 1, 2,
5.	THETA = 180	18.	ASEL, A, AREA, , 6, 9, 1
6.	V = 1	19.	ASEL, A, AREA, , 11, 14, 1
7.	P = 3*(1E+5)	20.	DA, ALL, VX, 0, 1
8.	/PREP7	21.	DA, ALL, VY, 0, 1
9.	TORUS, R, , D/2-T, 0, THETA	22.	DA, ALL, VZ, 0, 1
10.	VOFFST, 4, 2*D	23.	ASEL, ALL
11.	VOFFST, 3, 2*D	23.	DA, 10, VY, V, 1
12.	ESIZE, D/10	25.	DA, 5, PRESS, 0
13.	ET, 1, FLUID142	26.	---

2.1.3. Создание конечно-элементной модели внутреннего объема тройника

В данном случае для упрощения модели и сокращения списка команд необходимо использовать свободное разбиение. Исходя из необходимости сокращения общего количества элементов в модели из-за использования ED

версии и общих рекомендаций построения свободных конечно-элементных разбиений симметричных объектов, будем строить вначале геометрическую трехмерную модель одной половины внутренности тройника, поскольку он имеет две симметричные относительно продольной плоскости части.

Для построения параметрической модели половины внутреннего пространства переходного тройника (Рисунок 41) будем использовать следующие соответствующие ГОСТ-у параметры [47]: $D = 0.3$ (м) – больший наружный диаметр переходных тройников; $D1 = 0.3$ (м) – меньший наружный диаметр переходных тройников; $r = 0.05$ (м) – наружный радиус скругления магистралей и ответвления; $H = 0.5$ (м) – высота между плоскостью торца третьего ответвления и центром отверстия магистрали; $F = 0.3$ (м) – длина от центра отверстия ответвления до плоскости торца отверстия магистралей; $T = 0.004$ (м) – толщина стенки тройника с диаметром D ; $T1 = 0.004$ (м) – толщина стенки тройника с диаметром $D1$; $TВ$ – толщина стенки отводов в не торцевых сечениях и тройников в зоне сопряжения магистрали и ответвления; $L = 2*D$ – дополнительное удлинение выходов тройника; $V = 0.2$ (м/с) – скорость перекачки жидкости во входной трубе; $P = 3*(1E+5)$ (Па) – манометрическое давление во входном трубопроводе. Как и в случае отвода, необходимо ввести все перечисленные параметры тройника и их значения с помощью пункта меню утилит *Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters* до начала построения самой модели.

При построении тройника используется метод построения твердотельной модели “снизу-вверх” [3, 4]. Согласно этому подходу, первым этапом при создании модели является создание ключевых точек, определяющих габаритные размеры модели. Это действие выполняется с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS*. В появившемся окне *Create Keypoints in Active Coordinate System* необходимо ввести последовательно номера и координаты ключевых точек в полях *Keypoint number* и *X,Y,Z Location in active CS* (Таблица 36).

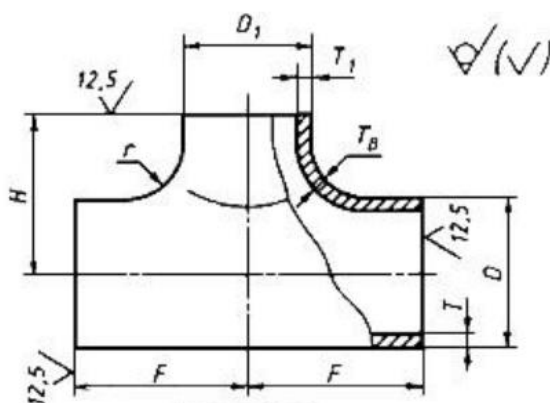


Рисунок 41 – Геометрические параметры тройника [47]

Далее необходимо соединить ключевые точки линиями. Это делается при помощи *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Straight Line* [3, 4] и последовательно соединяются ключевые точки 1 и 2 ($L1$), 2 и 3 ($L2$), 3 и 4 ($L3$),

4 и 5 ($L4$), 5 и 6 ($L5$), 6 и 1 ($L6$). Также это можно выполнить при помощи кода APDL в виде простого цикла (команды № 20-23, Таблица 37).

После создания линий параметрической модели необходимо скруглить угол между линиями $L2$ и $L3$, с учетом радиуса скругления внутреннего пространства равного $r+TB$ при помощи пункта меню: *Main Menu*> *Preprocessor*> *Modeling*> *Create*> *Lines*> *Line Fillet* (Рисунок 42) [3, 4].

Таблица 36 – Координаты точек для построения половины продольного сечения внутреннего пространства тройника

Номер ключевой точки КР	X-Лос (м)	Y-Лос (м)	Z-Лос (м)
1	0	0	0
2	D1/2-T1	0	0
3	D1/2-T1	0	-(H-D/2+T)
4	F	0	-(H-D/2+T)
5	F	0	-H
6	0	0	-H

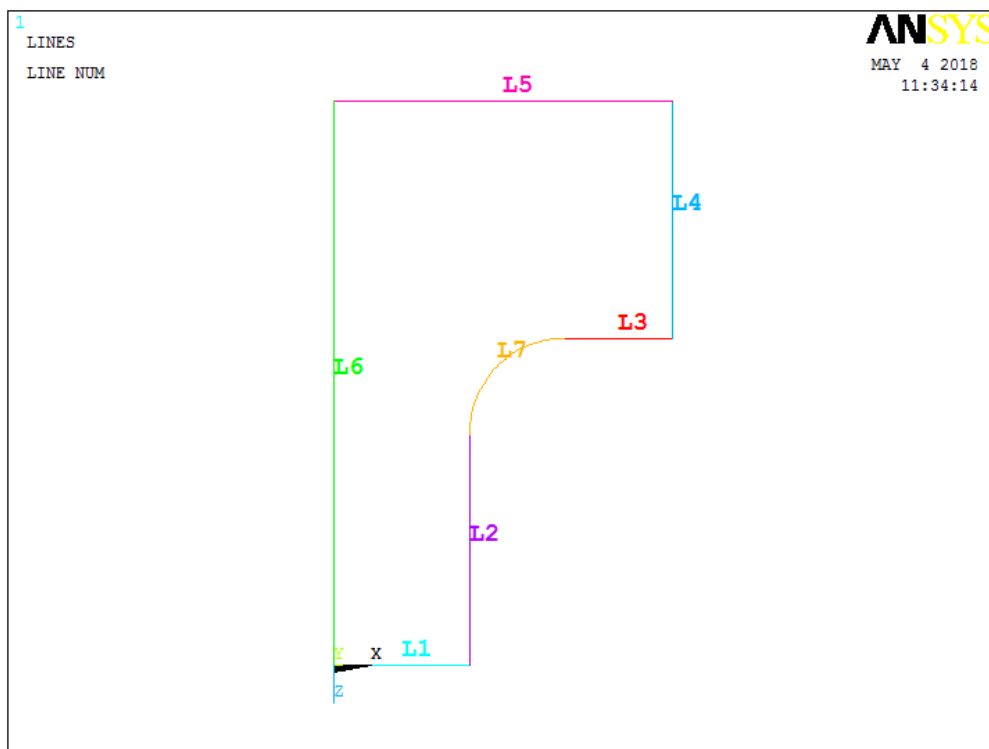


Рисунок 42 – Линии половины продольного сечения плоскостью внутреннего пространства тройника

Построение объема с учетом построенных линий проще всего сделать путем вытягивания. Для этого на первом шаге вращением линий модели ($L1$ и $L4$) вокруг линий ($L6$ и $L5$) (Рисунок 43), создадим две торцевые поверхности внутренней полости тройника. Это можно выполнить с помощью пункта

главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Operate* > *Extrude* > *Lines* > *About Axis* [3, 4].

Далее с помощью вытяжки построенной поверхности *A1* вдоль линии *L6*, поверхности *A2* вдоль линии *L5* и, в заключение, повторного вытягивания поверхности *A1* вдоль линий *L2* и *L7* создаются три объема, которые объединяются в один с помощью пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Operate* > *Booleans* > *Add* > *Volumes* [3, 4].

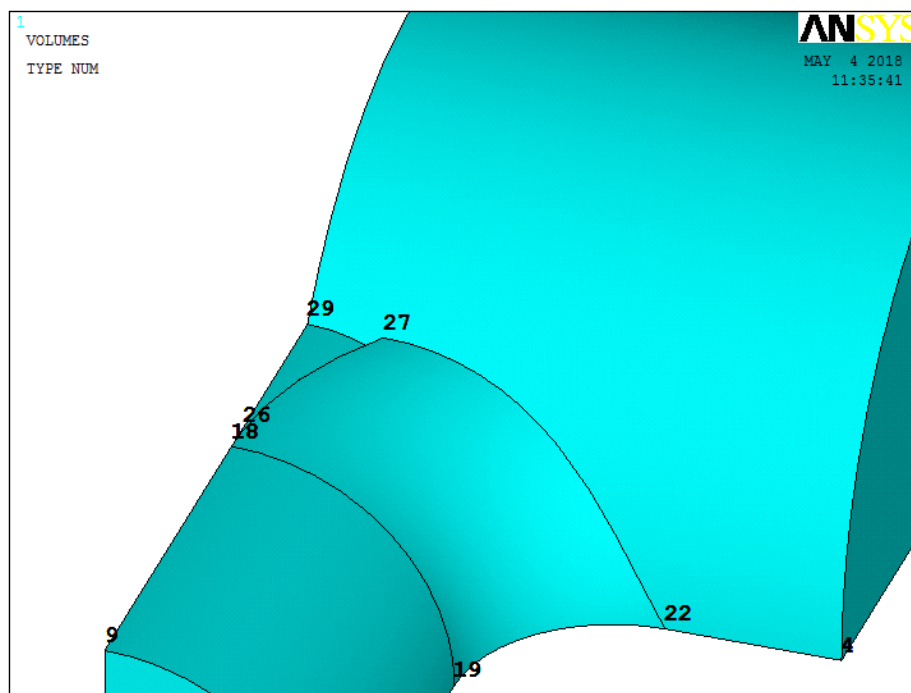


Рисунок 43 – Результат построения первичной модели внутреннего объема тройника

Далее необходимо провести вспомогательные построения для того, чтобы устранить небольшую неточность построения внутреннего объема (Рисунок 43). Для этого необходимо соединить прямой линией ключевые точки *K27* и *K29* с помощью пункта главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Create* > *Lines* > *Straight Line* [3, 4]. Будет построена линия *L13*. Далее для исправления геометрии необходимо:

- построенной линией *L13* разделить поверхность *A34* (пункт главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Operate* > *Booleans* > *Divide* > *Area by Line*) [3, 4];
- с помощью граничных линий *L13*, *L44*, *L54*, *L52* создать поверхность *A29* (пункт главного меню: *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Create* > *Areas* > *Arbitrary* > *By Lines*) [3, 4];
- с помощью граничных поверхностей *A3*, *A22*, *A29*, *A5* создать объем (пункт главного меню: *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Create* > *Volume* > *Arbitrary* > *By Areas*) [3, 4];
- сложить созданные все объемы (пункт главного меню *Main Menu* > *Preprocessor* > *Modeling* > *Operate* > *Booleans* > *Add* > *Volumes*) [3, 4].

Далее в «косметических целях» (для сокращения списка команд при задании краевых условий) складываем отдельно поверхности *A13, A27, A19, A21, A28, A31, A33, A30, A20* и отдельно поверхности *A11, A26, A24, A25* с помощью пункта главного меню (*Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas*) [3, 4].

После этого необходимо отобразить по условиям симметрии относительно плоскости *Y0Z* построенный объем с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes* [3, 4].

Далее необходимо сложить все построенные объемы с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes*, а также сложить торцевые поверхности *A12* и *A16* с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas* [3, 4].

Сжимаем нумерацию элементов модели с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > NumberingCtrls > Compress Numbers* (в появившемся меню необходимо выбрать метку *ALL*) [3, 4].

Далее строим удлинения внутреннего объема тройника за счет внутреннего объема труб с помощью пункта главного меню *Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal* [3, 4]. Необходимо указать поверхность *A5*, от которой будет вытягиваться объем, нормаль выбирается автоматически, а также указывается расстояние, на которое будет вытягиваться объем *L*. Далее те же операции проделать последовательно для поверхностей *A1* и *A2* с одним различием: для поверхности *A1* длина вытягивания должна быть отрицательной (*-L*).

Далее необходимо сложить все построенные объемы с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes*, а также сложить поверхности *A17, A16, A8, A13, A24, A25, A21, A22* с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas* [3, 4] (Таблица 37).

В заключении построения твердотельной модели снова сжимаем нумерацию элементов модели с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > NumberingCtrls > Compress Numbers* (в появившемся меню необходимо выбрать метку *ALL*) (Таблица 37).

Для управления качеством разбиения при вытягивании воспользуемся возможностью задания глобального размера элементов с помощью пункта меню: *Main Menu > Preprocessor > Meshing > SizeCtrls > ManualSize > Global > Size* [5]. В появившемся окне следует указать размер элементов, привязанный к какому-либо размеру параметрической модели. В данном случае в поле *ESIZE* укажем *D/5*. Для улучшения разбиения в качестве значения *ESIZE* следует указать гораздо меньшую величину.

Далее следует выбрать тип конечных элементов, который будет использоваться в дальнейшем при решении, в пункте главного меню *Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete*. После его использования появится окно *Element Types*, в котором следует нажать *Add*, а в следующем окне *Library of Element Types* необходимо выбрать элемент *2D FLOTRAN 142* [5] (Таблица 38).

После этого, командой построения свободного разбиения *Main Menu*> *Preprocessor*> *Meshing*> *Mesh*> *Volumes*> *Free* создается конечно-элементная модель половины внутреннего объема тройника (Рисунок 44).

Для задания краевых условий при течении жидкости во внутреннем объеме тройника также воспользуемся условиями полного прилипания [6, 44] на его боковых поверхностях (Таблица 38).

Таблица 37 – Список команд построения твердотельной модели внутреннего объема отвода

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, PipeTee, 0	25.	AROTAT, 1, , , , , 6, 1, 90, 1
2.	/PREP7	26.	AROTAT, 4, , , , , 5, 6, 180, 1
3.	D = 0.5	27.	VDRAG, 1, , , , , 6
4.	D1 = 0.3	28.	VDRAG, 2, , , , , 5
5.	r = 0.05	29.	VDRAG, 1, , , , , 2, 7
6.	H = 0.5	30.	VADD, ALL
7.	F = 0.3	31.	LSTR, 27, 29
8.	T = 0.04	32.	ASBL, 34, 13, --, DELETE
9.	T1 = 0.03	33.	AL, 13, 44, 54, 52
10.	TB = (T+T1)/2	34.	VA, 3, 22, 29, 5
11.	L = 2*D	35.	VADD, ALL
12.	V = 0.12	36.	AADD,13,27,19,21,28,31,33,30,20
13.	P = 3*(1E+5)	37.	AADD, 11, 26, 24, 25
14.	K, 1, 0, 0, 0	38.	VSYMM, X, 2, , , , , 0
15.	K, 2, D1/2-T1, 0, 0	39.	VADD, 1, 2
16.	K, 3, D1/2-T1, 0, -(H-D/2+T)	40.	AADD, 12, 16
17.	K, 4, F, 0, -(H-D/2+T)	41.	NUMCMP, ALL
18.	K, 5, F, 0, -H	42.	VOFFST, 5, L
19.	K, 6, 0, 0, -H	43.	VOFFST, 1, -L
20.	*DO, i, 1, 5	44.	VOFFST, 2, L
21.	LSTR, i, i+1	45.	VADD, ALL
22.	*ENDDO	46.	AADD, 17, 16, 8, 13, 24, 25, 21,22
23.	LSTR, 6, 1	47.	NUMCMP, ALL
24.	LFILLT, 2, 3, r+TB	48.	---

Таблица 38 – Команды построения конечно-элементного разбиения геометрической модели и задания краевых условий

№	Команда	№	Команда
1.	ESIZE, D/5	9.	DA, ALL, VX, 0, 1
2.	ET, 1, FLUID142	10.	DA, ALL, VY, 0, 1
3.	MSHAPE, 1, 3D	11.	DA, ALL, VZ, 0, 1
4.	VMESH, 1	12.	ASEL, ALL
5.	ASEL, S, AREA, , 2, 16	13.	DA, 1, VY, 0, 1
6.	ASEL, U, AREA, , 10	14.	DA, 15, VX, -V, 1
7.	ASEL, U, AREA, , 12	15.	DA, 10, PRESS, 0, 1
8.	ASEL, U, AREA, , 15	16.	DA, 12, PRESS, 0, 1

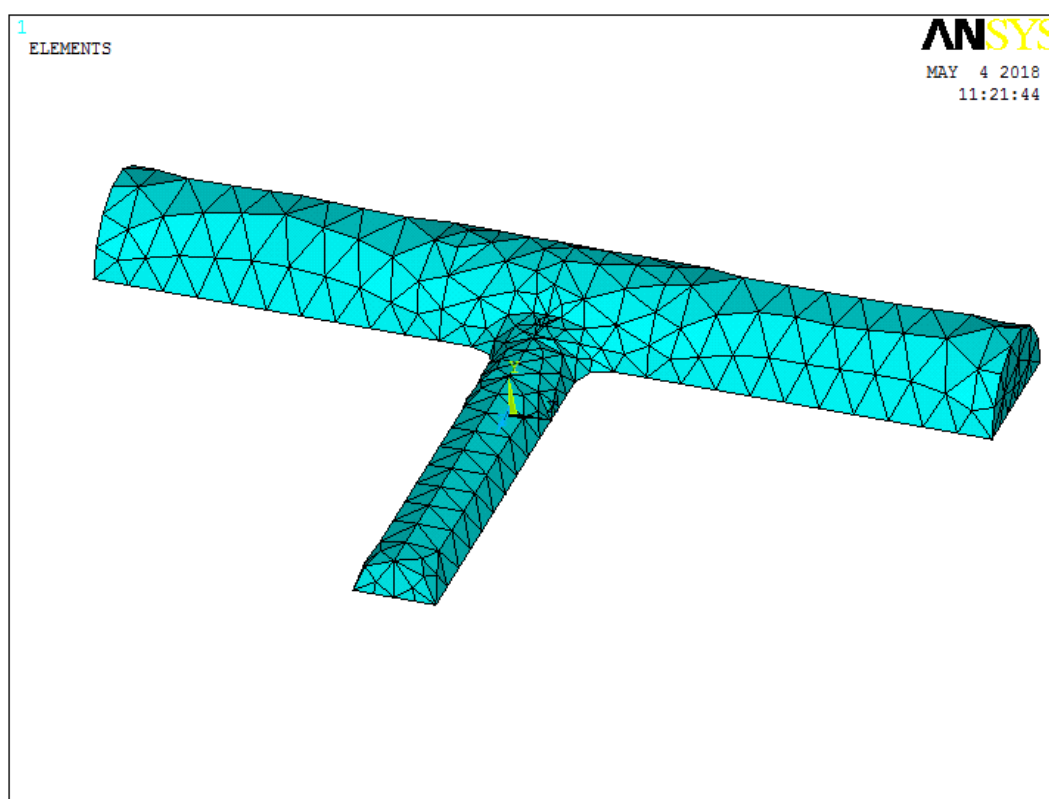


Рисунок 44 – Конечно-элементная модель половины внутреннего объема тройника

С помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Fluid/CFD > Velocity > On Areas* выбираются поверхности A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A11, A13, A14, A16 и после подтверждения выбора нажатием кнопки ОК в следующем появившемся диалоговом окне задаются равные нулю все проекции скоростей потока *Vx load value*, *Vy load value*, *Vz load value* на выбранных ранее поверхностях, при этом надо установить флаг *Yes* в поле *Apply to Boundary lines*. Нажимаем *Apply*. Выбираем поверхность A1, нажимаем ОК и задаем нулевую проекцию скорости VY нормально плоскости симметрии объема тройника. Еще раз нажимаем *Apply*. Выбираем поверхность A15 и устанавливаем

направление входного потока вдоль оси OY (V_y load value) и величину скорости потока равную параметру V .

Завершаем назначение краевых условий с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Fluid/CFD > Pressure DOF > On Areas* выбираем торцевые поверхности $A10$ и $A12$ и указываем инкремент давления по отношению к манометрическому (0) на выходе потока из тройника.

Список команд для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения геометрии отвода, создания конечно-элементной сетки и задания краевых условий приведен в таблице 38.

2.1.4. Задание физических свойств несжимаемой жидкости и параметров решателя для всех моделей внутреннего объема фитингов

Физические свойства жидкости задаются с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Fluid Properties*. В окне *Fluid Properties* необходимо указать, что значения плотности и вязкости жидкости постоянны, выбрав *Constant* в списках *Density* и *Viscosity*. В появившемся окне *CFD Flow Properties* следует указать значения плотности 1000 кг/м^3 и вязкости $0.000894 \text{ Па}\cdot\text{с}$ жидкости в полях *Density* и *Viscosity* [8].

Задание термодинамических характеристик невозмущенного потока осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Flow Environment > Ref Conditions*. В окне *Reference Conditions* следует указать необходимую величину манометрического давления P в поле *[FLDATA], PRES, REFE* (Таблица 39).

Таблица 39 – Список команд, задающих свойства воды

№	Команда
1.	FLDATA7, PROT, DENS, CONSTANT
2.	FLDATA8, NOMI, DENS, 1000
3.	FLDATA7, PROT, VISC, CONSTANT
4.	FLDATA8, NOMI, VISC, 0.000894
5.	FLDATA7, PROT, COND, CONSTANT
6.	FLDATA8, NOMI, COND, -1
7.	FLDATA7, PROT, SPHT, CONSTANT
8.	FLDATA8, NOMI, SPHT, -1
9.	FLDATA15, PRES, REFE, P

Выбор алгоритма решения поставленной задачи осуществляется с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Algorithm Cntrl*. В окне *Algorithm Control* необходимо выбрать алгоритм *Simplef*. Назначение количества итераций осуществляется с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Execution Cntrl*. В окне

Steady State Control Settings необходимо указать число итераций 500 в *Global Iterations*.

При решении задачи может возникать ошибка с указанием на то, что в решаемой матрице на определенной итерации получаются отрицательные элементы. Обойти данную ошибку можно с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Relax/Stab/Cap > MIR Stabilization*. В окне *MIR Stabilization* необходимо указать 0.99 во всех трех полях *MOME Momentum Equation*, *TEMP Energy Equation* и *TURB Turbulence Equation*, (Таблица 40).

Для запуска подготовленных решений задач тройника и отвода необходимо выбрать пункт главного меню: *Main Menu > Solution > Run FLOTRAN* (Таблица 40).

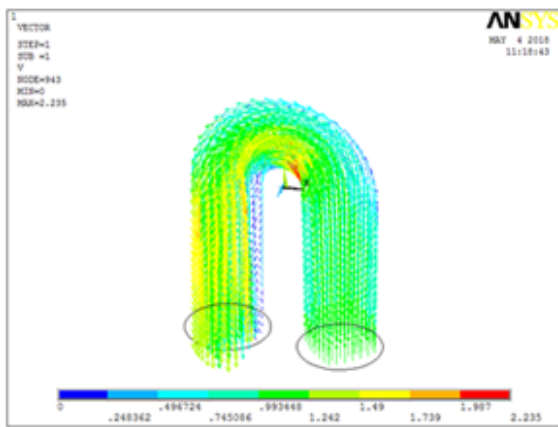
Таблица 40 – Список команд, задающих параметры решателя

№	Команда
1.	FLDATA1, SOLU, TRAN, 0
2.	FLDATA1, SOLU, TEMP, 0
3.	FLDATA1, SOLU, TURB, 1
4.	FLDATA1, SOLU, COMP, 0
5.	FLDATA24, TURB, MODL, 3
6.	FLDATA37, ALGR, SEGR, SIMPLEF
7.	FLDATA2, ITER, EXEC, 500
8.	FLDATA34, MIR, MOME, 0.99
9.	FLDATA34, MIR, TEMP, 0.99
10.	FLDATA34, MIR, TURB, 0.99
11.	FINISH
12.	/SOL
13.	SOLVE
14.	FINISH

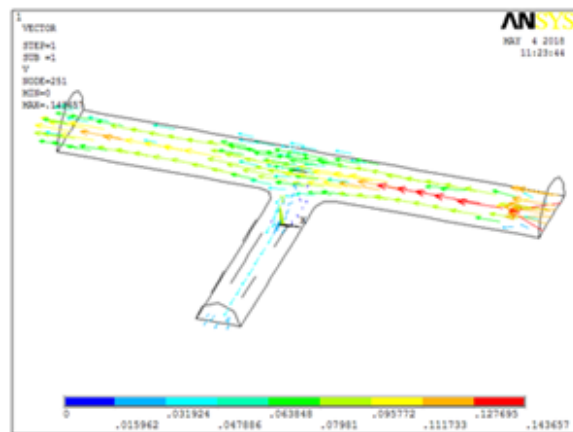
2.1.5. Чтение результатов решения задачи и их отображение

Все задачи турбулентного течения даже стационарные решаются итерационно. Поэтому, чтобы получить доступ к результатам решения, необходимо прочитать последние по времени данные решения. Выполняется это с помощью пункта меню: *Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set* [6].

Для отображения результатов в векторном виде необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined*. В появившемся окне следует выбрать требуемые результаты в списке и, если необходимо, изменить размеры векторов скоростей потока (Рисунок 45) [6].



а)



б)

Рисунок 45 – Поле скоростей в параметрических моделях отвода (а) и тройника (б)

2.1.6. Обсуждение результатов моделирования

Предложена параметрическая модель исследования вихревого стационарного течения в таких фитингах как отводы и тройники. В качестве перекачиваемой среды рассматривается вода. Установлено, что выбор радиуса отвода обуславливается требованием минимального падения давления на его выходе.

Для тройника установлено, что он вызывает существенное падение скорости потока воды. При этом если в боковой патрубке давление чуть больше, чем на втором выходе, то обыкновенный тройник может работать как вакуумный насос.

Методика может быть применена для любых конструкций фитингов, связанных с расчетом движения вязкой жидкости. Решение поставленной задачи позволяет оценить размеры областей, в которых происходит торможение потока и внести корректировки в проектную документацию.

2.2. Теоретический метод управления расходом перекачиваемой среды по положению запирающих элементов трубопроводной арматуры

До настоящего времени все гидродинамические расчеты трубопроводов проводились с использованием полуэмпирических формул, полученных в основном для ламинарного течения среды в трубопроводе, в которых присутствуют экспериментально определяемые коэффициенты с учетом чисел Рейнольдса. С помощью такого подхода учитываются разнообразные эффекты, возникающие при перекачке среды и возможного возникновения в этих случаях вихрей и других явлений, снижающих скорость движения среды.

Основной слабостью данных методик является интуитивность и сложность адекватного определения необходимых значений чисел Рейнольдса и невозможность теоретически прогнозировать расход перекачиваемой среды через запорно-регулирующую арматуру без установки дополнительных приборов учета (расходомеров), что повышает стоимость строительства и эксплуатации трубопроводов.

Кроме того, поскольку любой прибор учета является препятствием на пути среды, то установка любого дополнительного оборудования на пути перекачиваемого потока приводит к паданию давления. Хотя оно и незначительно, но многое зависит от количества приборов учета на длине трассы, что может привести к существенному увеличению затрат электроэнергии на перекачку среды.

Соответственно, одним из очевидных путей уменьшения энерго- и ресурсозатрат на эксплуатацию трубопроводного транспорта является максимальное упрощение оснащения трубопроводов (существенное снижение количества контрольно-измерительной аппаратуры), а также использование расчетно-теоретической методики управления расходом среды и ее перераспределения по потокам с помощью таких современных средств анализа вихревого течения жидкости и газа как ANSYS с модулем FLOTRAN.

Предлагаемые параметрические модели запорно-регулирующей арматуры позволят отказаться от установки дополнительных расходомеров на трассе трубопровода, а определять расход среды по геометрическому положению запирающего элемента, которое, в частности, для некоторых конструкций может определяться углом отклонения рукоятки от осевого направления потока [8].

2.2.1. Краткое описание задачи

В силу симметричности задач и необходимости экономии элементов рассматриваются параметрические трехмерные модели внутреннего объема половины шарового крана, дискового затвора, клапана и клиновой задвижки, которые получены их сечением продольной плоскостью. Во всех случаях отброшенная (симметричная) часть внутреннего объема запорно-регулирующей аппаратуры заменяется соответствующими краевыми условиями для потока (нулевыми скоростями потока в направлении перпендикулярном плоскости симметрии).

Краевая задача для исследования турбулентного течения среды в запорно-регулирующей арматуре выполнялась с учетом гипотезы о полном прилипании среды к внутренней поверхности арматуры.

Так как все строящиеся модели будут параметрическими, то перед началом построения любой из моделей необходимо ввести все перечисленные в постановке задачи параметры с их значениями.

2.2.2. Создание конечно-элементной модели внутреннего пространства шарового крана

Шаровой кран – один из самых распространенных типов запорно-регулирующей арматуры. Все краны имеют похожую (схожую) конструкцию и достаточно продемонстрировать методику на одном из вариантов исполнения запирающего элемента. В данной статье в качестве примера расчета крана выбран наиболее распространенный в настоящее время шаровой кран [48, 49].

В случае построения модели внутреннего пространства шарового крана (Рисунок 46) используются следующие параметры (Рисунок 46): $D = 1$ (м) – диаметр внутреннего пространства трубы; $d_{\text{ш}} = 0.95$ (м) – диаметр отверстия в шаровом запирающем элементе (клапане); $Fi = 45$ (градусы) – угол между плоскостями симметрии запирающего элемента и плоскостью симметрии входа и выхода из крана (Рисунок 47); $V = 0.2$ (м/с) – скорость перекачки жидкости; $P = 3 \cdot (1E+5)$ (Па) – манометрическое давление в трубопроводе.

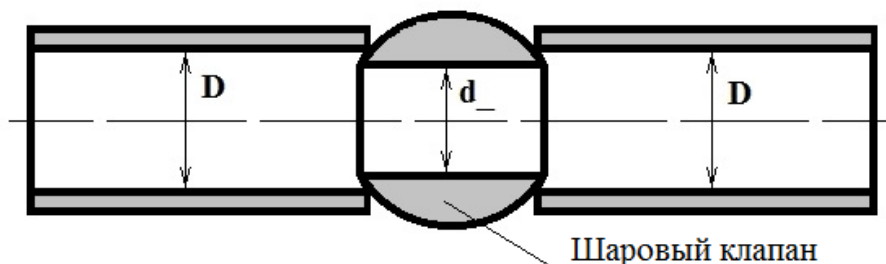


Рисунок 46 – Схема осевого сечения шарового крана вертикальной плоскостью

В данной модели радиус запирающего элемента (шарового клапана) вычисляемый параметр, хотя пользователь при необходимости может задавать его значения вручную.

Ниже приведен список команд для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства шарового крана, симметричного относительно поперечной к оси вращения запирающего элемента плоскости (Таблица 41).

Команда № 1 (Таблица 41) определяют имя решения *PipingCrane* с сохранением имен открытых файлов задачи (файла ошибок, результатов и т.д.), с которыми будет осуществляться обмен с данными.

Команды № 2-6 (Таблица 41) задают значения параметров задачи.

В команде № 7 (Таблица 41) устанавливается значение константы π с наилучшей для ANSYS точностью.

Команда № 8 (Таблица 41) содержит команду входа в препроцессор.

Команды № 9-24 (Таблица 41) производят построение верхней половины объема шарового крана посредством:

- создания полуцилиндров (команды № 9-11, Таблица 41);
- создания шара (команда № 12, Таблица 41);

- удаления внутреннего объема шара с сохранением его поверхности (команда № 13, Таблица 41);
- удаления ненужной полусферы вместе со вспомогательными линиями и ключевыми точками (команда № 14, Таблица 41);
- деления полуцилиндра, имитирующего отверстие в шаровом кране с помощью построенной на предыдущих шагах полусферы (команда № 15, Таблица 41);
- удаления ненужных объемов, полученных после проведения последней операции (команда № 16, Таблица 41);
- смены глобальной системы координат на цилиндрическую (команда № 17, Таблица 41);
- поворота полуцилиндра, имитирующего отверстие в запирающем элементе на заданный угол FI (команда № 18, Таблица 41);
- активизация глобальной декартовой системы координат (команда № 19, Таблица 41);
- изменение точности проведения построений (команда № 20, Таблица 41);
- сложения объемов (команда № 21, Таблица 41);
- возвращение точности выполнения операций «по умолчанию» (команда № 22, Таблица 41);
- сложения поверхностей в плоскости симметрии крана (Рисунок 47), для упрощения задания краевых условий (команда № 23, Таблица 41);
- сжатие нумерации всех геометрических компонент модели (команда № 24, Таблица 41).

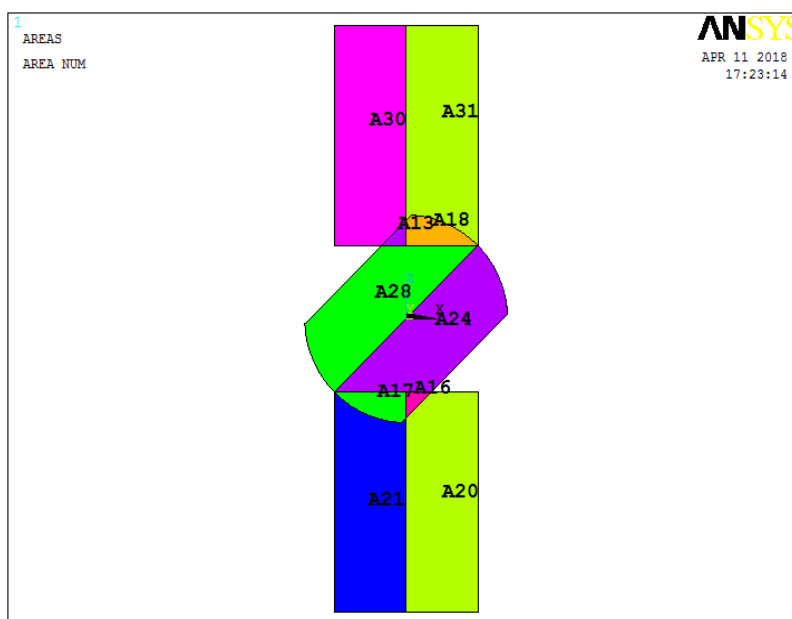


Рисунок 47 – Осевое сечение шарового крана горизонтальной плоскостью

Далее приводятся команды № 25-28 (Таблица 41) создания конечно-элементной сетки.

Команда № 25 (Таблица 41) выбирает объемный элемент для моделирования течения среды *FLUID142*.

Команда № 26 (Таблица 41) устанавливает параметр *SMRTSIZE* для автоматического контроля точности построения свободного разбиения.

Команда № 27 (Таблица 41) устанавливает параметр, свидетельствующий, что разбиение будет выполнено пирамидальными элементами.

Команда № 28 (Таблица 41) строит свободное разбиение созданной ранее геометрической модели (Рисунок 48).

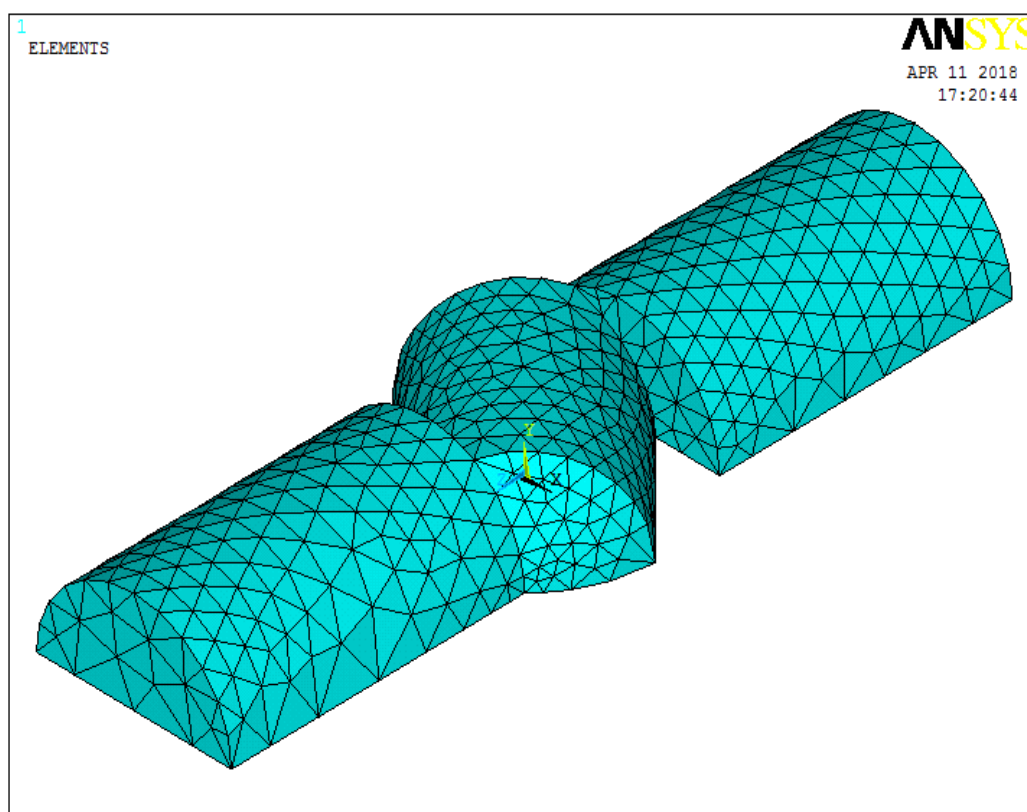


Рисунок 48 – Конечно-элементная модель половины внутреннего объема шарового крана

Заканчивают список команд команды № 29-36 (Таблица 41) задания краевых условий.

Команды № 29-32 (Таблица 41) выбирают внешние поверхности модели и задают краевые условия прилипания.

Команда № 33 (Таблица 41) отменяет выбор внешних поверхностей.

Команда № 34 (Таблица 41) задает краевое условие, соответствующее симметрии задачи.

Команды № 35 и 36 (Таблица 41) задают краевые условия на входе и выходе крана.

Таблица 41 – Список команд построения конечно-элементной модели внутреннего объема шарового крана

№	Команда	№	Команда
1.	/FILNAME, PipingCrane, 0	19.	CSYS, 0
2.	D = 1	20.	BTOL, 0.10E-5
3.	d_ = 0.95	21.	VADD, 1, 6, 2
4.	Fi = 45	22.	BTOL, DEFA
5.	V = 0.2	23.	AADD, 20, 21, 16, 17, 24, 28, 18, 13, 31, 30
6.	P = 3*(1E+5)	24.	NUMCMP, ALL
7.	Pi = ACOS(-1)	25.	ET, 1, FLUID142
8.	/PREP7	26.	SMRTSIZE, 4
9.	CYLIND, D/2, 0, -D/2, -2*D, 0, 180	27.	MSHAPE, 1, 3D
10.	CYLIND, D/2, 0, D/2, 2*D, 0, 180	28.	VMESH, 1
11.	CYLIND, d_/2, 0, -D/2/COS(45/180*PI), D/2/COS(45/180*PI), 0, 180	29.	ASEL, S, AREA, , 4, 10
12.	SPH4, 0, 0, D/2/COS(45/180*PI)	30.	DA, ALL, VX, 0, 1
13.	VDELE, 4,, 0	31.	DA, ALL, VY, 0, 1
14.	ADELE, 17,, 1	32.	DA, ALL, VZ, 0, 1
15.	VSBA, 3, 16, , DELETE, DELETE	33.	ASEL, ALL
16.	VDELE, 4, 5, 1, 1	34.	DA, 2, VY, 0, 1
17.	CSYS, 5	35.	DA, 3, VZ, -V, 1
18.	VGEN, 2, 6, , , , FI, , , , 1	36.	DA, 1, PRESS, 0, 1

2.2.3. Создание конечно-элементной модели половины внутреннего пространства дискового затвора, симметричного относительно горизонтальной плоскости

Дисковый затвор — тип трубопроводной арматуры, в котором запирающий или регулирующий элемент имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной или расположенной под углом к направлению потока рабочей среды [48, 49] (Рисунок 49).

Для построения модели симметричной половины внутреннего объема дискового затвора (Рисунок 49) с плоскоскошенным диском используются следующие параметры: $D = 1$ (м) – внутренний проходной диаметр дискового затвора и самого диска; $H_{MAX} = 0.1$ (м) – максимальная толщина плоско скошенного диска в середине; $H_{MIN} = 0.03$ (м) – минимальная толщина диска на его краях; $Fi = 45$ (градусы) – угол открытия диска; $L = 2*D$ – расстояние от входного сечения до диска затвора и от диска затвора до выходного сечения в модели; $V = 0.5$ (м/с) – скорость перекачки жидкости; $P = 3*(1E+5)$ (Па) – манометрическое давление в трубопроводе.

При построении модели дискового затвора используются четыре вспомогательные ключевые точки (Таблица 42).



Рисунок 49 – Крупный затвор с плоскоскошенным диском [50]

Таблица 42 – Координаты точек для построения половины продольного сечения внутреннего пространства дискового затвора

KP	X-Loc	Y-Loc	Z-Loc
1	0	0	-H_MAX/2
2	D/2	0	-H_MIN/2
3	D/2	0	H_MIN/2
4	0	0	H_MAX/2

Ниже приведен список команд (Таблица 43) для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства затвора с плоско скошенным диском, симметричного относительно продольной горизонтальной плоскости (Рисунок 49).

Команда № 1 (Таблица 43) определяют имя файла решения *ButterflyValve*. Команды № 2-8 (Таблица 43) задают значения параметров задачи.

В команде № 9 (Таблица 43) устанавливается значение константы π с наилучшей для ANSYS точностью.

Команда № 10 (Таблица 43) содержит команду входа в препроцессор.

Команды № 11-36 (Таблица 43) производят построение верхней половины объема шарового крана посредством:

- создания четырех ключевых точек (команды № 11-14, Таблица 43) с известными координатами (Таблица 42);
- симметричного отображения двух точек (команда № 15, Таблица 43);
- создания поверхности по ключевым точкам (команда № 16, Таблица 43);
- создания полуцилиндра, имитирующего затвор (команда № 17, Таблица 43);
- вытягивания объема из предварительно созданной по ключевым точкам поверхности (команда № 18, Таблица 43);
- деления полуцилиндра, имитирующего затвор, боковыми поверхностями, созданного объема (команды № 19-22, Таблица 43);
- удаления ненужных объемов, полученных после проведения последних операций, вместе с их поверхностями, ребрами и ключевыми точками (команда № 23, Таблица 43);
- создания цилиндра (Рисунок 50), соответствующего вертикальному валу затвора (команда № 24, Таблица 43);
- включения глобальной цилиндрической системы координат и поворота цилиндра, имитирующего вал запирающего элемента на угол 90° (команды № 25-28, Таблица 43);
- активизации глобальной декартовой системы координат (команда № 29, Таблица 43);
- сложения построенных объемов затвора и вала (команда № 30, Таблица 43);
- включения глобальной цилиндрической системы координат и поворота затвора на заданный угол FI (команды № 31 и 32, Таблица 43);
- активизации глобальной декартовой системы координат (команда № 33, Таблица 43);
- построения полуцилиндра внутреннего объема (команда № 34, Таблица 43);
- вычитания из объема построенного цилиндра объема, моделирующего затвор (команда № 35, Таблица 43);
- сжатия нумерации всех геометрических компонент модели (команда № 36, Таблица 43).

Далее приводятся команды № 37-41 (Таблица 43) создания конечно-элементной сетки. Команда № 37 (Таблица 43) выбирает объемный элемент для моделирования течения среды *FLUID142*. Команда № 38 (Таблица 43) установления параметра *SMRTSIZE* для автоматического контроля точности построения свободного разбиения (большое значение этого параметра гарантирует малое количество элементов, соответствующее учебной версии ANSYS 10 ED). Команда № 39 (Таблица 43) устанавливает ориентировочный размер ребра элемента относительно величины параметра *D* модели. Команда № 40 (Таблица 43) устанавливает параметр, свидетельствующий, что

разбиение буде выполнено пирамидальными элементами. Команда № 41 (Таблица 43) выполняет разбиение построенного объема (Рисунок 51).

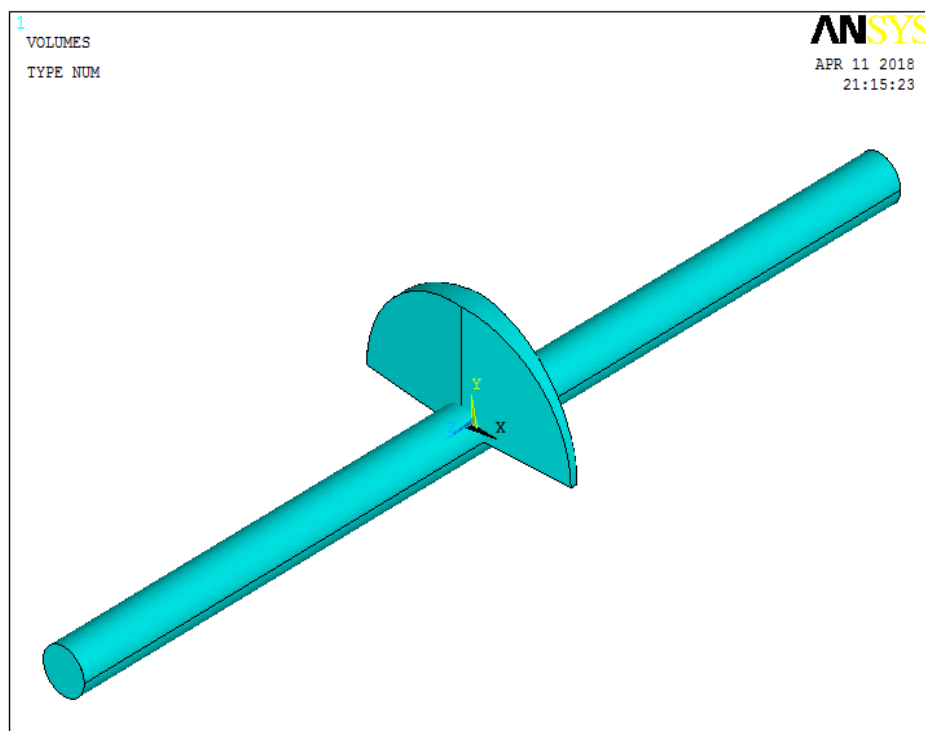


Рисунок 50 – Начальное положение плоско скошенного затвора и его вала

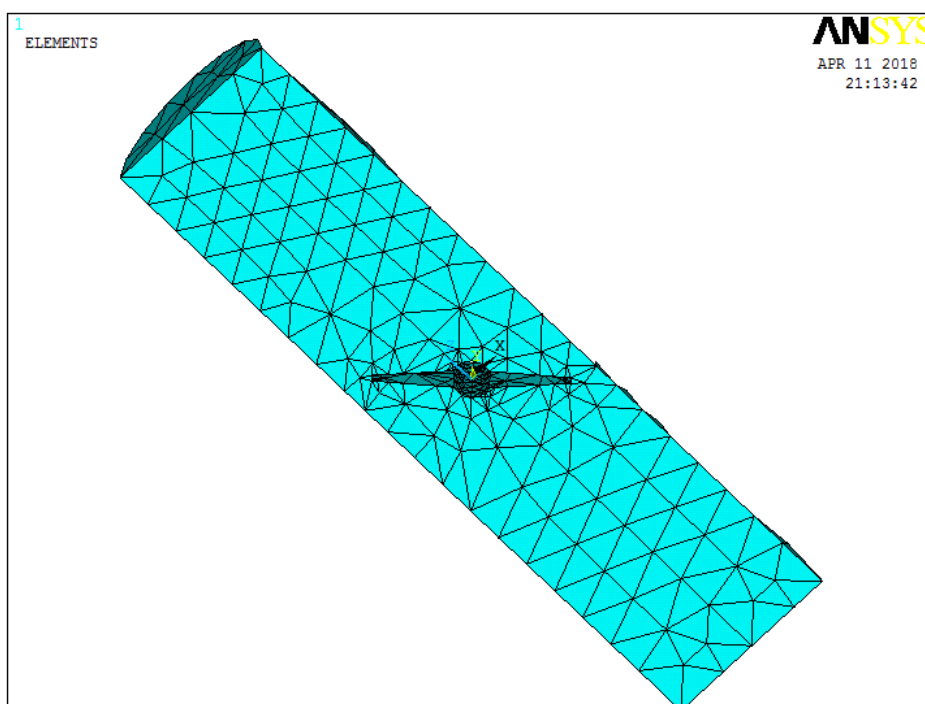


Рисунок 51 – Конечно-элементная модель половинного внутреннего объема дискового затвора

Таблица 43 – Список команд построения конечноэлементной модели внутреннего объема дискового затвора

№	Команда	№	Команда
1.	/FILNAME, ButterflyValve, 0	33.	CSYS, 0
2.	D = 1	34.	CYLIND, D/2, 0, -L, L, 0, 180
3.	Fi = 45	35.	VSBV, 1, 2, , DELETE, DELETE
4.	H_MAX = 0.1	36.	NUMCMP, ALL
5.	H_MIN = 0.03	37.	ET, 1, FLUID142
6.	L = 2*D	38.	SMRTSIZE, 8
7.	V = 0.5	39.	ESIZE, D/5
8.	P = 3*(1E+5)	40.	MSHAPE, 1, 3D
9.	Pi = ACOS(-1)	41.	VMESH, ALL
10.	/PREP7	42.	ASEL, S, AREA, , 3, 12, 1, 1
11.	K, 1, 0, 0, -H_MAX/2	43.	NSLA, S, 1
12.	K, 2, D/2, 0, -H_MIN/2	44.	D, ALL, VX, 0
13.	K, 3, D/2, 0, H_MIN/2	45.	D, ALL, VY, 0
14.	K, 4, 0, 0, H_MAX/2	46.	D, ALL, VZ, 0
15.	KSYMM, X, 2, 3, 1	47.	ASEL, ALL
16.	A, 1, 2, 3, 4, 6, 5	48.	NSEL, ALL
17.	CYLIND, D/2, 0, -H_MAX/2, H_MAX/2, 0, 180	49.	ASEL, S, AREA, , 15, , , 1
18.	VOFFST, 1, -D	50.	NSLA, S, 1
19.	VSBA, 1, 11, , DELETE, KEEP	51.	D, ALL, VX, 0
20.	VSBA, 4, 10, , DELETE, KEEP	52.	D, ALL, VY, 0
21.	VSBA, 5, 8, , DELETE, KEEP	53.	D, ALL, VZ, 0
22.	VSBA, 6, 13, , DELETE, KEEP	54.	ASEL, ALL
23.	VDELE, 1, 5, , 1, 1	55.	NSEL, ALL
24.	CYLIND, 0.2*D/2, 0, -L, L, 0, 360	56.	ASEL, S, AREA, , 13, 14, , 1
25.	CSYS, 5	57.	NSLA, S, 1
26.	VGEN, 2, 1, , , , 90, , , , 1	58.	D, ALL, VY, 0
27.	CSYS, 1	59.	ASEL, ALL
28.	VGEN, 2, 1, , , , 90, , , , 1	60.	NSEL, ALL
29.	CSYS, 0	61.	ESEL, ALL
30.	VADD, ALL	62.	DA, 2, VZ, -V, 1
31.	CSYS, 5	63.	DA, 1, PRESS, 0, 1
32.	VGEN, 2, 2, , , , FI, , , , 1	64.	---

Заканчивают список команд команды № 42-61 (Таблица 43) задания краевых условий на узлах конечноэлементной сетки и далее идут две команды № 62 и 63 задания краевых условий на поверхностях, имитирующих вход и выход модели. Это существенно отличает данную модель от предыдущей, т.к. в данном случае краевые условия задаются непосредственно на компонентах конечноэлементного разбиения, а не на компонентах геометрической модели.

Команды № 42-53 (Таблица 43) выбирают внешние поверхности модели и узловые точки конечноэлементного разбиения, находящиеся на этих поверхностях, для задания на них краевых условий прилипания. Команды № 54 и 55 (Таблица 43) отменяют выбор внешних поверхностей и узловых точек на них. Команды № 56-58 выбирают поверхность плоскости симметрии и узловые точки на ней для определения краевого условия, соответствующего симметрии данной задачи. Команды № 59-61 (Таблица 43) отменяют выбор поверхностей на плоскости симметрии, узловых точек и элементов на них. Команды № 62 и 63 (Таблица 43) задают краевые условия на входе и выходе дискового затвора.

2.2.4. Создание конечно элементной модели внутреннего пространства клиновой задвижки

Задвижка – промышленная трубопроводная арматура, в которой запорный орган перемещается возвратно-поступательно перпендикулярно оси потока рабочей среды [41, 42]. Возможно применение задвижек для двухпозиционного (дискретного) регулирования потока рабочей среды. Перекрытие в задвижках осуществляется за счет запорного элемента, перегораживающего поток. В данной статье рассматривается клиновая задвижка (Рисунок 52).

Для построения модели внутреннего объема клиновой задвижки (Рисунок 52) используются следующие параметры: $D = 1$ (м) – внутренний входной и выходной диаметр трубы; $H = 1$ (м) – высота клина; $h_ = D$ (м) – высота параллельной части задвижки; $POSITION = 0.5 * H$ (м) – положение задвижки относительно полного закрытия; $L = 0.05$ (м) – минимальная толщина клина; $Fi = 5$ (градусов) – угол наклона боковых плоскостей задвижки; $V = 0.5$ (м/с) – скорость перекачки жидкости; $P = 3 * (1E+5)$ (Па) – манометрическое давление в трубопроводе (Рисунок 52).

При построении модели клиновой задвижки используются шесть вспомогательных ключевых точек (Таблица 44).

Ниже приведен список команд (Таблица 45) для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства клиновой задвижки, симметричного относительно продольной вертикальной плоскости (Рисунок 52).

Команда № 1 (Таблица 45) определяют имя файла решения *WedgeGateValve*.

Команды № 2-9 (Таблица 45) задают значения параметров задачи.

В команде № 10 (Таблица 45) устанавливается значение константы π с наилучшей для ANSYS точностью.

Команда № 11 (Таблица 45) содержит команду входа в препроцессор.

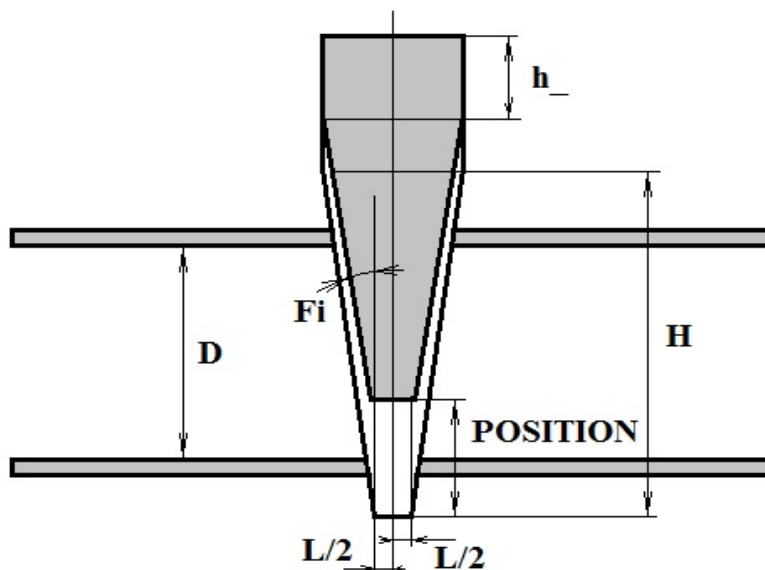


Рисунок 52 – Клиновья задвижка

Таблица 44 – Координаты точек для построения половины продольного сечения внутреннего пространства клиновья задвижки

КР	X-Loc	Y-Loc	Z-Loc
1	0	-H/2	-L/2
2	0	-H/2	L/2
3	0	H/2	$L/2 + H \cdot \tan(FI/180 \cdot \pi)$
4	0	H/2	$L/2 + H \cdot \tan(FI/180 \cdot \pi)$
5	0	H/2	$-L/2 - H \cdot \tan(FI/180 \cdot \pi)$
6	0	H/2	$-L/2 - H \cdot \tan(FI/180 \cdot \pi)$

Команды № 12-32 (Таблица 45) производят построение половины объема клиновья задвижки посредством:

- создания шести ключевых точек, образующих профиль клиновья задвижки (команды № 12-17, Таблицы 44 и 45);
- построения линий, соединяющих построенные ключевые точки с использованием оператора цикла (команды № 18-21, Таблица 45);
- создания поверхности профиля задвижки по линиям (команда № 22, Таблица 45);
- вытягивание профиля задвижки (команда № 23, Таблица 45);
- построение вспомогательной четверти цилиндра (команда № 24, Таблица 45);
- деления объема, построенного вытягиванием боковой плоскостью четверти цилиндра (команды № 25, Таблица 45);

- удаления ненужных объемов, полученных после проведения последних операций, вместе с их поверхностями, ребрами и ключевыми точками (команда № 26, Таблица 45);
- сжатия нумерации всех геометрических компонент модели (команда № 27, Таблица 45);
- создания копии объема, соответствующего задвижке на заданном расстоянии *POSITION* (команда № 28, Таблица 45);
- построения полуцилиндра внутреннего объема (команда № 29, Таблица 45);
- сложения первого и третьего (последнего) объемов (команда № 30, Таблица 45);
- вычитания из результата сложения второго объема, построенного сдвигом и моделирующего положение задвижки (команда № 31, Таблица 45);
- сложение боковых поверхностей вертикального сечения задвижки для упрощения задания краевых условий (команда № 32, Таблица 45).

Далее приводятся команды № 33-37 (Таблица 45) создания конечноэлементной сетки (Рисунок 53). Их описание полностью соответствует предыдущему примеру (команды № 37-41, Таблица 43).

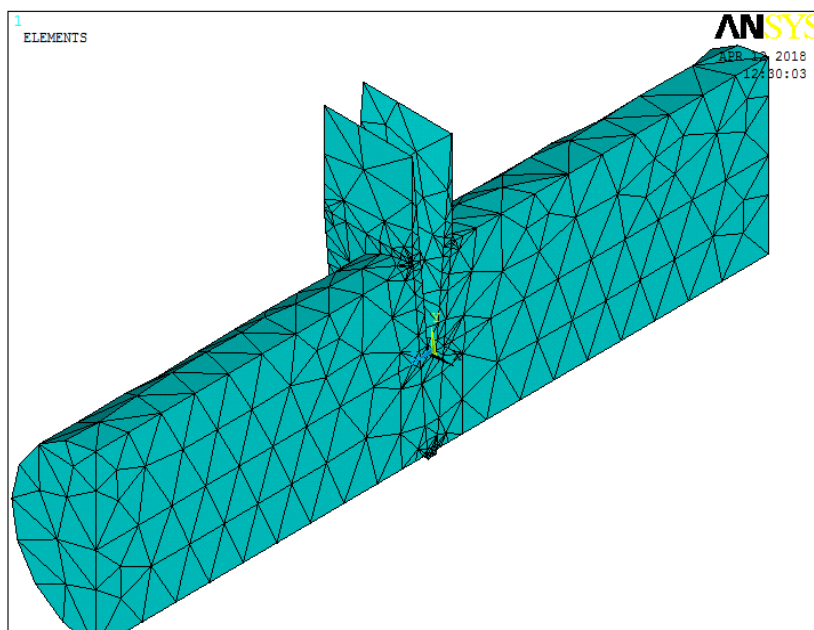


Рисунок 53 – Конечно-элементное разбиение модели половины внутреннего объема клиновой задвижки

Заканчивают список команды № 38-55 (Таблица 45) задания краевых условий на компонентах геометрической модели. Команды № 38-45 (Таблица 45) выбирают внешние поверхности модели для задания на них краевых условий прилипания. Команда № 46 (Таблица 45) отменяет выбор внешних поверхностей. Команды № 47-52 (Таблица 45) выбирают поверхности плоскости

симметрии для определения краевого условия, соответствующего симметрии данной задачи. Команда № 53 (Таблица 45) отменяет выбор поверхностей на плоскости симметрии. Команды № 54 и 55 (Таблица 45) задают краевые условия на входе и выходе клиновой задвижки.

Таблица 45 – Список команд построения конечноэлементной модели и задания краевых условий внутреннего объема клиновой задвижки

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME,WedgeGateValve,0	29.	CYLIND,D/2,0,-2*D,2*D,90,270
2.	D = 1	30.	VADD, 1, 3
3.	H = 1.05	31.	VSBV, 4, 2, , DELETE, DELETE
4.	h_ = D	32.	AADD, 20, 19, 36, 7, 21
5.	Fi = 5	33.	ET, 1, FLUID142
6.	V = 0.5	34.	SMRTSIZE, 8
7.	L = 0.05	35.	ESIZE, D/5
8.	POSITION = 0.5*H	36.	MSHAPE, 1, 3D
9.	P = 3*(1E+5)	37.	VMESH, 1
10.	Pi = ACOS(-1)	38.	ASEL, S, AREA, , 32, 35, 1
11.	/PREP7	39.	ASEL, A, AREA, , 37
12.	K, 1, 0, -H/2, -L/2	40.	ASEL, A, AREA, , 5, 6, 1
13.	K, 2, 0, -H/2, L/2	41.	ASEL, A, AREA, , 1, 10, 9
14.	K, 3, 0, H/2, L/2+H*TAN(FI/180*PI)	42.	ASEL, A, AREA, , 25, 26, 1
15.	K, 4, 0, H/2 + h_, L/2 + H*TAN(FI/180*PI)	43.	DA, ALL, VX, 0, 1
16.	K, 5, 0, H/2 + h_, -L/2 - H*TAN(FI/180*PI)	44.	DA, ALL, VY, 0, 1
17.	K, 6, 0, H/2, -L/2 - H*TAN(FI/180*PI)	45.	DA, ALL, VZ, 0, 1
18.	*DO, i, 1, 5	46.	ASEL, ALL
19.	LSTR, i, i+1	47.	ASEL, S, AREA, , 23, 24, 1
20.	*ENDDO	48.	ASEL, A, AREA, , 27, 28, 1
21.	LSTR, 6, 1	49.	ASEL, A, AREA, , 2
22.	AL, 1, 2, 3, 4, 5, 6	50.	DA, ALL, VX, 0, 1
23.	VOFFST, 1, H/2	51.	DA, ALL, VX, 0, 1
24.	CYLIND, H/2, 0, -H,H,180,270	52.	DA, ALL, VX, 0, 1
25.	VSBA, 1, 11, , DELETE, DELETE	53.	ASEL, ALL
26.	VDELE, 2, 3, 1, 1	54.	DA, 18, VZ, -V, 1
27.	NUMCMP, ALL	55.	DA, 17, PRESS, 0, 1
28.	VGEN, 2, 1, , , , POSITION	56.	----

2.2.5. Создание конечно элементной модели внутреннего пространства углового клапана

Клапан – промышленная трубопроводная арматура, в которой запорный или регулирующий орган перемещается возвратно-поступательно параллельно оси потока рабочей среды (Рисунок 54) [48, 49]. До 1981 года клапан, в котором запирающий элемент перемещается с помощью винтовой пары и управляется вручную, обычно называли вентилем. Сейчас термин «вентиль» не допускается к использованию ГОСТом [51].

Для построения модели внутреннего объема углового клапана (Рисунок 54) используются следующие параметры: $D = 0.5$ (м) – внутренний диаметр трубы; $D1 = 0.6$ (м) – диаметр камеры клапана; $D2 = 0.55$ (м) – диаметр запирающего элемента клапана; $D3 = 0.1$ (м) – диаметр стержня запирающего элемента; $H = 0.1$ (м) – высота запирающего элемента стержня; $H1 = D + 2 * H$ – высота камеры; $POSITION = 2 * H$ – положение запирающего элемента относительно крайнего нижнего состояния «полностью перекрыто»; $L = 2 * D$ – длина трубы; $V = 0.5$ (м/с) – скорость перекачки жидкости; $P = 3 * (1E+5)$ (Па) – манометрическое давление в трубопроводе.

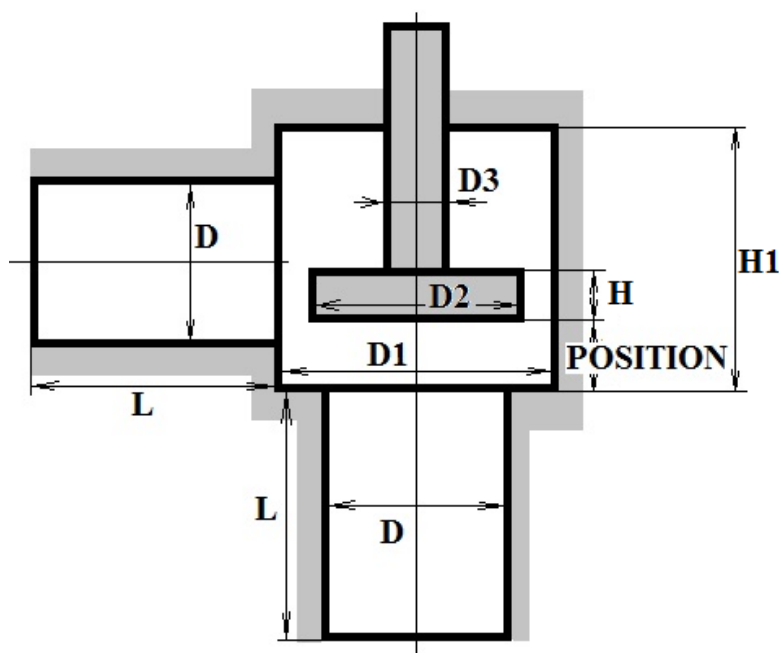


Рисунок 54 – Разрез углового клапана

Ниже приведен список команд (Таблица 46) для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства углового клапана (Рисунок 54), симметричного относительно продольной вертикальной плоскости.

Команда № 1 (Таблица 46) определяют имя файла решения Valve.

Команды № 2-11 (Таблица 46) задают значения параметров задачи.

В команде № 12 (Таблица 46) устанавливается значение константы π с наилучшей для ANSYS точностью.

Команда № 13 (Таблица 46) содержит команду входа в препроцессор.

Команды № 14-26 (Таблица 46) производят построение половины объема клиновой задвижки посредством:

- создания трех полуцилиндров (команды № 14-16, Таблица 46);
- переключения в цилиндрическую систему координат (команда № 17, Таблица 46);
- поворота одного из полуцилиндров (команда № 18, Таблица 46);
- возвращения в глобальную декартову систему координат (команда № 19, Таблица 46);
- смещения поворачиваемого полуцилиндра (команда № 24, Таблица 46);
- создания двух вспомогательных полуцилиндров, имитирующих запирающий элемент на валу (команды № 21-22, Таблица 46);
- сложения первых трех полуцилиндров, имитирующих внутренний объем углового клапана (команда № 23, Таблица 46);
- сложения последних двух полуцилиндров, имитирующих запирающий элемент и вал (команда № 24, Таблица 46);
- сдвига запирающего элемента в положение *-POSITION* (команда № 25, Таблица 46);
- вычитание объема запирающего элемента из внутреннего объема клапана (команда № 26, Таблица 46).

Далее приводятся команды № 27-31 (Таблица 46) создания конечно-элементной сетки (Рисунок 55). Их описание полностью соответствует предыдущему примеру (команды № 37-41, Таблица 43).

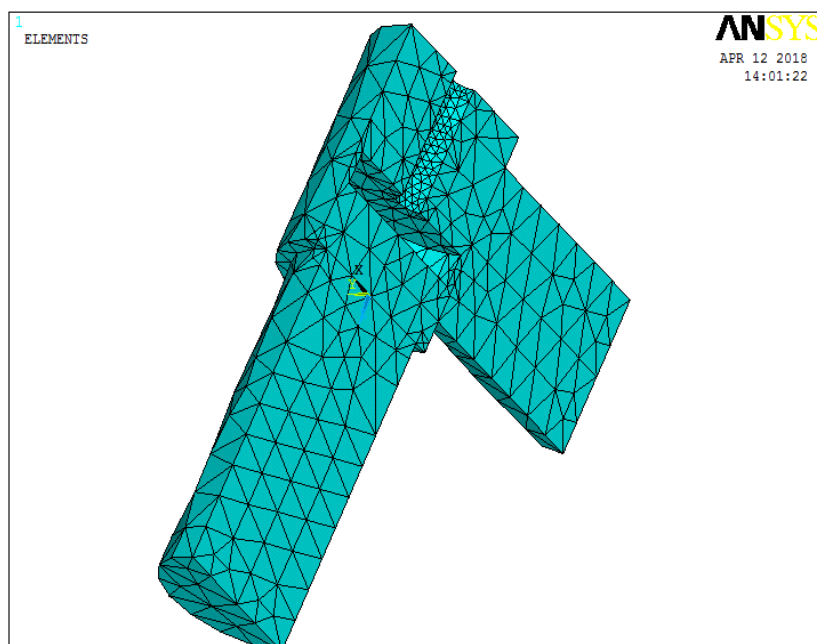


Рисунок 55 – Конечно-элементное разбиение модели половины внутреннего объема углового клапана

Таблица 46 – Построение конечноэлементной модели объема углового клапана

№	Команда
1.	/FILENAME, Valve, 0
2.	D = 0.5
3.	D1 = 0.6
4.	D2 = 0.55
5.	D3 = 0.1
6.	H = 0.1
7.	H1 = D+2*H
8.	L = 2*D
9.	POSITION = 2*H
10.	V = 0.5
11.	P = 3*(1E+5)
12.	Pi = ACOS(-1)
13.	/PREP7
14.	CYLIND, D/2, 0, L, 0, 0, 180
15.	CYLIND, D1/2, 0, 0, -H1, 0, 180
16.	CYLIND, D/2, 0, L, 0, 0, 180
17.	CSYS, 5
18.	VGEN, 2, 3, , , , 270, , , , 1
19.	CSYS, 0
20.	VGEN, 2, 3, , , , -(H+D/2), , , 1
21.	CYLIND, D2/2, 0, 0, -H, 0, 180
22.	CYLIND, D3/2, 0, -H/2, -L, 0, 180
23.	VADD, 1, 2, 3
24.	VADD, 4, 5
25.	VGEN, 2, 1, , , , -POSITION, , , 1
26.	VSBV, 6, 1, , DELETE, DELETE
27.	ET, 1, FLUID142
28.	SMRTSIZE, 8
29.	ESIZE, D/5
30.	MSHAPE, 1, 3D
31.	VMESH, ALL
32.	ASEL, S, AREA, , 1, 3, 2, 1
33.	NSLA, S, 1
34.	D, ALL, VX, 0
35.	D, ALL, VY, 0
36.	D, ALL, VZ, 0
37.	ASEL, ALL
38.	NSEL, ALL
39.	ASEL, S, AREA, , 17, 18, 1, 1
40.	NSLA, S, 1
41.	D, ALL, VX, 0
42.	D, ALL, VY, 0
43.	D, ALL, VZ, 0
44.	ASEL, ALL
45.	NSEL, ALL
46.	ASEL, S, AREA, , 15, 20, 5, 1
47.	NSLA, S, 1
48.	D, ALL, VX, 0

№	Команда
49.	D, ALL, VY, 0
50.	D, ALL, VZ, 0
51.	ASEL, ALL
52.	NSEL, ALL
53.	ASEL, S, AREA, , 28, 34, 6, 1
54.	NSLA, S, 1
55.	D, ALL, VX, 0
56.	D, ALL, VY, 0
57.	D, ALL, VZ, 0
58.	ASEL, ALL
59.	NSEL, ALL
60.	ASEL, S, AREA, , 26, , , 1
61.	NSLA, S, 1
62.	D, ALL, VX, 0
63.	D, ALL, VY, 0
64.	D, ALL, VZ, 0
65.	ASEL, ALL
66.	NSEL, ALL
67.	ASEL, S, AREA, , 4, 5, 1, 1
68.	NSLA, S, 1
69.	D, ALL, VY, 0
70.	ASEL, ALL
71.	NSEL, ALL
72.	ASEL, S, AREA, , 22, 23, 1, 1
73.	NSLA, S, 1
74.	D, ALL, VY, 0
75.	ASEL, ALL
76.	NSEL, ALL
77.	ASEL, S, AREA, , 29, 30, 1, 1
78.	NSLA, S, 1
79.	D, ALL, VY, 0
80.	ASEL, ALL
81.	NSEL, ALL
82.	ASEL, S, AREA, , 16, 19, 3, 1
83.	NSLA, S, 1
84.	D, ALL, VY, 0
85.	ASEL, ALL
86.	NSEL, ALL
87.	ASEL, S, AREA, , 33, , , 1
88.	NSLA, S, 1
89.	D, ALL, VY, 0
90.	ASEL, ALL
91.	NSEL, ALL
92.	NSEL, ALL
93.	ESEL, ALL
94.	DA, 2, VZ, -V, 1
95.	DA, 12, PRESS, 0, 1
96.	----

Заканчивают список команды № 32-93 (Таблица 46) задания краевых условий на узлах конечноэлементной сетки и далее идут две команды № 94 и 95 задания краевых условий на поверхностях, имитирующих вход и выход клапана. Отметим, что описание команд № 32-93 (Таблица 46) полностью соответствует описанию команд № 42-61 (Таблица 43). При этом задание краевых условий командами № 94 и 95 (Таблица 46) неоднократно комментировалось в предыдущих примерах.

2.2.6. Задание физических свойств несжимаемой жидкости и параметров решателя для всех типов конструкций запорной арматуры

Физические свойства жидкости задаются с помощью команд задания свойств жидкости, а также манометрического давления (Таблица 39). В частности, команды указывают значение плотности 1000 кг/м^3 и вязкости $0.000894 \text{ Па}\cdot\text{с}$ жидкости [8].

Задание термодинамических характеристик невозмущенного потока осуществляется «по умолчанию». С помощью команды № 9 (Таблица 39) указывается необходимая величина манометрического давления P .

Подготовительные мероприятия перед решением поставленных краевых задач течения жидкости и решение задачи

Задание стационарной и вихревой модели течения жидкости необходимо осуществить с помощью команд с 1 по 5 (Таблица 40). В 6-й команде (Таблица 40) приводится команда выбора алгоритма решения вихревой задачи.

Несмотря на то, что решается задача стационарная, но во FLOTRAN при этом используются итерационные алгоритмы, поэтому перед запуском решения задачи необходимо ограничить количество итераций. Назначение количества итераций осуществляется с помощью команды, приведенной в команде 7 (Таблица 40).

При решении задачи может возникать ошибка с указанием на то, что в решаемой матрице на определенной итерации получаются отрицательные элементы. Обойти данную ошибку можно с помощью команд 8-10 (Таблица 40). На этом подготовка любой из рассмотренных задач к решению заканчивается и для запуска алгоритма решения необходимо использовать команды 12-13 (Таблица 40).

2.2.7. Чтение результатов решения задачи на последнем шаге и их отображение

Поскольку вихревые задачи (даже стационарные) решаются итерационно, то, чтобы получить доступ к результатам решения, необходимо прочитать

последние по времени данные решения. Выполняется это с помощью пункта меню: *Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set*.

Для отображения результатов в векторном виде необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined*. В появившемся окне следует выбрать требуемые результаты в списке и, если необходимо, изменить размеры векторов скоростей потока (Рисунок 56).

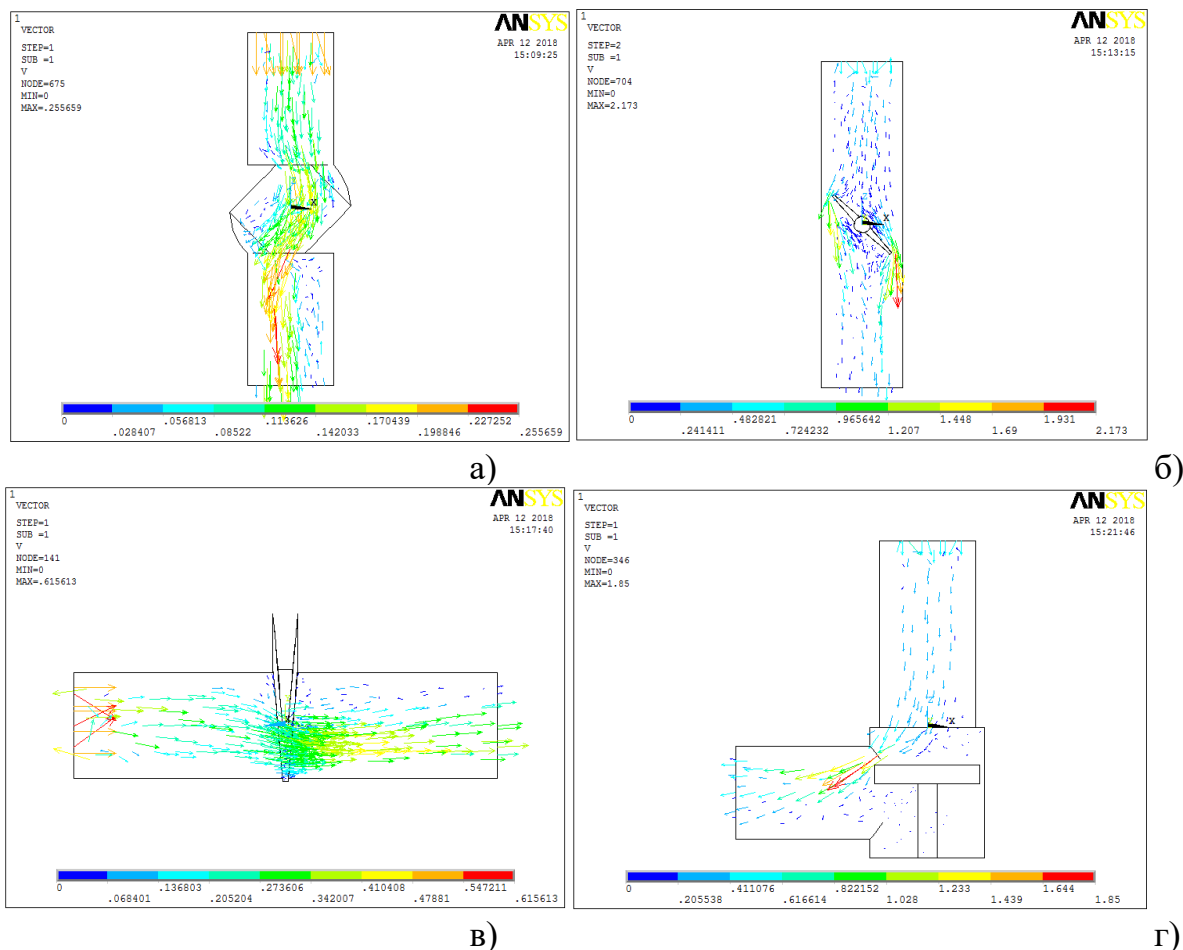


Рисунок 56 – Поле скоростей в параметрических моделях запорно-регулирующей арматуры: а) шаровой кран, б) дисковый затвор, в) клиновья задвижка, д) угловой клапан

2.2.8. Обсуждение результатов моделирования

С целью решения комплексной проблемы управления и ресурсосбережения на трубопроводном транспорте в статье предложены параметрические модели вихревого стационарного течения в таких видах запорно-регулирующей арматуры, как шаровой кран, дисковый затвор, клиновья задвижка, угловой клапан.

Без ущерба общности методики в качестве примера перекачиваемой среды рассматривается вода.

Анализ выполнен средствами FLOTRAN CFD программы ANSYS 10 ED.

Установлено, что расход среды и скорость ее прокачки можно определять по положению запирающего элемента.

Установлено, что на характер течения и расход среды оказывает влияние как геометрия рассмотренных видов запорно-регулирующей арматуры, так и скорость потока.

Предлагаемые модели и методика может быть применена для любых конструкций арматуры, связанных с расчетом движения вязкой жидкости.

Для улучшения качества результатов, получаемых на предлагаемых моделях, необходимо в приведенных списках команд только указать значение параметров, улучшающих разбиение.

2.3. Гидродинамический расчет вихревого обтекания сужающих устройств расходомеров

Одним из наиболее распространенных способ измерения расхода жидкостей, газов и пара является измерение по перепаду давления в сужающем устройстве. Сужающее устройство выполняет функцию первичного преобразователя, устанавливается в трубопроводе и создает в нем местное сужение, вследствие чего при протекании вещества повышается скорость в суженном сечении по сравнению со скоростью потока до сужения. Соответственно, статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства [52, 53].

Таким образом, при протекании вещества через сужающее устройство создается перепад давления, зависящий от скорости потока и, следовательно, расхода вещества. Именно перепад давления и является мерой расхода вещества в расходомерах подобной конструкции [52, 53].

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкости, газов и пара широко применяются стандартные диафрагмы и сопла [52-55].

Несмотря на распространенность устройств данного типа, их технический расчет базируется на очень приближенных представлениях о происходящих явлениях при вихревом обтекании данных устройств. Достаточно посмотреть на прогнозируемые линии тока в осевом сечении трубы [52, 53] и сравнить их с результатами решения гидродинамической задачи по предлагаемой в данной статье методике, становится очевидным, что анализ течений [52, 53] выполнен абсолютно умозрительно, т.к. не подтверждается расчетами.

Сам принцип технического расчета, используемого до настоящего времени основывается на простейших формулах одинаковых для всех типов сужающих устройств и различающихся только значением коэффициентов, характеризующих определенный тип сужающего устройства [52, 53].

Кроме того, упомянутые формулы получены для средних по сечению потока параметров, что само по себе влечет достаточно большую ошибку. Однако эта расчетная ошибка минимизируется за счет экспериментального

определения коэффициентов в полученных приближенных уравнениях, в том числе с использованием в качестве одного из параметров чисел Рейнольдса [52]. Однако из-за водимых упрощений в исходных формулах приходится говорить о двух числах Рейнольдса, используемых в расчете – усредненного по поперечному сечению и граничном значении для стандартных сужающих устройств [52]. Очевидно, что существующая методика технического расчета может быть перенесена на новые типы сужающих устройств только после масштабных экспериментальных исследований [56].

В предлагаемой авторами методике расчета сужающих устройств можно определить реальную картину дозвукового обтекания несжимаемой вязкой жидкостью любой конструкции сужающих устройств, как стандартной, так и вновь разрабатываемой [52, 57] и, не используя умозрительные методы определения числа Рейнольдса, получить перепад давлений на сужающем устройстве любой конструкции с учетом вихревого обтекания [8, 44].

Предлагаемая авторами методика параметризованного гидродинамического расчета сужающих устройств расходомеров носит простой инженерный характер и не требует от исполнителя расчета никаких дополнительных знаний по гидрогазодинамике. Этот расчет может быть выполнен на любом компьютере, на котором можно установить бесплатную версию ANSYS 10ED [8, 44, 58].

2.3.1. Предположения при построении модели обтекания всех типов сужающих устройств

В статье рассматривается идеальный вариант монтажа датчика, и не учитывается возможное незначительное несовпадение внутренних диаметров труб и датчиков, а также их несоосность в смысле соответствующих допусков на монтаж данного оборудования [52-55].

В связи с тем, что разность давлений на сужающем устройстве мала по сравнению с манометрическим давлением на входе и на выходе сужающего устройства, предполагается, что плотность жидкости постоянна и вычисляется по известной формуле [53]:

$$\rho = \rho_0(1 + \beta \cdot (P - P_0)), \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность жидкости при нормальных условиях (кг/м^3), P – среднее в поперечном сечении давление в трубопроводе до или после сужающего устройства (Па), P_0 – нормальное атмосферное давление (Па), β – коэффициент сжимаемости среды (например, для нефти $\beta = 0.00078 \frac{1}{\text{Па}}$ [53]).

Совершенно аналогично (4) можно считать перекачиваемую среду баровязкой и для определения коэффициента вязкости перекачиваемой среды под давлением можно использовать формулу аналогичную (4) [59].

Поскольку коэффициент объемного расширения для нефти практически не оказывает влияния на изменение плотности из-за перепада температуры [53], то будем предполагать, что процесс вихревого обтекания сужающего устройства в трубопроводе происходит при нормальной температуре.

При построении параметрической модели каждого из устройств не рассматривается геометрическое положение отверстий или щелей отбора давления. Предполагается, что исследователь после решения задачи для конкретного устройства самостоятельно выберет на свое усмотрение узлы конечно элементного разбиения, ближайšie к положению отверстий или щелей для отбора давления и определит положительное и отрицательное приращение давлений на входе и выходе из сужающего устройства любого из рассматриваемых типов.

Предполагается, что на поверхности трубы и на границе любого сужающего устройства для вещества выполняются условия прилипания [8, 44].

Осевое сечение сужающих устройств и параметров, определяющих их размеры, будут созданы в соответствии с ГОСТ-ами [54, 55] в предположении, что ось трубы и сужающего устройства горизонтальны, а поток направлен слева на право. Однако при моделировании вихревого обтекания ось симметрии модели будет направлена вертикально вверх, а поток вещества будет направлен снизу вверх. Это связано со спецификой отображения результатов решения осесимметричной задачи в ANSYS APDL в цилиндрической системе координат.

Отметим также, что при решении гидродинамической задачи для любого из сужающих устройств длина фрагмента трубы после устройства должна быть гораздо больше, чем длина трубы на входе (до сужающего устройства), чтобы давление в поперечном сечении потока перераспределилось и приблизилось к постоянному значению по сечению потока.

Таким образом, начальный список команд, решающих поставленную задачу для любого сужающего устройства в ANSYS/FLOTRAN, будет содержать параметры: $P0$ – стандартное атмосферное давление (Па), P – манометрическое давление в трубопроводе (Па), $DELTA_P$ – разность давлений, используемая в качестве краевого условия при решении задачи (Па), $BETA$ – коэффициент сжимаемости среды (4), RO_0 – плотность среды при нормальном давлении (4), RO – вычисленная средняя плотность среды при давлении P (4), скорость движения среды в трубопроводе на участке трубопровода перед сужающим устройством (м/с), D – диаметр трубопровода (м). Список команд (Таблица 47) определяет только физические параметры перекачиваемой среды.

2.3.2. Диафрагма

Диафрагма (Рисунок 57) представляет собой тонкий диск с отверстием круглого сечения, центр которого лежит на оси трубы [52-54]. Ниже приводится листинг команд для определения геометрических параметров диафрагмы (Таблица 48), построения геометрии радиального сечения участка трубы с

диафрагмой построения упорядоченного разбиения и приложения стандартных краевых условий на входе и выходе модели.

Таблица 47 – Определение имени файла решаемой задачи, а также имен и значений физических констант для решения краевой задачи для любого из рассматриваемых сужающих устройств

№	Команда
1.	/FILENAME, Vortex, 0
2.	P0 = 1E5
3.	P = 1.2 E6
4.	DELTA_P = P - P0
5.	BETA = 0.00078
6.	RO_0 = 700
7.	RO = RO_0*(1+BETA*(P-P0))
8.	VISCOSITY = 0.001
9.	V = 0.4
10.	D = 1

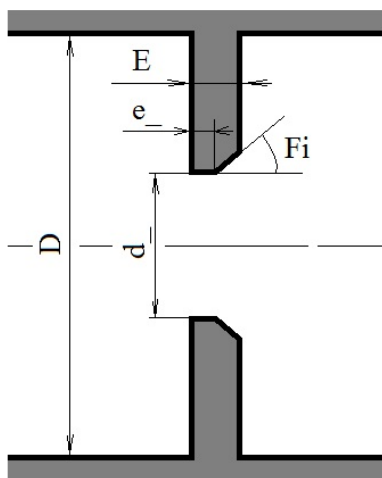


Рисунок 57 – Модель стандартной диафрагмы с наименованием параметров, указанных в ГОСТ [54]: $d_$ – диаметр внутреннего отверстия диафрагмы, E – толщина диафрагмы (допускаемый значения до $0.05 D$), $e_$ – толщина цилиндрического участка (допускаемые значения от $0.005 D$ до $0.02 D$), Fi – угол конического расширения диафрагмы на выходе, измеряемый в градусах от оси диафрагмы (допускаемые значения от 30 до 45 градусов)

В командах с 1 по 6 (Таблица 48) задаются геометрические значения параметров для диафрагмы, а также определяется значение числа π . В команде 7 (Таблица 48) написана команда открытия сессии препроцессора для подготовки модели. В командах с 8 по 18 (Таблица 48) строятся ключевые точки модели радиального сечения трубы с диафрагмой. В командах с 19 по 24 (Таблица 48)

строятся линии, соединяющие точки с использованием, как оператора цикла, так и текстовых команд.

Таблица 48 – Список команд для подготовки к решению краевой задачи вихревого обтекания диафрагмы

№	Команда	№	Команда
1.	E = 0.01	27.	AL, 5, 6, 7, 8, 13
2.	e_ = 0.005	28.	LESIZE, 1, , , 50, 1/30
3.	d_ = 0.8	29.	LESIZE, 2, , , 20
4.	Fi = 45	30.	LESIZE, 3, , , 2
5.	Pi = ACOS(-1)	31.	LESIZE, 4, , , 2
6.	d_VYX = d_+(E-e_) / TAN(Fi*Pi/180)	32.	LESIZE, 5, , , 18
7.	/PREP7	33.	LESIZE, 6, , , 50, 30
8.	K, 1, D/2, 0	34.	LESIZE, 8, , , 50, 1/30
9.	K, 2, D/2, D	35.	LESIZE, 12, , , 20
10.	K, 3, d_ /2, D	36.	ET, 1, FLUID141
11.	K, 4, d_ /2, D + e_	37.	KEYOPT, 1, 3, 1
12.	K, 5, d_VYX/2, D + E	38.	MSHMID, 0
13.	K, 6, D/2, D + E	39.	MSHKEY, 1
14.	K, 7, D/2, 5*D + E	40.	AMAP, 1, 3, 5, 9, 10
15.	K, 8, 0, 5*D + E	41.	AMAP, 2, 1, 2, 10, 11
16.	K, 9, 0, D + E	42.	AMAP, 3, 6, 7, 8, 9
17.	K, 10, 0, D	43.	DL, 7, , PRESS, DELTA_P, 1
18.	K, 11, 0, 0	44.	DL, 11, , VY, V, 1
19.	*DO, i, 1, 10	45.	LSEL, S, LINE, , 1, 10
20.	LSTR, i, i+1	46.	LSEL, U, LINE, , 7
21.	*ENDDO	47.	DL, ALL, , VX, 0, 1
22.	LSTR, 11, 1	48.	LSEL, U, LINE, , 8, 10
23.	LSTR, 10, 3	49.	DL, ALL, , VY, 0, 1
24.	LSTR, 5, 9	50.	LSEL, ALL
25.	AL, 3, 4, 9, 12, 13	51.	POINT_POSITION = 1.25 D
26.	AL, 1, 2, 10, 11, 12	52.	---

С 25 команды по 27 (Таблица 48) строятся поверхности, моделирующие радиальное сечение трубы с препятствием в виде диафрагмы. В командах с 28 по 35 (Таблица 48) на линиях модели задаются параметры разбиения, которые позволяют сгущать сетку около диафрагмы для более точного определения характера вихревого течения и давления. Команды с 36 по 42 (Таблица 48) используются для определения типа элемента и его опций (осесимметричная задача вокруг оси OY), а также построения упорядоченного разбиения модели.

Команды 43 и 44 (Таблица 48) задают стандартные краевые условия по скорости потока на входе в модель расходомера и инкремента давления и на

выходе из нее. Краевые условия для случая полного прилипания среды на поверхности модели расходомера описываются в командах с 45 по 50 (Таблица 48). В завершение командного листинга для диафрагмы в команде 51 (Таблица 48) определяются координаты по оси OY точек после сужающего устройства, через которые будут проходить линии тока.

2.3.3. Эллипсное сопло

Будем рассматривать эллипсные сопла с большим относительным диаметром горловины [55]. В этом случае большая полуось четверти эллипса, образующего сужающуюся часть радиального сечения осесимметричного сопла расположена на границе трубы и равна $D/2$. Меньшая полуось эллипса равен $(D - d_-)/2$. Цилиндрическая горловина, расположенная за сужающейся частью, имеет диаметр d_- и длину $0.6 \cdot d_-$ (Рисунок 58). Поскольку в ГОСТ нормируется только внешняя (рабочая) сторона сопла, то во избежание определенных сложностей при построении геометрии внутреннюю сторону сопла необходимо упростить, очевидно, не потеряв точности решения задачи.

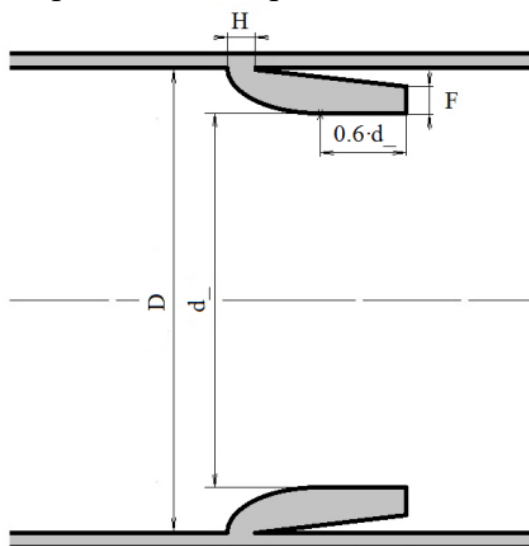


Рисунок 58 – Модель эллипсного сопла [55]: H – толщина диафрагмы; F – толщина на выходе (не менее 2 мм)

В командах с 1 по 4 (Таблица 49) задаются геометрические значения параметров эллипсного сопла, а также определяется значение числа π . В команде 5 (Таблица 49) написана команда открытия сессии препроцессора для подготовки модели. В командах с 6 по 22 (Таблица 49) строятся ключевые точки модели радиального сечения трубы с эллипсным соплом. В командах с 23 по 25 (Таблица 49) ключевые точки соединяются линиями в цикле.

Таблица 49 – Список команд для подготовки к решению краевой задачи вихревого обтекания эллипсного сопла с большим относительным диаметром горловины

№	Команда	№	Команда
1.	H = 0.01	31.	AL, 15, 13, 1, 14, 9
2.	F = 0.005	32.	AL, 14, 2, 16, 6, 7, 8
3.	d_ = 0.8	33.	AL, 3, 4, 5, 16
4.	Pi = ACOS(-1)	34.	LESIZE, 12, , , 50, 1/30
5.	/PREP7	35.	LESIZE, 13, , , 20
6.	K, 1, d_/2, 1.5*D	36.	LESIZE, 1, , , 20
7.	K, 2, d_/2, 1.5*D+0.6*d_	37.	LESIZE, 2, , , 2
8.	K, 3, d_/2 + F, 1.5*D+0.6*d_	38.	LESIZE, 3, , , 20
9.	K, 4, D/2-((D-d_)/2-F)*SIN(Pi/10), D + 6*H	39.	LESIZE, 4, , , 10
10.	K, 5, D/2, D + H	40.	LESIZE, 6, , , 50, 30
11.	K, 6, D/2, 1.5*D+0.6*d_	41.	LESIZE, 8, , , 50, 1/30
12.	K, 7, D/2, 6.5*D	42.	LESIZE, 15, , , 30
13.	K, 8, 0, 6.5*D	43.	ET, 1, FLUID141
14.	K, 9, 0, 1.5*D+0.6*d_	44.	KEYOPT, 1, 3, 1
15.	K, 10, 0, D	45.	MSHMID, 0
16.	K, 11, 0, 0	46.	MSHKEY, 1
17.	K, 12, D/2, 0	47.	AMAP, 1, 10, 11, 12, 13
18.	K, 13, D/2, D	48.	AMAP, 2, 13, 2, 9, 10
19.	K, 14, D/2-((D-d_)/2)*SIN(Pi/12), 1.5*D-COS(Pi/12)/2*D	49.	AMAP, 3, 6, 7, 8, 9
20.	K, 15, D/2-((D-d_)/2)*SIN(Pi/6), 1.5*D-COS(Pi/6)/2*D	50.	AMAP, 4, 3, 4, 5, 6
21.	K, 16, D/2-((D-d_)/2)*SIN(Pi/4), 1.5*D-COS(Pi/4)/2*D	51.	DL, 7, , PRESS, DELTA_P, 1
22.	K, 17, D/2-((D-d_)/2)*SIN(Pi/3), 1.5*D-COS(Pi/3)/2*D	52.	DL, 11, , VY, V, 1
23.	*DO, i, 1, 12	53.	LSEL, S, LINE, , 1, 13
24.	LSTR, i, i+1	54.	LSEL, U, LINE, , 7
25.	*ENDDO	55.	LSEL, U, LINE, , 11
26.	BSPLIN, 13, 14, 15, 16, 17, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0	56.	DL, ALL, , VX, 0, 1
27.	LSTR, 9, 2	57.	LSEL, U, LINE, , 7, 10
28.	LSTR, 10, 13	58.	DL, ALL, , VY, 0, 1
29.	LSTR, 3, 6	59.	ALLSEL, ALL
30.	AL, 10, 11, 12, 15	60.	POINT_POSITION = 1.5*D+d_

В команде 26 строится сплайн, соответствующий сечению эллипсного сопла. Далее в командах с 27 по 29 (Таблица 49) достраиваются необходимые прямые линии модели. С 30 команды по 33 (Таблица 49) строятся поверхности, моделирующие радиальное сечение трубы с препятствием в виде эллипсного сопла. В командах с 34 по 42 (Таблица 49) на линиях модели задаются параметры разбиения, которые позволяют сгущать сетку около препятствия в виде сопла, для более точного определения характера вихревого течения и давления.

Команды с 43 по 50 (Таблица 49) используются для определения типа элемента и его опций (осесимметричная задача вокруг оси OY), а также построения упорядоченного разбиения модели. Команды 51 и 52 (Таблица 49) задают стандартные краевые условия по скорости потока на входе в модель расходомера и инкремента давления на выходе из нее.

Краевые условия для случая полного прилипания среды на ее поверхности описываются отдельно в командах с 53 по 59 (Таблица 49). Завершается построение модели командой с номером 60 (Таблица 49) и заданием в ней значения параметра, определяющего геометрическое место точек на оси OY , через которые будут проходить линии тока.

2.3.4. Сопло ИСА 1932

При решении задачи вихревого обтекания будет рассматриваться случай, когда диаметр трубы D и диаметр горловины сопла d связаны неравенством $D > 1.5 d$ [52, 55]. Приведенная ниже параметрическая модель данного сопла будет содержать перечисленные параметры (Рисунок 59, Таблица 50).

В командах с 1 по 6 (Таблица 50) задаются геометрические значения параметров сопла ИСА 1932 в соответствии с ГОСТ [55]. В команде 7 (Таблица 50) написана команда открытия сессии препроцессора для подготовки модели. В командах 8 и 9 (Таблица 50) строятся вспомогательные ключевые точки модели радиального сечения трубы с соплом ИСА 1932.

В команде 10 построенные точки соединяются прямой линией. Далее в командах 11 и 12 с указанными в ГОСТ координатами и радиусами (Рисунок 59) строятся два четверть круга, имитирующие криволинейную поверхность сопла ИСА 1932. В 13-й команде проводится вычитание построенных поверхностей и с 14-й команды по 17-ю последовательно удаляются ненужные поверхность и линии, которые не будут далее использоваться. Формирование входа в сопло ИСА 1932 завершается соединением двух ключевых точек прямой линией в команде 18. После этого под номером 19 (Таблица 50) идет команда сжатия нумерации всех построенных компонент. В командах с 20-й по 32-ю (Таблица 50) строятся ключевые точки модели радиального сечения трубы с соплом ИСА 1932. Далее в командах с 33-й по 41-ю достраиваются необходимые прямые линии модели, в том числе с использованием оператора цикла.

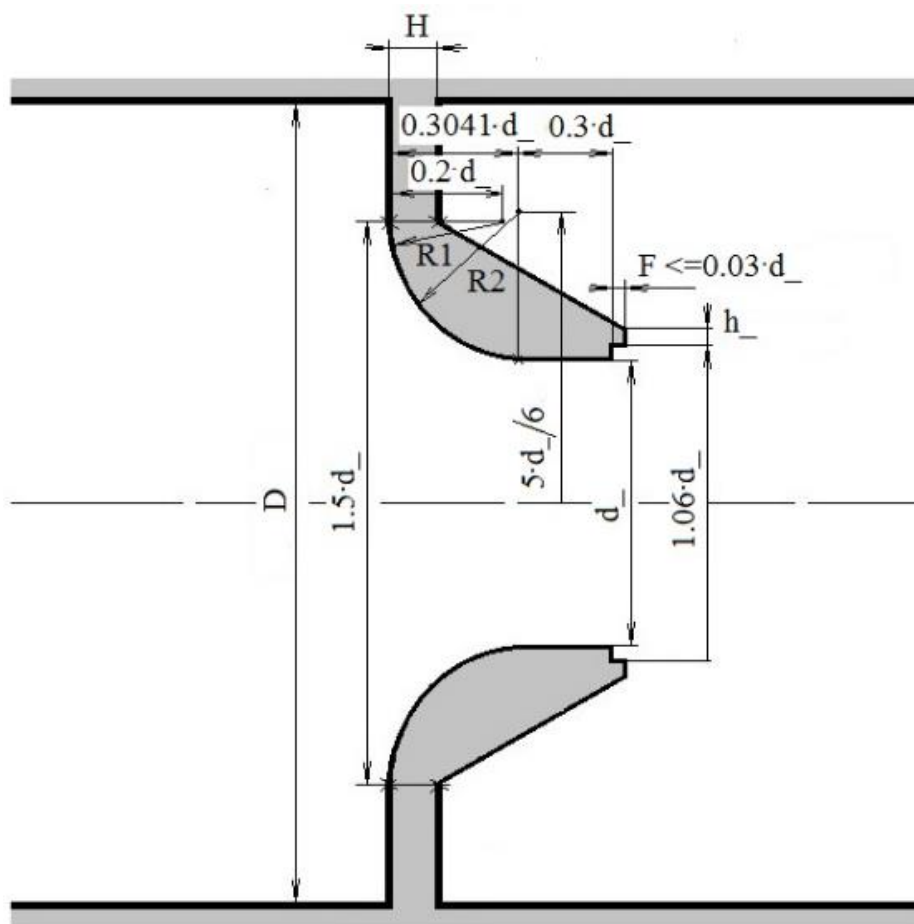


Рисунок 59 – Геометрия сопла ИСА 1932 в соответствии ГОСТ [55]: $d_$ – диаметр горловины, H – толщина пластины (не нормируется в ГОСТ [55]), $h_$ – толщина сопла на выходе (не нормируется в ГОСТ [55]), F – длина цилиндрической части ступенчатого изменения диаметра сопла на выходе, $R1$ и $R2$ радиусы сужения входной части сопла (вычисляемые параметры)

С 42-й команды по 46-ю (Таблица 50) строятся поверхности, моделирующие радиальное сечение трубы с препятствием в виде сопла ИСА 1932. В командах с 47-й по 58-ю (Таблица 50) на линиях модели задаются параметры разбиения, которые позволяют сгущать сетку около препятствия в виде сопла, для более точного определения характера вихревого течения и давления. Команды с 59-й по 67-ю (Таблица 50) используются для определения типа элемента и его опций (осесимметричная задача вокруг оси OY), а также построения упорядоченного разбиения модели. Команды 68 и 69 (Таблица 50) задают стандартные краевые условия по скорости потока на входе в модель расходомера и инкремента давления и на выходе из нее. Краевые условия для случая полного прилипания среды на ее поверхности описываются отдельно в командах с 70-й по 80-ю (Таблица 50). В завершение командного листинга для сопла ИСА 1932 в команде 81 определяются координаты по оси OY точек после сужающего устройства, через которые будут проходить линии тока.

Таблица 50 – Список команд для подготовки к решению краевой задачи для сопла ИСА 1932

№	Команда	№	Команда
1.	H = 0.05	42.	AL, 1, 2, 23, 18, 19
2.	h_ = 0.015	43.	AL, 4, 3, 5, 6, 22, 17, 23
3.	d_ = 0.6	44.	AL, 7, 8, 21, 16, 22
4.	F = 0.01	45.	AL, 10, 11, 12, 20
5.	R1 = 0.2*d_	46.	AL, 21, 9, 20, 13, 14, 15
6.	R2 = 5*d_ / 6 - d_ / 2	47.	LESIZE, 1, , , 30, 1/30
7.	/PREP7	48.	LESIZE, 18, , , 30, 30
8.	K, 1, D/2, 0	49.	LESIZE, 3, , , 1
9.	K, 2, D/2, D	50.	LESIZE, 4, , , 10
10.	LSTR, 1, 2	51.	LESIZE, 5, , , 20
11.	CYL4, 0.75*d_, D + 0.2*d_., 180, R1, 270	52.	LESIZE, 6, , , 20
12.	CYL4, 5*d_ / 6, D + 0.3041*d_., 180, R2, 270	53.	LESIZE, 7, , , 3
13.	ASBA, 2, 1, , DELETE, DELETE	54.	LESIZE, 23, , , 20
14.	ADELE, ALL	55.	LESIZE, 20, , , 15
15.	LDELE, 3, 8, 1, 1	56.	LESIZE, 12, , , 20
16.	LDELE, 10, , , 1	57.	LESIZE, 13, , , 40, 30
17.	LDELE, 13, , , 1	58.	LESIZE, 15, , , 40, 1/30
18.	LSTR, 2, 4	59.	ET, 1, FLUID141
19.	NUMCMP, ALL	60.	KEYOPT, 1, 3, 1
20.	K, 7, d_ / 2, D + 0.3041*d_ + 0.3*d_	61.	MSHMID, 0
21.	K, 8, 0.53*d_ , D + 0.3041*d_ + 0.3*d_	62.	MSHKEY, 1
22.	K, 9, 0.53*d_ , D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F	63.	AMAP, 1, 1, 2, 18, 19
23.	K, 10, 0.53*d_ + h_ , D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F	64.	AMAP, 2, 3, 7, 17, 18
24.	K, 11, 0.75*d_ , D + H	65.	AMAP, 3, 8, 9, 16, 17
25.	K, 12, D / 2, D + H	66.	AMAP, 4, 10, 11, 12, 13
26.	K, 13, D / 2, D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F	67.	AMAP, 5, 13, 14, 15, 16
27.	K, 14, D / 2, 5*D + H	68.	DL, 19, , VY, V, 1
28.	K, 15, 0, 5*D + H	69.	DL, 14, , PRESS, DELTA_P, 1
29.	K, 16, 0, D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F	70.	LSEL, S, LINE, , 1, 19
30.	K, 17, 0, D + 0.3041*d_ + 0.3*d_	71.	LSEL, U, LINE, , 2
31.	K, 18, 0, D	72.	LSEL, U, LINE, , 7
32.	K, 19, 0, 0	73.	LSEL, U, LINE, , 9
33.	LSTR, 4, 7	74.	LSEL, U, LINE, , 11
34.	*DO, i, 7, 18	75.	LSEL, U, LINE, , 14
35.	LSTR, i, i+1	76.	LSEL, U, LINE, , 19
36.	*ENDDO	77.	DL, ALL, , VX, 0, 1
37.	LSTR, 19, 1	78.	LSEL, S, LINE, , 1, 13
38.	LSTR, 10, 13	79.	DL, ALL, , VY, 0, 1
39.	LSTR, 16, 9	80.	ALLSEL, ALL
40.	LSTR, 17, 7	81.	POINT_POSITION = D + 0.3041*d_ + d_ + F
41.	LSTR, 18, 3	82.	---

2.3.5. Сопло Вентури

Рассматривается сопло Вентури (Рисунок 60) [52, 55], которое состоит из цилиндрического входного участка, плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок и, далее, из расширяющейся части – диффузора. Считается, что потери давления в данном виде сопла ниже по сравнению с другими соплами благодаря наличию диффузора.

Необходимо отметить, что геометрия входа сопла Вентури полностью повторяет геометрию уже рассмотренного сопла ИСА 1932. Поэтому приведенный ниже список команд построения параметрической модели сопла Вентури частично повторяет построения сопла ИСА 1932.

В командах с 1-й по 7-ю (Таблица 51) задаются геометрические значения параметров сопла Вентури в соответствии с ГОСТ [55]. В команде 8 (Таблица 51) написана команда открытия сессии препроцессора для подготовки модели. В командах 9-й и 10-й (Таблица 51) строятся вспомогательные ключевые точки модели радиального сечения трубы с соплом Вентури. В команде 11 (Таблица 51) эти точки соединяются прямой линией.

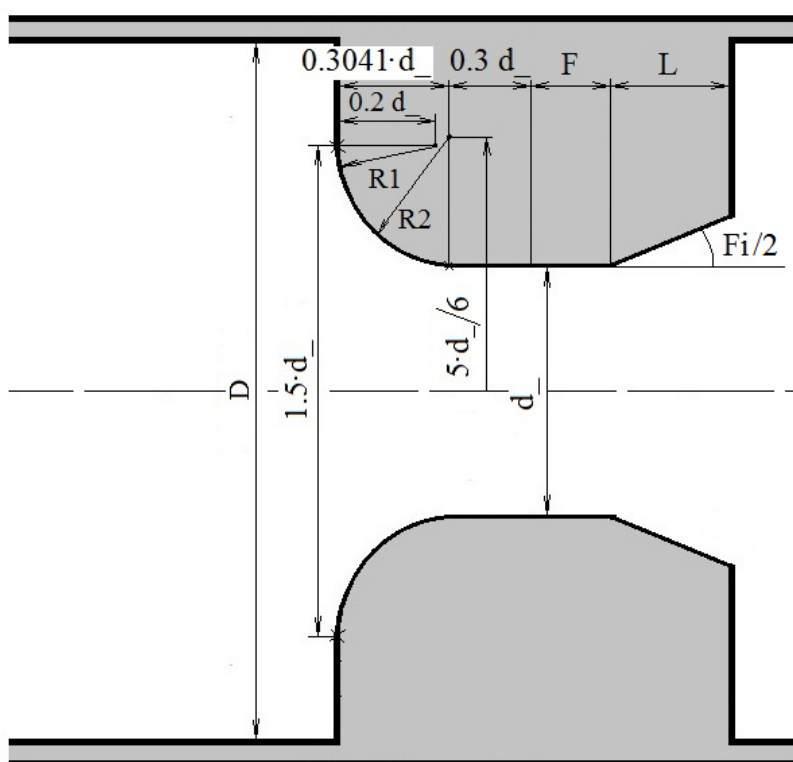


Рисунок 60 – Сопло Вентури ГОСТ [55]: d – диаметр горловины, F – длина цилиндрической части сопла с постоянным диаметром, L – длина конического диффузора, Fi – угол конусности диффузора сопла, $R1$ и $R2$ радиусы сужения входной части сопла

Таблица 51 – Список команд для подготовки к решению краевой задачи вихревого обтекания сопла Вентури

№	Команда	№	Команда
1.	$d_ = 0.6$	36.	LSTR, 12, 4
2.	$F = 0.5*d_$	37.	LSTR, 11, 7
3.	$L = 0.35*D$	38.	AL, 1, 2, 15, 12, 14
4.	$Fi = 30$	39.	AL, 4, 3, 5, 16, 11, 15
5.	$Pi = ACOS(-1)$	40.	AL, 16, 13, 17, 10
6.	$R1 = 0.2*d_$	41.	AL, 17, 6, 7, 8, 9
7.	$R2 = 5*d_ / 6 - d_ / 2$	42.	LESIZE, 1, , , 30, 1/30
8.	/PREP7	43.	LESIZE, 12, , , 30, 30
9.	K, 1, D/2, 0	44.	LESIZE, 2, , , 5
10.	K, 2, D/2, D	45.	LESIZE, 3, , , 5
11.	LSTR, 1, 2	46.	LESIZE, 4, , , 5
12.	CYL4, $0.75*d_ , D + 0.2*d_ , 180, R1, 270$	47.	LESIZE, 5, , , 30
13.	CYL4, $5*d_ / 6, D + 0.3041*d_ , 180, R2, 270$	48.	LESIZE, 13, , , 20
14.	ASBA, 2, 1, , DELETE, DELETE	49.	LESIZE, 6, , , 10
15.	ADELE,ALL	50.	LESIZE, 7, , , 40, 30
16.	LDELE, 3, 8,1,1	51.	LESIZE, 9, , , 40, 1/30
17.	LDELE, 10,,1	52.	LESIZE, 15, , , 30
18.	LDELE, 13,,1	53.	ET, 1, FLUID141
19.	LSTR, 2, 4	54.	KEYOPT, 1, 3, 1
20.	NUMCMP, ALL	55.	MSHMID, 0
21.	LEXTND, 5, 4, $0.3*d_ + F, 0$	56.	MSHKEY, 1
22.	K, 7, $d_ / 2 + L * TAN(Fi / 360 * PI), D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F + L$	57.	AMAP, 1, 1, 2, 13, 14
23.	K, 8, D/2, $D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F + L$	58.	AMAP, 2, 3, 4, 12, 13
24.	K, 9, D/2, $D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F + L + 5*D$	59.	AMAP, 3, 4, 7, 11, 12
25.	K, 10, 0, $D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F + L + 5*D$	60.	AMAP, 4, 8, 9, 10, 11
26.	K, 11, 0, $D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F + L$	61.	DL, 14, , VY, V, 1
27.	K, 12, 0, $D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F$	62.	DL, 8, , PRESS, DELTA_P, 1
28.	K, 13, 0, D	63.	LSEL, S, LINE, , 1, 13, 1, 1
29.	K, 14, 0, 0	64.	LSEL, U, LINE, , 8
30.	*DO, i, 7, 13	65.	DL, ALL, , VX, 0, 1
31.	LSTR, i, i+1	66.	LSEL, U, LINE, , 9, 12
32.	*ENDDO	67.	DL, ALL, , VY, 0, 1
33.	LSTR, 4, 7	68.	ALLSEL, ALL
34.	LSTR, 14, 1	69.	POINT_POSITION = $D + 0.3041*d_ + 0.3*d_ + F + 1.5*L$
35.	LSTR, 13, 3	70.	---

Далее в командах 12 и 13 с указанными в ГОСТ координатами и радиусами (Рисунок 60) строятся две четверть круга, имитирующие криволинейную поверхность сопла Вентури 1932. В 14 команде проводится вычитание построенных поверхностей и с 15-й команды по 18-ю последовательно удаляются ненужные поверхность и линии, которые не будут далее использоваться. Формирование входа в сопло Вентури завершается соединением двух ключевых точек прямой линией в команде 19. После этого под номером 20 (Таблица 51) идет команда сжатия нумерации всех построенных компонент. В команде 21 происходит удлинение линии с одного конца. С 22-й по 29-ю команды (Таблица 51) строятся вспомогательные ключевые точки модели радиального сечения трубы с соплом Вентури. Далее в командах с 30-й по 37-ю достраиваются необходимые прямые линии модели в том числе с использованием оператора цикла. С 38-й команды по 41-ю (Таблица 51) строятся поверхности, моделирующие радиальное сечение трубы с препятствием в виде сопла Вентури. В командах с 42-й по 52-ю (Таблица 51) на линиях модели задаются параметры разбиения, некоторые, в частности, позволяют сгущать сетку около препятствия в виде сопла для более точного определения характера вихревого течения и давления. Команды с 53-й по 60-ю (Таблица 51) используются для определения типа элемента и его опций (осесимметричная задача вокруг оси OY), а также построения упорядоченного разбиения модели. Команды 61 и 62 (Таблица 51) задают стандартные краевые условия по скорости потока на входе в модель расходомера и инкремента давления на выходе из нее. Краевые условия для случая полного прилипания среды на ее поверхности описываются отдельно в командах с 63-й по 68-ю (Таблица 51). Завершается построение модели командой с номером 69 и заданием в ней значения параметра, определяющего геометрическое место точек на оси OY , через которые будут проходить линии тока.

2.3.6. Задание физических свойств несжимаемой жидкости для всех конструкций расходомеров, выбор алгоритма решения гидродинамических задач и их запуск на решение

Команды задания свойств жидкости, а также манометрического давления рассматривались выше (Таблица 39). Однако в связи с использованием в моделях сужающих устройств двух дополнительных параметров RO и $VISCOSITY$. Команды 2 и 4 (Таблица 39) должны быть заменены на команды $FLDATA8, NOMI, DENS, RO$ и $FLDATA8, NOMI, VISC, VISCOSITY$ соответственно.

Задание модели течения жидкости и параметров решателе также уже обсуждалось ранее (Таблица 40). В данном случае набор команд остается без изменений.

2.3.7. Команды отображения результатов решения задачи

Для того чтобы просмотреть результаты, например, распределение давления в осевом сечении трубы, необходимо инициализировать список команд постпроцессора с помощью первой команды (Таблица 52). Поскольку вихревые задачи (даже стационарные) решаются итерационно, то, чтобы получить доступ к результатам решения, необходимо прочитать последние по времени данные решения. Выполняется это с помощью второй команды (Таблица 52).

Для просмотра результатов решения осесимметричной задачи в плоскости осевого сечения необходимо выполнить осесимметричное отображение модели с помощью третьей команды (Таблица 52). Далее, с помощью четвертой команды, можно просмотреть распределение давлений (Рисунок 61).

Таблица 52 – Список команд для работы с постпроцессором и просмотра распределения давлений

№	Команда
1.	/POST1
2.	SET, LAST
3.	/EXPAND, 18, AXIS, HALF, ,10
4.	PLNSOL, PRES

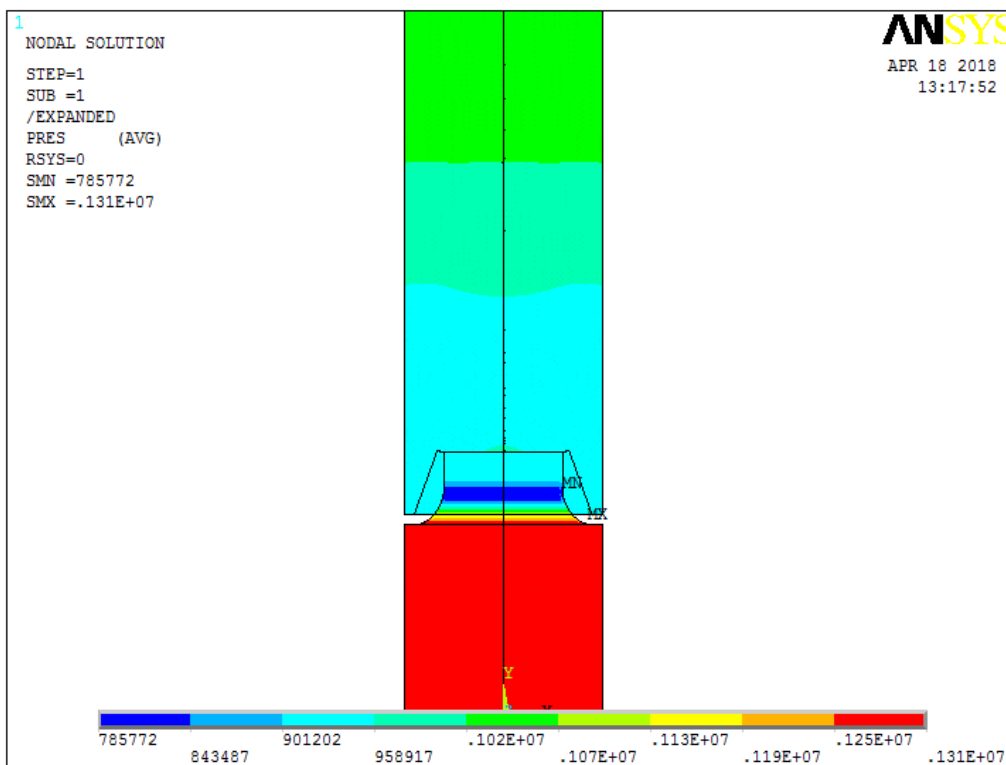


Рисунок 61 – Распределение давлений в трубе при обтекании сопла ИСА 1932

2.3.8. Команды отображения линий тока

Для того, чтобы отобразить линии тока необходимо в начале задать геометрическое место точек, через которые данные линии будут проходить. Поскольку вихри возможны как до сужающего устройства, так и после него, то необходимо выбирать точки как можно ближе к краям сужающего устройства. Также следует помнить, что число линий тока (и, соответственно, количество выбранных точек, через которые они проходят) для ED версии ограничено 25-ю трассами. Список команд назначения точек для отображения линий тока приведен ниже (Таблица 53).

Первые три команды (Таблица 53) – это назначение точек с помощью цикла до сужающего устройства, а команд с 4-й по 9-ю – назначение точек. Команда 10 (Таблица 53) соответствует отображению линий тока с цветовой индикации осевой скорости VY потока среды (Рисунок 62).

В случае если пользователь захочет переназначить точки, то перед новым назначением необходимо отменить старый выбор точек с помощью команды *TRPDEL, ALL*.

Таблица 53 – Список команд для назначения точек, через которые будут проходить линии тока и просмотр линий

№	Команда
1.	*DO, i, 1, 3
2.	TRPOIN, $d_/2+i*(D-d_)/7$, $0.8*D$, , , VY
3.	*ENDDO
4.	*DO, i, 1, 4
5.	TRPOIN, $i*d_/9$, POINT_POSITION, , , VY
6.	*ENDDO
7.	*DO, i, 1, 5
8.	TRPOIN, $d_/2 + i*(D-d_)/11$, POINT_POSITION, , , VY
9.	*ENDDO
10.	PLTRAC, FLUID, VY

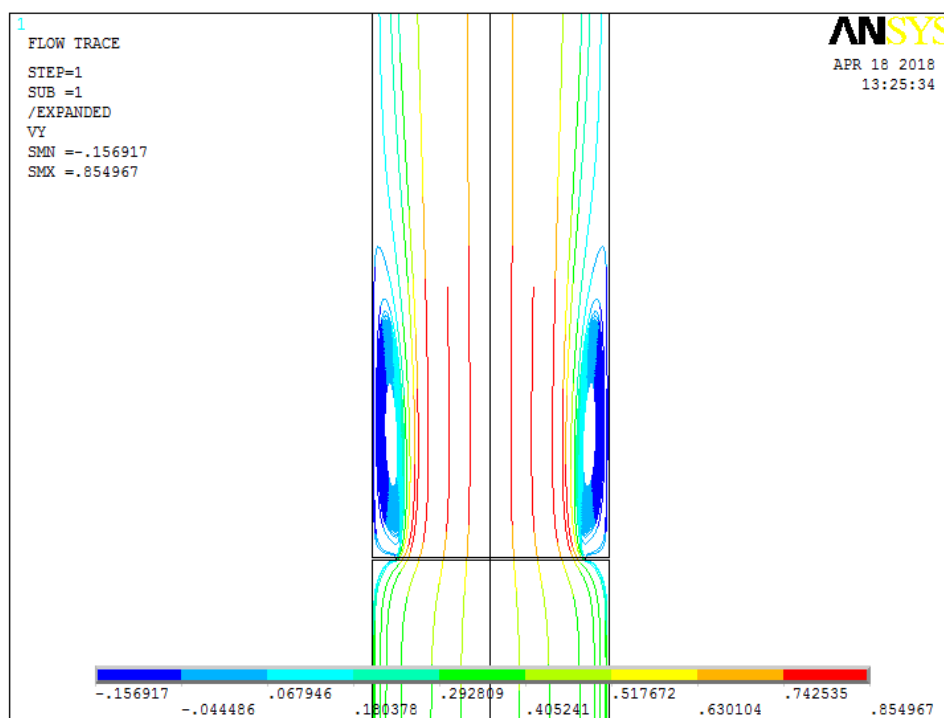


Рисунок 62 – Линии тока с образованием вихрей после нормальной диафрагмы (в отличие от [52] вихрей перед нормальной диафрагмой нет)

2.3.9. Обсуждение результатов моделирования сужающих устройств

Разработаны параметрические модели наиболее часто используемых сужающих устройств в расходомерах. По результатам расчетов с помощью линий тока определены вихревые зоны.

Предлагаемые параметрические модели позволяют проводить теоретическую калибровку расходомеров, а также, за счет изменения геометрических параметров, добиться минимизации их влияния на параметры перекачиваемой в трубопроводе среды.

2.4. Оценка влияния плоского локатора в головном отделении самонаведения на гидродинамику торпед

Торпедное оружие предназначено: для поражения подводных лодок, надводных кораблей и судов; разрушения гидротехнических и портовых сооружений. Для этих целей применяются торпеды, стоящие на вооружении надводных кораблей, подводных лодок и самолетов (вертолетов) морской авиации [60].

Торпеда – самодвижущийся подводный снаряд. Современная торпеда конструктивно состоит из нескольких частей (Рисунок 63): головная часть (боевое зарядное отделение (БЗО)), средняя часть, кормовое отделение и хвостовая часть. В БЗО размещаются: заряд взрывчатого вещества, запальная

принадлежность, контактный и неконтактный взрыватель. К переднему срезу БЗО крепится головка аппаратуры самонаведения (АСН) [60-62].

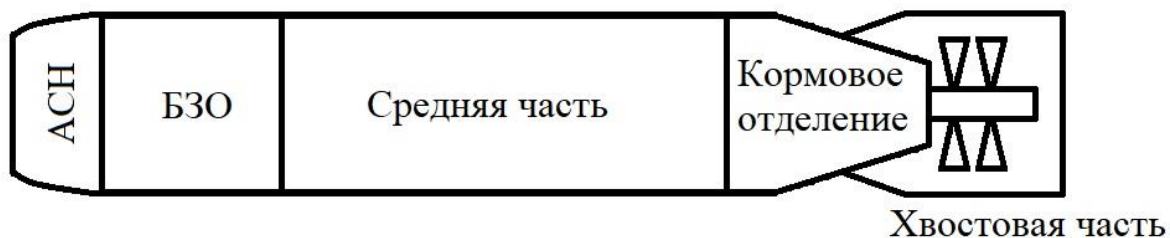


Рисунок 63 – Составные части торпед с плоской носовой приемно-излучающей антенной [60-62]

Система самонаведения рассматриваемых торпед имеет плоскую носовую приемно-излучающую антенну (Рисунок 64) сотовой конструкции. Торпеда способна находить как сами цели, так и их кильватерный след. Позади головного отсека (системы самонаведения и боевого зарядного отделения) в средней части рассматриваемой конструкции торпеды последовательно располагаются резервуарное, зарядное и приборное отделения. Кормовое отделение отдается под установку двигателя и исполнительных механизмов системы управления. В хвостовой части располагается движитель и стабилизаторы [61] (Рисунок 63).



Рисунок 64 – Изучаемая торпеда [61]

Форма и размеры головной части оказывают существенное влияние на гидродинамику торпеды, особенно на величину силы лобового сопротивления. Средняя часть корпуса торпеды обычно имеет цилиндрическую форму. Кормовая часть корпуса имеет, как правило, коническую форму и предназначена

для улучшения условий обтекания торпеды водяным потоком, а также крепления движителя и стабилизатора.

Одной из основных задач, решаемых при рассмотрении гидродинамики морских торпед, является обеспечение устойчивости ее движения на заданной глубине и уменьшение лобового сопротивления (т.е. рассеивания энергии) при перемещении.

Роль стабилизатора очевидна – с его помощью конструкторы обеспечивают устойчивое движение и управление торпедой в воде. Однако до настоящего времени в литературе не было проведено ни одного теоретического исследования гидродинамики данного вида боеприпаса, не установлено влияние формы головной части торпеды на лобовое сопротивление ее движению и не предложены меры по его уменьшению.

2.4.1. Постановка задачи

Рассматривается несколько упрощенная конструкция аналогичная морским торпедам, имеющим в головной части плоское локационное устройство [61, 62] (Рисунок 64). Глубина, на которой движется торпеда, считается постоянной и достаточной, чтобы не рассматривать влияние поверхности (границы раздела двух сред воды и воздуха) на сопротивление движению торпеды. Влиянием стабилизаторов и органов управления будем пренебрегать.

Манометрическое давление p_0 на глубине H определится по известной формуле $p_0 = \rho \cdot g \cdot H$, где ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения. Тогда абсолютное давление P на глубине H определяется простейшим суммированием вычисленного давления p от высоты столба жидкости высотой H с давлением от высоты столба воздуха (атмосферным давлением на уровне моря 101350 Па). Таким образом абсолютное P давление на глубине H определяется по формуле $P = \rho \cdot g \cdot H + 101350$.

Выделим цилиндрический объем воды, описанный вокруг торпеды. Для оценки влияния формы головной части торпеды на ее гидродинамику будем предполагать, что давление в этом объеме постоянно и равно абсолютному давлению P , вычисленному для глубины H , определяемой положением оси симметрии торпеды и цилиндрического объема обтекающей ее воды. В этом случае задача для морской торпеды, двигающейся с постоянной скоростью в воде на постоянной глубине без теплопередачи становится осесимметричной.

Это значительное упрощение позволит решить задачу средствами FLOTRAN бесплатной программы ANSYS 10ED, а также провести качественный анализ влияния геометрии головной части торпеды на ее гидродинамику.

Предполагая неподвижность торпеды, задача сводится к исследованию течения, описанного вокруг оси симметрии боеприпаса цилиндрического объема воды, диаметр основания и длина которого больше диаметра и длины торпеды. Передняя кромка локационного устройства предполагается перпендикулярной набегающему потоку [63].

Учитывая осесимметричность постановки задачи и специфику решения гидродинамических задач средствами ANSYS 10 ED/FLOTTRAN [63], в данном случае достаточно рассмотреть плоское радиальное сечение цилиндрического фрагмента воды, обтекающей плоский недеформируемый профиль радиального сечения морской торпеды (Рисунок 64).

В соответствии со спецификой отображения результатов решения осесимметричных гидродинамических задач средствами ANSYS 10 ED/FLOTTRAN [63] вертикальная ось OY будет являться осью симметрии торпеды и набегающий поток воды будет двигаться также вертикально вдоль оси OY . Поскольку при решении используется гипотеза несжимаемости воды, то ее плотность должна приниматься постоянной на любой глубине.

Описание параметров модели. В данном исследовании используются следующие наименования геометрических параметров модели (Рисунок 65): L (м) – общая длина боеприпаса до движителя, $L0$ (м) – вспомогательный параметр для дальнейших исследований (для торпед с плоской носовой частью $L0 = 0$), $L1$ (м) – длина головной части аппаратуры самонаведения, $L2$ (м) – длина торпеды до начала конического сужения в кормовой части торпеды, $R0$ (м) – радиус плоской носовой приемно-излучающей антенны, $R1$ (м) – наибольший радиус торпеды (половина калибра), $R2$ (м) – условный наименьший радиус торпеды в кормовой части перед движителем. Кроме того, будет использоваться параметры H (м) – глубина, на которой движется торпеда, $V0$ – скорость набегающего потока (15 м/с) [62], $T0$ – температура окружающей среды (20°C).

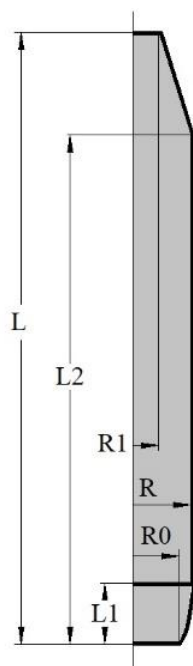


Рисунок 65 – Геометрические параметры осевого сечения торпеды без стабилизатора

2.4.2. Построение геометрической модели расчетной области

Команды № 1 и 2 (Таблица 54) определяют имя анализа *torpedo* с сохранением имен открытых файлов задачи (файла ошибок, результатов и т.д.), с которыми будет осуществляться обмен с данными, а также обеспечивают вход в препроцессор для подготовки геометрии расчетной области, ее разбиения на конечные элементы и определения краевых условий.

Команды № 3 и 4 (Таблица 54) производят выбор двумерного элемента текучей среды FLUID141 с опцией осесимметричности относительно Y-оси.

Команды № 5-14 (Таблица 54) устанавливают значения используемых параметров.

Таблица 54 – Код APDL построения контурных линий модели

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, torpedo, 0	24.	Y(4) = L2 + 2*L
2.	/PREP7	25.	X(5) = R1
3.	ET, 1, FLUID141	26.	Y(5) = 3*L
4.	KEYOPT, 1, 3, 1	27.	X(6) = 0
5.	L = 7.4	28.	Y(6) = 3*L
6.	L0 = 0	29.	X(7) = 0
7.	L1 = 0.20	30.	Y(7) = 5*L
8.	L2 = 6.4	31.	X(8) = 10*R
9.	R = 0.265	32.	Y(8) = 5*L
10.	R0 = 0.18	33.	X(9) = 10*R
11.	R1 = 0.15	34.	Y(9) = 0
12.	H = 10	35.	X(10) = 0
13.	V0 = 15	36.	Y(10) = 0
14.	P = 1000*9.8*H + 101350	37.	*DO, i, 1, 10
15.	*DIM, X, ARRAY, 10	38.	K, i, X(i), Y(i)
16.	*DIM, Y, ARRAY, 10	39.	*ENDDO
17.	X(1) = 0	40.	LSTR, 1, 2
18.	Y(1) = 2*L-L0	41.	BSPLIN, 2, , , , , 3, - COS(ATAN((Y(2)-Y(1))/(X(2)- X(1)))), -SIN(ATAN((Y(2)- Y(1))/(X(2)-X(1)))), 0, 0, 1, 0
19.	X(2) = R0	42.	*DO, i, 3, 9
20.	Y(2) = 2*L	43.	LSTR, i, i+1
21.	X(3) = R	44.	*ENDDO
22.	Y(3) = L1+2*L	45.	LSTR, 10, 1
23.	X(4) = R	46.	AL, ALL

Команды № 15-36 (Таблица 54) задают массив координат ключевых точек модели радиального сечения торпеды и среды вокруг ее. Далее команды № 37-39 (Таблица 54) в цикле строят ключевые точки модели на рабочей плоскости, а команды № 40-45 (Таблица 54) строят границу модели радиального сечения среды на рабочей плоскости. Команда № 46 (Таблица 54) создает плоскость радиального сечения цилиндрической среды с помещенной в нее торпедой.

2.4.3. Построение свободного разбиения модели

Команды №1-3 (Таблица 55) назначают размеры элементов на границах модели. Команда № 4 (Таблица 55) задает размер элемента внутри радиального сечения модели. Команды №5-7 (Таблица 55) производят свободное разбиение модели последовательно по вспомогательным областям и использованием двух видов команд.

Таблица 55 – Команды подготовки и построения свободного разбиения модели

№	Команда	№	Команда
1.	*DO, i, 1, 5, 1	5.	MSHMID, 0
2.	LESIZE, i, L/100	6.	MSHKEY, 0
3.	*ENDDO	7.	AMESH, 1
4.	AESIZE, 1, L/40	8.	---

2.4.4. Задание краевых условий

Команды №1-8 (Таблица 56) устанавливают краевые условия задачи обтекания профиля радиального сечения торпеды: скорость набегающего потока воды (команды № 1 и 2, Таблица 56), выбор линий профиля боеприпаса и условия прилипания на его границе (команды № 3-6, Таблица 56), условия осесимметричности задачи (команды № 7 и 8, Таблица 56).

Таблица 56 – Команды задания краевых условий

№	Команда	№	Команда
1.	DL, 9, , VX, 0, 1	7.	DL, 6, , VX, 0, 1
2.	DL, 9, , VY, V0, 1	8.	DL, 10, , VX, 0, 1
3.	LSEL, S, LINE, , 1, 5	9.	DL, 7, , PRES, 0, 1
4.	DL, ALL, , VX, 0, 1	10.	DL, 8, , PRES, 0, 1
5.	DL, ALL, , VY, 0, 1	11.	DL, 9, , PRES, 0, 1
6.	ALLSEL, ALL	12.	---

Условия отсутствия избыточного давления на фронтальной, задней и боковой границах водной среды определяется командами № 9-11 (Таблица 56).

2.4.5. Определение параметров среды и решение задачи

Предполагается, что профиль радиального сечения торпеды обтекается водой без теплообмена с известными значениями скорости, давления, плотности, вязкости и температуры набегающего потока. Таким образом, течение вязкой среды является стационарным, адиабатическим и, с учетом геометрии профиля боеприпаса, турбулентным. Команды указания параметров вязкой среды (воды), а также параметров решения поставленной задачи приведены ранее (Таблица 39).

Команды № 1-9 (Таблица 39) указывают стандартные свойства воды с постоянными значениями плотности, вязкости, теплопроводности, удельной теплоемкости и абсолютного давления для решаемой задачи.

Команды №1-4 (Таблица 40) определяют модель течения (адиабатическое, турбулентное движение несжимаемой текучей среды), команды № 5-7 (Таблица 40) производят выбор параметров решателя (модель турбулентности, алгоритм решения и количество итераций)

Команды № 8-10 (Таблица 40), задают величины относительных параметров для обеспечения сходимости решения поставленной задачи.

Команды № 12 и 13 (Таблица 40) обеспечивают переход из препроцессора в среду решателя, а также выполняет запуск решения.

2.4.6. Отображение результатов решения

Поскольку задача установившегося движения воды решается итерационно, для получения доступа к результатам анализа необходимо прочитать последние по времени данные решения с помощью первых двух команд двух команд постпроцессора (Таблица 52).

Для отображения модели в осесимметричном виде перед отображением результатов необходимо воспользоваться третьей командой (Таблица 52). После этого можно отобразить, например, распределение давления в головной части торпеды (команда № 4, Таблица 52).

2.4.7. Обсуждение результатов моделирования

Удобство использования параметрической модели заключается в том, что исследователь получает возможность вариации геометрических размеров исследуемого объекта для поиска оптимальной по заданным критериям формы без изменения логики построения модели, реализованной в ранее созданном списке команд.

Положив параметр $L0$ (м) (Рисунок 67) (команда 6, Таблица 54) отличным от нуля, например, $L0 = 0.3$ (м), что соответствует конической головной части с углом при вершине близким к 31 градусу, можно, используя остальные команды таблиц 54-56 без изменений, получить, что в этом случае ожидается общее снижение давления в головной части около двух раз (Рисунок 68). С учетом наклона поверхности конуса можно ожидать снижение силы сопротивления движению торпеды более чем в два раза.

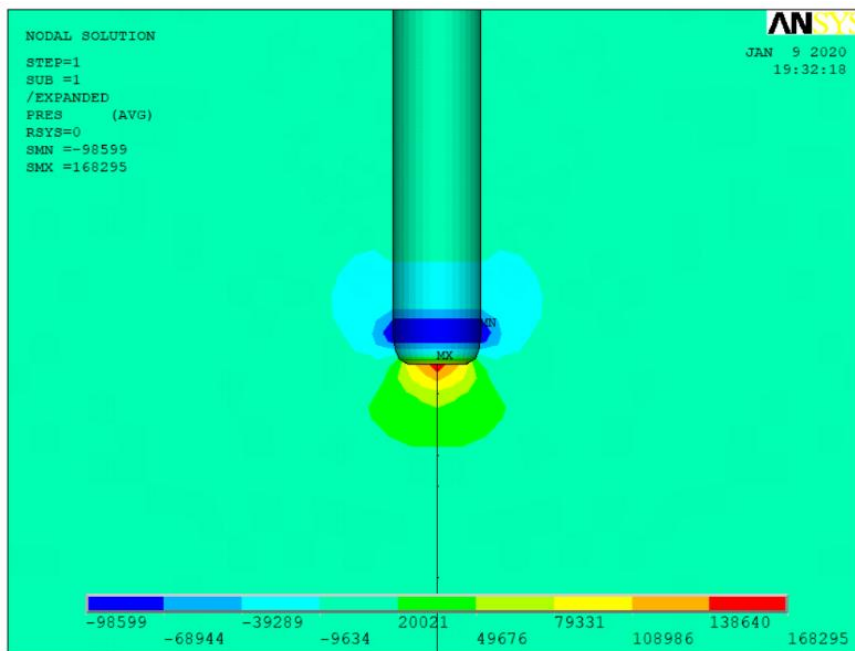


Рисунок 66 – Распределение давления в головной части торпеды с плоским носовым локатором

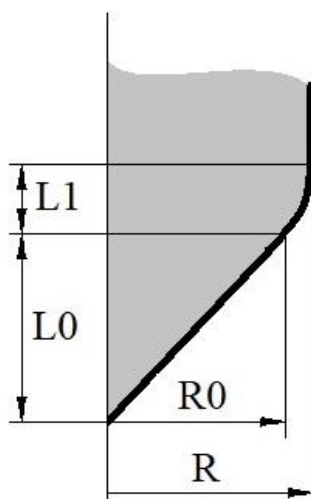


Рисунок 67 – Геометрический смысл параметра $L0$

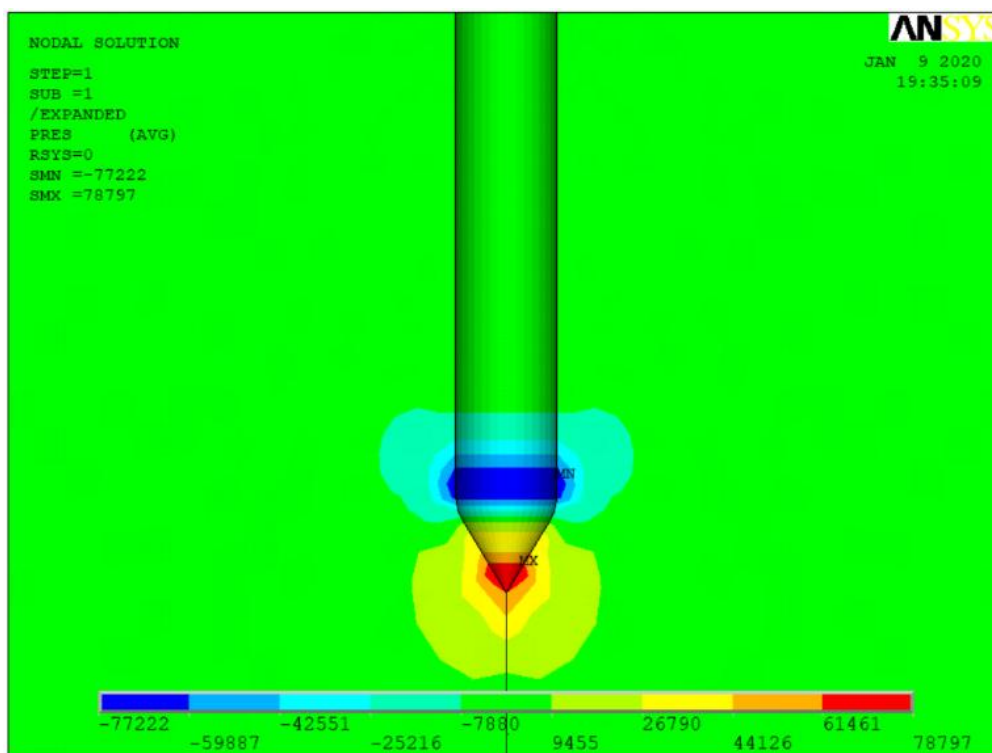


Рисунок 68 – Распределение давления в головной части торпеды с коническим обтекателем

Установлено, что плоский локатор в головном отделении торпеды служит мощным гидродинамическим тормозом, сокращающим, как следствие, скорость движения торпеды и дальность ее применения.

С другой стороны, в силу большой длины торпеды, использование этого конструктивного элемента не может приводить к снижению эффективности хвостового стабилизатора и управляемости торпеды.

Однако, если торпеды имеют средства управления в средней или головной части торпеды, то наличие плоского локатора может привести к значительному ухудшению управляемости боеприпаса на траектории движения.

В качестве рекомендаций по улучшению гидродинамики торпед с плоской носовой частью следует рассмотреть вариант крепления конического обтекателя из радио проницаемого материала, используемого на современных боевых самолетах для создания обтекателей, прикрывающих носовые локационные системы.

Это существенно увеличит как скорость перемещения торпеды, так и дальность ее применения.

ГЛАВА 3. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ АЭРОДИНАМИКИ

3.1. Аэродинамический расчет принудительной вентиляции помещений

До настоящего времени под аэродинамическим расчетом вентиляции понимался аэродинамический расчет воздухопроводов и прочего оборудования для кондиционирования воздуха. Несмотря на то, что основной задачей вентиляции помещения является кратная смена воздуха в нем, до настоящего времени качество смены воздуха не вызывало должного интереса [64].

Под качеством смены воздуха авторы понимают наличие внутренних слабо вентилируемых вихревых «карманов», смена воздуха в которых затруднена в связи с как конструктивными особенностями вентиляции, так и геометрии самого помещения.

На сегодняшний день разработано достаточно большое количество программных продуктов, которые позволяют провести качественный аэродинамический расчет вентиляции помещения, и, на взгляд авторов, эти возможности необходимо внедрять в практику проектирования вентиляции промышленных и жилых сооружений с целью уменьшения слабо вентилируемых зон.

3.1.1. Постановка задачи

Моделируется вентиляция помещения при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$ потоком вязкого воздуха поступающего из канала системы вентиляции через два воздуховода с одинаковой заданной скоростью (параметр $V0$) и заданным направлением, моделирующем направление шторок воздуховода (параметр $ALFA$ – угол в градусах измеряемый от стены помещения) (Рисунок 69). С технической точки зрения рассматриваемая схема вентилирования (Рисунок 69) соответствует также креплению двух одинаковых бытовых кондиционеров к стенам комнат и работающих в одном режиме вентилирования. Отметим, что если $ALFA = 90^\circ$, то рассматривается случай отсутствия перенаправления входящего потока с помощью шторок. Теплообмен воздуха и стен, источники и стоки тепла отсутствуют. Режим течения предполагается стационарным, адиабатическим и турбулентным. Сброс воздуха осуществляется в вытяжную шахту в помещении, условно соответствующем кухне. Таким образом, манометрическое давление в вытяжной шахте равно нулю.

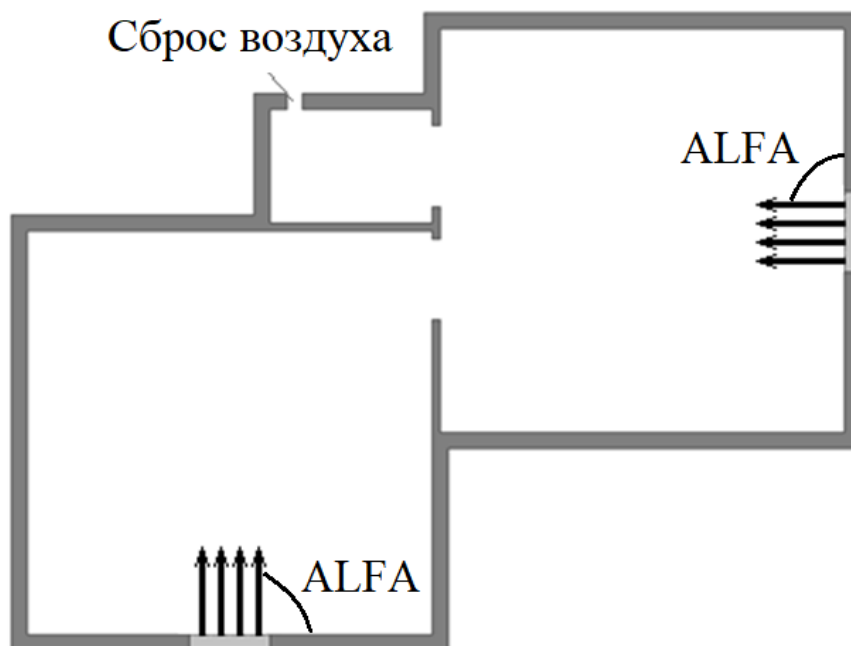


Рисунок 69 – Модель вентиляции помещения в предположении отсутствия корректировки потока воздуха из воздуховода (на рисунке $ALFA = 90^\circ$) при помощи направляющих шторок

3.1.2. Построение геометрической модели расчетной области и задания атрибутов

Команды № 1 и 2 (Таблица 57) определяют имя анализа ventilation с сохранением имен открытых файлов задачи (файла ошибок, результатов и т.д.), с которыми будет осуществляться обмен данными, а также обеспечивают вход в препроцессор для подготовки геометрии расчетной области, ее разбиения на конечные элементы и определения краевых условий.

Команда № 3 (Таблица 57) производят выбор двумерного элемента текущей среды FLUID141.

Следующим этапом проведения подготовки задачи к решению является построение геометрической области, в которой будет решаться данная задача. Задача решается пошагово. На первом шаге создается набор ключевых точек модели с помощью команд № 4-29 (Таблица 57). В данном случае ключевыми точками являются угловые точки плана помещения, а также точки, ограничивающие оконные проемы и вытяжную вентиляционную шахту (Таблица 57).

На втором шаге создаются линии плана помещения, соединяющие ключевые точки командами № 30-41 (Таблица 57).

На третьем шаге создаются поверхности, определяющие комнаты помещения, с помощью команд № 42-58 (Рисунок 70).

Из атрибутов поверхностей в данном случае необходимо присвоить номер конечного элемента, который будет использоваться для разбиения командами № 59-61 (Таблица 57). Поскольку элемент используется только один и

особенностей задания среды в ANSYS/FLOTRAN, то и эти последние три команды можно игнорировать, как и в примерах главы, посвященной гидродинамическим задачам.

Обращает на себя внимание, то, что параметры в рассматриваемой задаче будут определяться ниже перед блоком, задающим свойства среды, что демонстрирует определенную гибкость в использовании APDL.

Таблица 57 – Команды создания плана внутреннего объема помещения и определения атрибутов поверхностей

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, ventilation,0	32.	LSTR, i, i+1
2.	/PREP7	33.	*ENDDO
3.	ET, 1, FLUID141	34.	LSTR, 9, 18
4.	K, 1, 0, 0	35.	LSTR, 19, 26
5.	K, 2, -2, 0	36.	*DO, i, 19, 25
6.	K, 3, -3, 0	37.	LSTR, i, i+1
7.	K, 4, -5, 0	38.	*ENDDO
8.	K, 5, -5, 5	39.	LSTR, 7, 10
9.	K, 6, 0, 5	40.	LSTR, 11, 26
10.	K, 7, 0, 4.9	41.	LSTR, 12, 19
11.	K, 8, 0, 3.9	42.	LSEL, S, LINE, , 1, 8
12.	K, 9, 0.1, 3.9	43.	AL, ALL
13.	K, 10, 0.1, 4.9	44.	ALLSEL, ALL
14.	K, 11, 0.1, 5.3	45.	LSEL, S, LINE, , 10, 19
15.	K, 12, 0.1, 6.3	46.	AL, ALL
16.	K, 13, 0.1, 7.5	47.	ALLSEL, ALL
17.	K, 14, 5.1, 7.5	48.	LSEL, S, LINE, , 20, 27
18.	K, 15, 5.1, 5.5	49.	AL, ALL
19.	K, 16, 5.1, 4.5	50.	ALLSEL, ALL
20.	K, 17, 5.1, 2.5	51.	LSEL, S, LINE, , 8, 10
21.	K, 18, 0.1, 2.5	52.	LSEL, A, LINE, , 28
22.	K, 19, 0, 6.3	53.	AL, ALL
23.	K, 20, 0, 6.5	54.	ALLSEL, ALL
24.	K, 21, -1.6, 6.5	55.	LSEL, S, LINE, , 29, 30
25.	K, 22, -1.8, 6.5	56.	LSEL, A, LINE, , 12, 20, 8
26.	K, 23, -2, 6.5	57.	AL, ALL
27.	K, 24, -2, 5.1	58.	ALLSEL, ALL
28.	K, 25, 0, 5.1	59.	ASEL, ALL
29.	K, 26, 0, 5.3	60.	AATT, , , 1
30.	LSTR, 8, 1	61.	ALLSEL, ALL
31.	*DO, i, 1, 17	62.	---

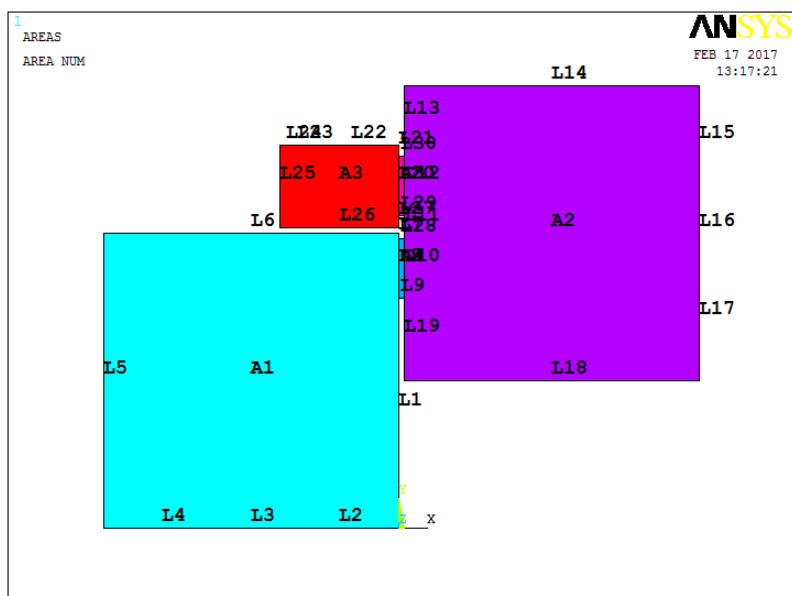


Рисунок 70 – Результат построения плана помещения

3.1.3. Построение упорядоченного конечноэлементного разбиения плана помещения

На втором шаге осуществляется назначение количества делений на линиях модели плана помещения с помощью (Таблица 58). Количество делений назначалось, исходя из ограничений на разрешенное количество элементов в учебных версиях, например, ANSYS 10 ED.

Таблица 58 – Назначение количества делений на линиях модели

№	Команда	№	Команда
1.	LESIZE, 1, , , 19	16.	LESIZE, 16, , , 3
2.	LESIZE, 2, , , 11	17.	LESIZE, 17, , , 11
3.	LESIZE, 3, , , 3	18.	LESIZE, 18, , , 25
4.	LESIZE, 4, , , 11	19.	LESIZE, 19, , , 7
5.	LESIZE, 5, , , 25	20.	LESIZE, 20, , , 5
6.	LESIZE, 6, , , 25	21.	LESIZE, 21, , , 1
7.	LESIZE, 7, , , 1	22.	LESIZE, 22, , , 8
8.	LESIZE, 8, , , 5	23.	LESIZE, 23, , , 1
9.	LESIZE, 9, , , 1	24.	LESIZE, 24, , , 1
10.	LESIZE, 10, , , 5	25.	LESIZE, 25, , , 7
11.	LESIZE, 11, , , 2	26.	LESIZE, 26, , , 10
12.	LESIZE, 12, , , 5	27.	LESIZE, 27, , , 1
13.	LESIZE, 13, , , 6	28.	LESIZE, 28, , , 1
14.	LESIZE, 14, , , 25	29.	LESIZE, 29, , , 1
15.	LESIZE, 15, , , 11	30.	LESIZE, 30, , , 1

Хотя во всех руководствах рекомендуется выполнять разбиение модели сразу целиком, однако в связи с особенностями геометрии плана помещения построить упорядоченное разбиение не представляется возможным. С другой стороны, средства построения сетки в современных версиях ANSYS вполне правильно справляются с этой задачей, если строить упорядоченное разбиение по частям, что и будет продемонстрировано при решении данной задачи (Таблица 59).

Таким образом для построения разбиения всей модели будем рассматривать отдельно $A1$, $A2$, $A3$, $A4$, $A5$ проводить дополнительную подготовку их границ (для $A1$, $A2$, $A3$) и отдельно строить упорядоченное разбиение всех поверхностей.

Для подготовки к упорядоченному разбиению поверхности $A1$ необходимо предварительно выполнить операцию конкатенации линий $L2$, $L3$, $L4$ и отдельно линий $L1$, $L7$, $L8$ с помощью команд № 1-7 (Таблица 59).

Далее можно строить упорядоченное разбиение поверхности $A1$ с помощью команд № 8-10 (Таблица 59).

После этого необходимо удалить конкатенацию линий $L2$, $L3$, $L4$ и $L1$, $L7$, $L8$ с помощью команды № 11 (Таблица 59).

Перейдем к построению упорядоченного разбиения поверхности $A2$. Для этого, как и в предыдущем случае предварительно выполним конкатенацию двух наборов линий $L15$, $L16$, $L17$ и $L10$, $L13$, $L19$ с помощью набора команд № 12-18 (Таблица 59).

Таблица 59 – Последовательное построение разбиение модели плана помещения

№	Команда	№	Команда
1.	LSEL, S, LINE, , 2, 4	16.	LSEL, A, LINE, , 19
2.	LCCAT, ALL	17.	LCCAT, ALL
3.	ALLSEL, ALL	18.	ALLSEL, ALL
4.	LSEL, S, LINE, , 7, 8	19.	AMESH, 2
5.	LSEL, A, LINE, , 1	20.	LDELE, 31, 32
6.	LCCAT, ALL	21.	LSEL, S, LINE, , 22, 24
7.	ALLSEL, ALL	22.	LCCAT, ALL
8.	MSHMID, 0	23.	ALLSEL, ALL
9.	MSHKEY, 1	24.	LSEL, S, LINE, , 20, 21
10.	AMESH, 1	25.	LSEL, A, LINE, , 27
11.	LDELE, 31, 32	26.	LCCAT, ALL
12.	LSEL, S, LINE, , 15, 17	27.	ALLSEL, ALL
13.	LCCAT, ALL	28.	AMESH, 3
14.	ALLSEL, ALL	29.	LDELE, 31, 32
15.	LSEL, S, LINE, , 10, 13	30.	AMESH, 4, 5

После проведенных подготовительных работ упорядоченное разбиение поверхности $A2$ строиться с помощью команды № 19 (Таблица 59).

После этого необходимо удалить конкатенацию линий $L15, L16, L17$ и $L10, L13, L19$ с помощью команды № 20 (Таблица 59).

При построении упорядоченного разбиения поверхности $A3$ отметим, что в данном случае необходимо выполнить конкатенацию еще двух наборов линий $L22, L23, L24$ и $L20, L21, L27$. После этого построить упорядоченное разбиение $A3$ и затем удалить конкатенацию линий $L22, L23, L24$ и $L20, L21, L27$ (команды № 21-29, Таблица 59).

Упорядоченное разбиение поверхностей $A4$ и $A5$ осуществляется без предварительной подготовки с помощью команды № 30 (Таблица 59, Рисунок 71).

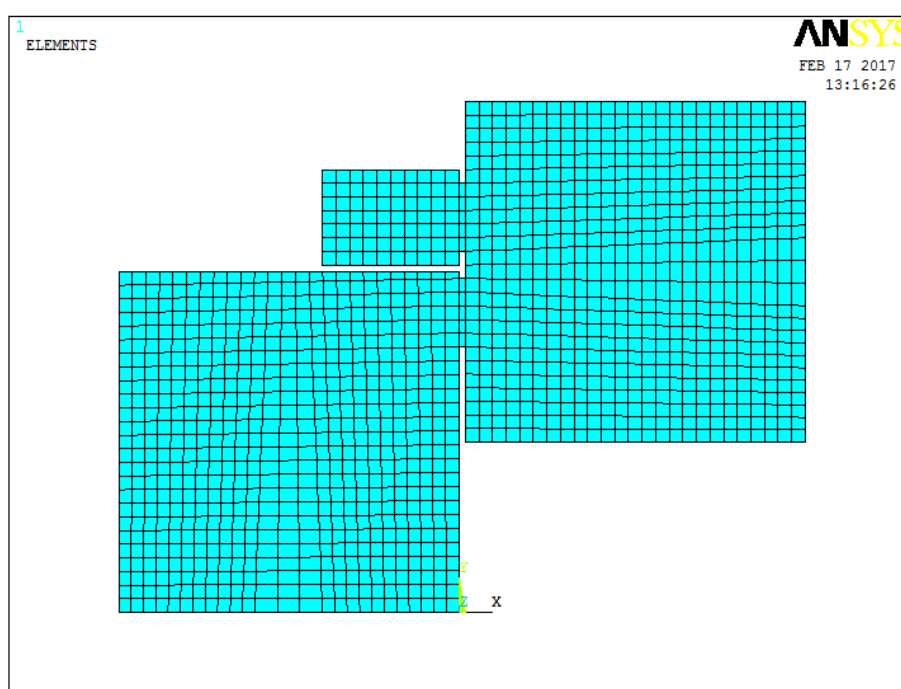


Рисунок 71 – Упорядоченное разбиение модели плана помещения

3.1.4. Параметризация модели

Введем простейшую параметризацию в модели набором четырех команд, которые описывают входящий поток и температуру среды (Таблица 60).

Таблица 60 – Параметры потока и температуры среды

№	Команда
1.	ALFA = 90
2.	V0 = 5
3.	T0 = 20
4.	PI = ACOS(-1)

3.1.5. Задание свойств воздуха

В отличие от структурного анализа и связанных задач структурного анализа свойства газа и жидкости задаются отдельными командами. Поскольку в отличие от решений задач гидродинамики, рассмотренных выше, характеристики воздуха (плотность, динамическая вязкость, теплопроводность, удельная теплоемкость) являются предопределенными (заданными в единицах системы СИ) в рамках модели *AIR-SI*, а также предполагаются в рамках решения всех поставленных в данной главе задач величинами переменными, то список команд, определяющих свойства среды, будет значительно отличаться от ранее рассмотренного (команды № 1-8, Таблица 61).

Задание термодинамических характеристик невозмущенного потока выполняется с помощью указания величины температуры торможения $T_{\text{торм}} = T_0 + V_0^2 / (2 \cdot c_p) = T_0 + V_0^2 / 2008^\circ \text{K}$ (команда № 9, Таблица 61).

Таблица 61 – Список команд, определяющих свойства сжимаемого воздуха

№	Команда
1.	FLDATA7, PROT, DENS, AIR-SI
2.	FLDATA13, VARY, DENS, T
3.	FLDATA7, PROT, VISC, AIR-SI
4.	FLDATA13, VARY, VISC, T
5.	FLDATA7, PROT, COND, AIR-SI
6.	FLDATA13, VARY, COND, T
7.	FLDATA7, PROT, SPHT, AIR-SI
8.	FLDATA13, VARY, SPHT, T
9.	FLDATA14, TEMP, TTOT, 273+T0+V0*V0/2008

3.1.6. Задание скоростей воздуха на границе модели плана помещения

В задаче ставятся краевые условия полного прилипания, кроме линий, имитирующих окна (или кондиционер), а также вытяжку. На последней линии ставится краевое условие равенства нулю манометрического давления. Данная операция может быть выполнена с помощью команды *DL* (Таблица 62).

Отметим, что ненулевая скорость потока задается только на линиях *L3* и *L16* (команды № 1-4, Таблица 62). На других внешних линиях модели (*L1, L2, L4, L5, L6, L7, L11, L13, L14, L15, L17, L18, L19, L21, L22, L24, L25, L26, L27, L28, L29, L30*) проекции скорости потока равны нулю (команды № 5-11, Таблица 62), а на линии *L23* задается нулевое давление (команда № 12, Таблица 62).

Таблица 62 – Задание краевых условий на плане помещения

№	Команда
1.	DL, 3, , VX, V0*COS(ALFA/180*PI), 1
2.	DL, 3, , VY, V0*SIN(ALFA/180*PI), 1
3.	DL, 16, , VX, -V0*SIN(ALFA/180*PI), 1
4.	DL, 16, , VY, V0*COS(ALFA/180*PI), 1
5.	LSEL, S, LINE, , 8, 20, 4
6.	LSEL, A, LINE, , 3, 10, 7
7.	LSEL, A, LINE, , 23
8.	LSEL, INVE
9.	DL, ALL, , VX, 0, 1
10.	DL, ALL, , VY, 0, 1
11.	ALLSEL, ALL
12.	DL, 23, , PRES, 0, 1

3.1.7. Выбор модели течения газа, модели турбулентности, алгоритма решения и некоторых других параметров решателя

Стоит отметить, что поскольку скорость движения потока воздуха невелика, то изменение плотности газа мало и влияние сжимаемости несущественно. Поэтому в данном случае не обязательно решать задачу в такой полной постановке.

В целом в данном примере, как и ранее при решении задач гидродинамики, используется уже известный набор команд (Таблица 40).

Задание стационарной и вихревой модели течения жидкости необходимо осуществить с помощью команд с № 1 по 3 (Таблица 40).

Вместо команды № 4 (Таблица 40) следует использовать команду:

FLDATA1, SOLU, COMP, 1.

Она задает сжимаемость среды, т.е. в данном примере воздуха.

В примере выбрана модель турбулентности *RNG* (*re-normalized group turbulence model*), поскольку, как считается она является наиболее эффективной в моделях с искривленной геометрией (команда № 5, Таблица 40).

Выбирается алгоритм решения «по умолчанию» *SIMPLEF* (команда № 6, Таблица 40), как наиболее универсальный.

В связи с особенностью решения задач течения среды в ANSYS необходимо ограничить количество итераций, т.к. обычные критерии сходимости аналогичные структурному анализу не работают (команда № 7, Таблица 40).

Обойти всевозможные вычислительные ошибки можно с помощью набора уже известных трех команд (команды № 8-10, Таблица 40).

Запуск на решение выполняется также стандартным набором команд (команды № 12-13, Таблица 40).

3.1.8. Отображение линий тока

Поскольку итерационно решается задача установившегося движения воздуха, то для получения доступа к результатам решения необходимо прочесть последние (по времени) данные решения. Выполняется это с помощью команд */POST1* и *SET, LAST*.

Для оценки качества вентиляции помещения удобно пользоваться отображением траекторий движения элементов воздуха (линий тока). Это позволяет оценить размеры вихревых «карманов», в которых воздух движется по замкнутым линиям и соответственно не может смениться.

Для отображения линий тока необходимо выполнить подготовительные действия, а именно указать некоторые узловые точки конечноэлементной модели. Предполагается, что эти точки расположены на линиях тока, которые хочет рассмотреть исследователь. Необходимо расположить основное количество точек на диагоналях двух наибольших комнат. Данные действия можно выполнить и с помощью набора команд аналогичных уже рассмотренным выше (Таблица 53). Однако в данном случае выполним эту операцию с помощью стандартного пункта главного меню: *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Defi Trace Pt*. Отметим, что для версии ANSYS 10 ED количество линий ограничено числом 25.

Далее на втором шаге для отображения линий тока необходимо воспользоваться вторым пунктом главного меню: *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Plot Flow Tra*. В окне *Plot Flow Trace* необходимо выбрать требуемые результаты в списке *Item to be contoured along trace* (Рисунок 72).

3.1.9. Обсуждение результатов моделирования

Разработана методика анализа вентиляции помещений с использованием ANSYS 10 ED. Установлено, что на качество вентиляции помещения оказывает влияние не только геометрия самого помещения и расположение воздуховодов, но и возможная переориентация основного потока с помощью шторок.

При чем очевидно, что добиться существенного улучшения качества вентиляции помещения без увеличения числа воздуховодов можно только используя разнонаправленные шторки на каждом из воздуховодов (Рисунок 72).

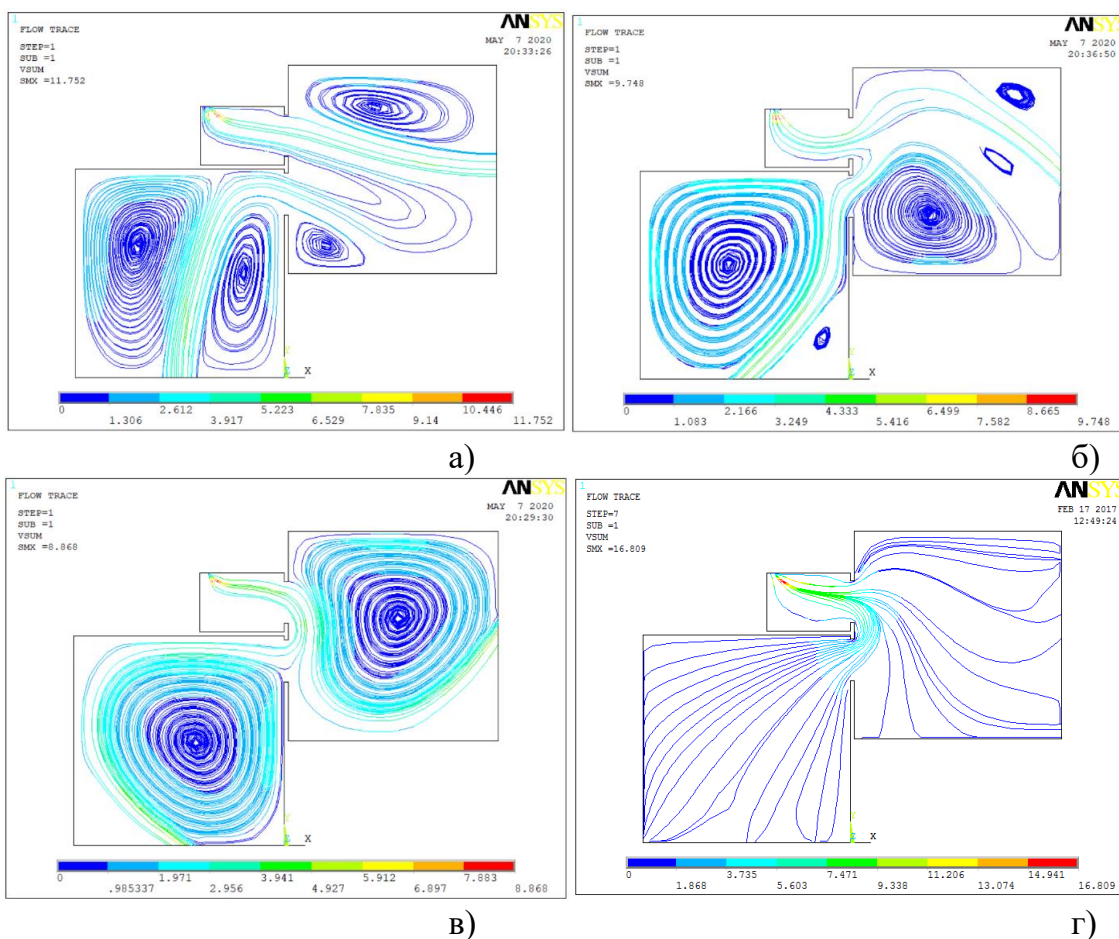


Рисунок 72 – Линии тока воздуха в помещении ($V_0 = 5 \text{ м/с}$): а) $ALFA = 90^\circ$; б) $ALFA = 45^\circ$; в) $ALFA = 145^\circ$; г) идеальная вентиляция при распределении потока воздуха из воздуховодов разнонаправленными шторками (дополнительный расчет с разнонаправленной ориентацией потока воздуха в каждой узловой точке)

3.2. Модель обтекания осколочно-фугасного снаряда потоком сжимаемого воздуха

Одной из основных задач баллистики и проектирования снарядов является увеличения дальности стрельбы за счет оптимизации конструкции боеприпасов для улучшения их аэродинамических параметров, поскольку повышение дальнобойности снарядов позволяет расширить их боевые возможности и улучшить показатели защищенности [63, 65, 66]. На данный момент наиболее эффективным инструментом анализа баллистических характеристик является вычислительная гидродинамика, сокращающая стоимость и значительно упрощающая проектирование снарядов за счет численного моделирования [63, 67–70]. Одной из передовых в области вычислительного анализа является программа конечно-элементного анализа ANSYS, модуль FLOTRAN CFD, который предоставляет возможность производить гидродинамические расчеты в параметрическом виде с помощью кода APDL, что позволяет существенно

сократить время на проведение аэродинамического анализа и проектирования посредством изменения требуемых характеристик.

Настоящая работа построена как пример решения задачи дозвукового адиабатического обтекания осколочно-фугасного снаряда потоком вязкого сжимаемого воздуха. Параметрический вид дает возможность варьировать характеристики при решении краевой задачи, а следовательно, использовать данную модель для оптимизации конструкции рассматриваемого боеприпаса.

3.2.1. Постановка задачи

Рассматривается осколочно-фугасный снаряд,двигающийся с постоянной скоростью в воздушном пространстве без теплопередачи. Предполагая неподвижность воздушной среды, задача сводится к исследованию течения, описанного вокруг оси симметрии боеприпаса цилиндрического объема газовой среды, диаметр основания и длина которого существенно больше калибра и длины снаряда. Учитывая осесимметричность геометрии модели и специфику решения гидродинамических задач средствами ANSYS/FLOTRAN, в данном случае достаточно рассмотреть плоское радиальное сечение цилиндрического фрагмента воздушной среды, обтекающей плоский недеформируемый профиль радиального сечения осколочно-фугасного боеприпаса (Рисунок 73) [63].

Отметим, что в наименованиях некоторых параметров (Рисунок 73) использовано сокращение слова «условный», поскольку положение многих элементов боеприпаса указано не относительно его вершины, а относительно условной точки положения вершины конуса головной части снаряда (Таблица 63).

3.2.2. Построение модели расчетной области

Команды построения геометрии модели поставленной задачи представлены, как и ранее, в виде таблицы (Таблица 64).

Команды №1-2 (Таблица 64) определяют имя анализа *artilleryshell* с сохранением имен открытых файлов задачи (файла ошибок, результатов и т.д.), с которыми будет осуществляться обмен данными, а также обеспечивают вход в препроцессор для подготовки геометрии расчетной области, ее разбиения на конечные элементы и определения краевых условий.

Команды № 3 и 4 (Таблица 64) производят выбор двумерного элемента течения среды FLUID141 с опцией осесимметричности относительно Y-оси.

Команды № 5-16 (Таблица 64) устанавливают значения используемых параметров (Таблица 63).

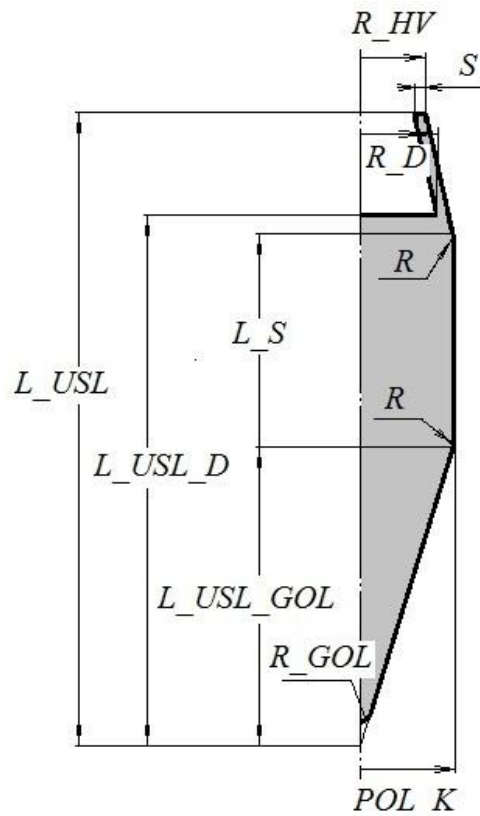


Рисунок 73 – Радиальное сечение осколочно-фугасного снаряда

Таблица 63 – Параметры модели радиального сечения снаряда

Идентификатор и его значение	Описание параметра
$POL_K = 0.061$	Половина калибра снаряда (м)
$L_USL = 0.40$	Условная длина снаряда (м)
$L_USL_D = 0.31$	Условное расстояние до дна снаряда
$L_USL_GOL = 0.15$	Условная длина головной части (м)
$L_S = 0.15$	Условная длина средней части (м)
$R_D = 0.055$	Внутренний радиус дна (м)
$R_HV = 0.05$	Внешний радиус хвостовика (м)
$S = 0.005$	Толщина стенки хвостовика (м)
$R_GOL = 0.005$	Радиус закругления вершины снаряда (м)
$R = 0.15$	Переходные радиусы в геометрии снаряда (м)
$V0 = 400$	Скорость набегающего потока (м/с)
$T0 = 20$	Температура окружающей среды (°C)

Команды № 17-30 (Таблица 64) производят построение радиального сечения снаряда посредством создания ключевых точек (команды № 17-23, Таблица 64), соединения их прямыми отрезками (команды № 24-27, Таблица 64),

скругления средней части снаряда (команды № 28-29, Таблица 64) и создания ограниченной построенными линиями поверхности.

Команды № 31-36 (Таблица 64) создают закругление вершины снаряда. Для этого построенный многоугольник симметрично отображается относительно оси OY с последующим склеиванием обеих поверхностей (команды № 31-32, Таблица 64). Далее строится линия закругления в вершине снаряда и удаляется вспомогательная поверхность (команды № 33-34, Таблица 64). Затем исходная геометрическая модель радиального сечения боеприпаса делится линией закругления на две поверхности и удаляется острая вершина (команды № 35-36, Таблица 64).

Команды №37-39 (Таблица 64) представляют собой создание расчетной области, моделирующей окружающий снаряд цилиндрический объем воздуха. Данный этап состоит в перемещении модели боеприпаса в середину предполагаемой расчетной области, построении прямоугольника и удаления из него радиального сечения снаряда (Рисунок 74).

Таблица 64 – Код построения геометрии модели радиального сечения снаряда

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, artilleryshell, 0	21.	K, 5, R_HV - S, L_USL
2.	/PREP7	22.	K, 6, R_D, L_USL_D
3.	ET, 1, FLUID141	23.	K, 7, 0, L_USL_D
4.	KEYOPT, 1, 3, 1	24.	*DO, i, 1, 6
5.	POL_K = 0.061	25.	LSTR, i, i+1
6.	L_USL = 0.40	26.	*ENDDO
7.	L_USL_D = 0.31	27.	LSTR, 7, 1
8.	L_USL_GOL = 0.15	28.	LFILLT, 1, 2, R
9.	L_S = 0.15	29.	LFILLT, 2, 3, R
10.	R_D = 0.055	30.	AL, ALL
11.	R_HV = 0.05	31.	ARSYM, X, 1, , , , 1, 0
12.	S = 0.005	32.	AGLUE, ALL
13.	R_GOL = 0.005	33.	LFILLT, 1, 19, R_GOL
14.	R = 0.15	34.	ADELE, 3, , , 1
15.	V0 = 400	35.	ASBL, 1, 10, , DELETE, DELETE
16.	T0 = 20	36.	ADELE, 2, , , 1
17.	K, 1, 0, 0	37.	AGEN, 2, 3, , , , L_USL, , , 1, 1
18.	K, 2, POL_K, L_USL_GOL	38.	RECTNG, 0, 10*POL_K, 0, 3*L_USL
19.	K, 3, POL_K, L_USL_GOL+L_S	39.	ASBA, 1, 3, , DELETE, DELETE
20.	K, 4, R_HV, L_USL	40.	---

3.2.3. Построение упорядоченного разбиения модели

Необходимость построения упорядоченного конечноэлементного разбиения модели диктуется требованием получить качественное решение поставленной задачи, а также ограничениями на количество используемых элементов в ANSYS 10 ED. К сожалению, автоматическое построение упорядоченного разбиения данной расчетной области невозможно ввиду несоответствия ее формы требуемой близкой к четырехугольной (Рисунок 74).

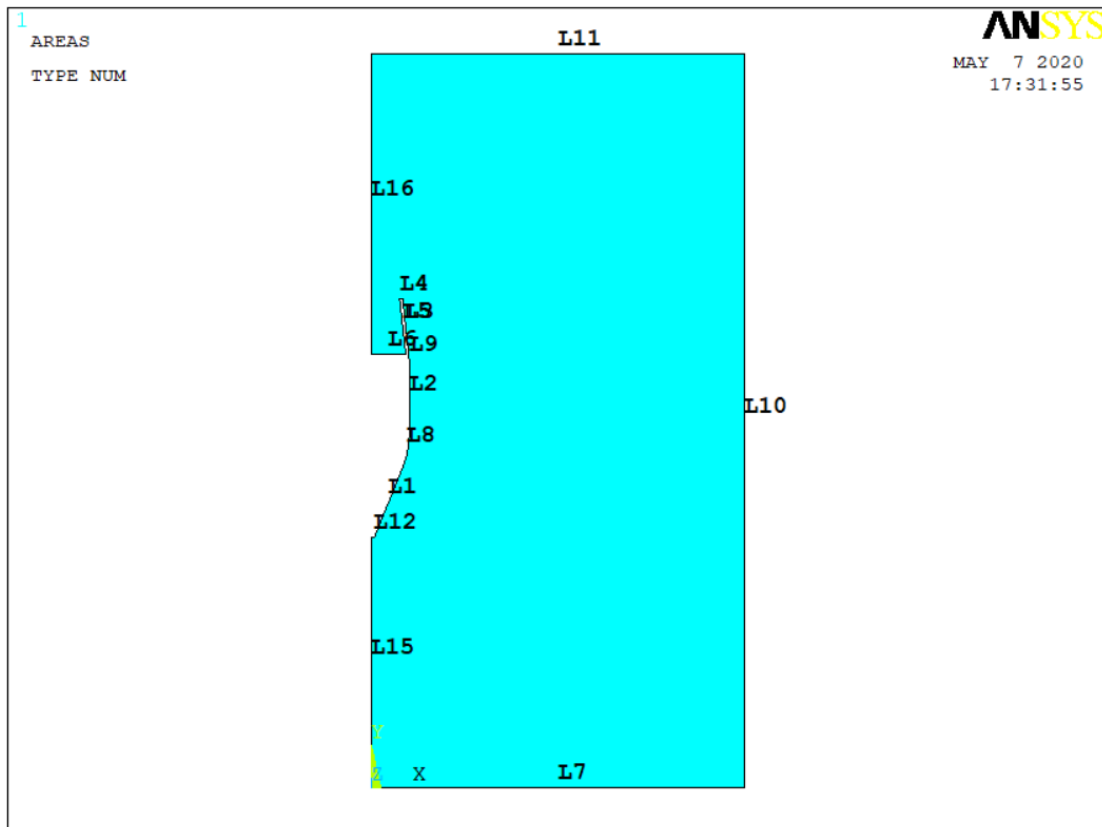


Рисунок 74 – Результат создания расчетной области задачи

С целью построения регулярной сетки необходимо построенную область разделить на несколько подобластей, каждая из которых будет топологически эквивалентна прямоугольнику. Команды вспомогательных действий подготовки модели, а также построения упорядоченного разбиения расчетной области приведены ниже (Таблица 65).

Команды № 1-4 (Таблица 65) представляют собой разделение модели на три подобласти. Команды № 5-10 (Таблица 65) задают количество делений на линиях расчетной области. Команды № 11-15 (Таблица 65) производят упорядоченное разбиение модели с указанием номеров поверхностей и ключевых точек, являющихся углами четырехугольной области (Рисунок 75).

Таблица 65 – Команды подготовки и построения упорядоченного разбиения модели радиального сечения снаряда

№	Команда	№	Команда
1.	LANG, 16, 5, 90	9.	LESIZE, 13, , , 20
2.	LANG, 10, 4, 90	10.	LESIZE, 15, , , 20
3.	ASBL, 2, 14, --, DELETE, KEEP	11.	MSHMID, 0
4.	ASBL, 3, 18, --, DELETE, KEEP	12.	MSHKEY, 1
5.	LESIZE, 4, , , 3	13.	AMAP, 1, 7, 6, 5, 17
6.	LESIZE, 14, , , 5	14.	AMAP, 2, 17, 18, 15, 16
7.	LESIZE, 18, , , 30	15.	AMAP, 4, 1, 14, 18, 4
8.	LESIZE, 3, , , 10	16.	---

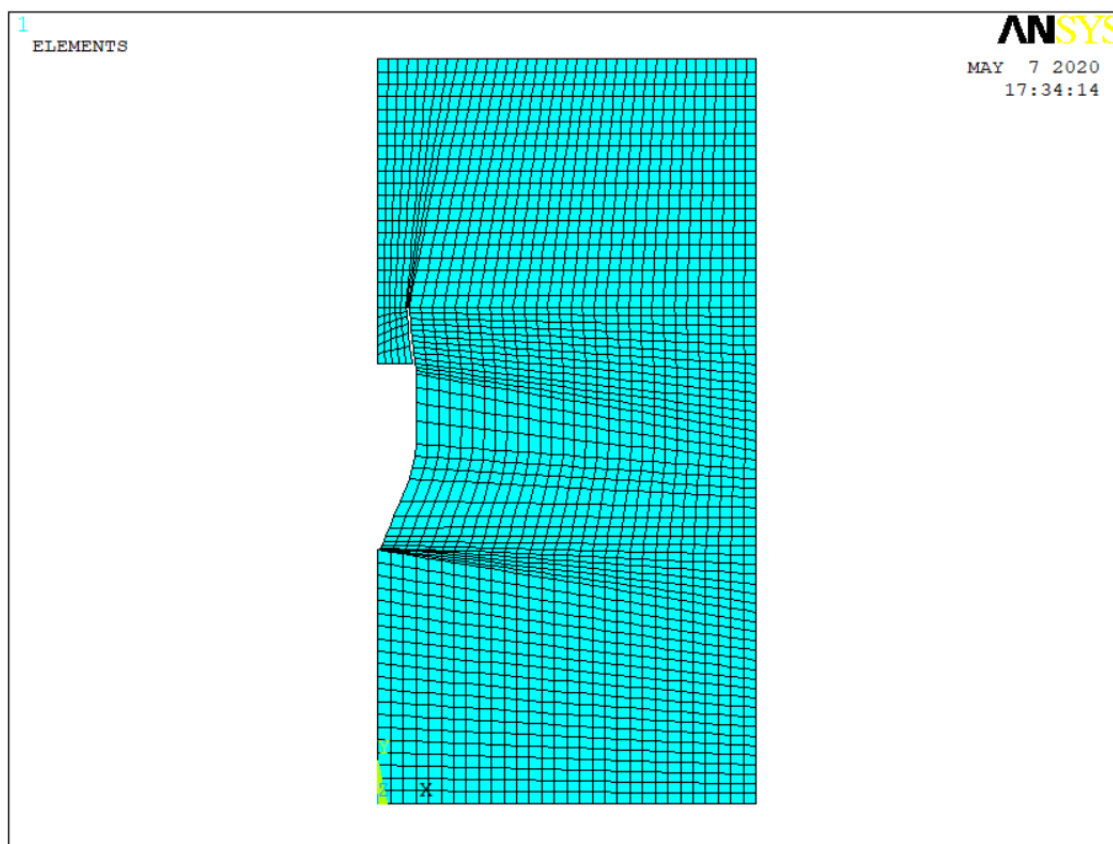


Рисунок 75 – Результат построения упорядоченного разбиения модели

3.2.4. *Определение параметров среды, задание краевых условий, решение задачи и отображение результатов*

Предполагается, что профиль осколочно-фугасного снаряда обтекается воздухом без теплообмена, с известными значениями скорости, давления, плотности и температуры набегающего потока. Таким образом, течение газовой среды является стационарным, адиабатическим и, с учетом геометрии профиля боеприпаса, турбулентным. Команды указания параметров воздушной среды и приведены ранее (Таблица 61). В ней указаны стандартные свойства воздуха с

варьирующимися значениями плотности, динамической вязкости, теплопроводности и удельной теплоемкости, а также задана температура торможения газовой среды по формуле Бернулли.

Скорость набегающего потока устанавливается командами в командах № 1 и 2, (Таблица 66), выбор линий профиля боеприпаса и условия прилипания на его границе осуществляется командами в командах № 3-8 (Таблица 66), условия, соответствующие осесимметричной задаче устанавливаются командами в командах № 9-11 (Таблица 66), а также условия равенства нулю избыточного давления на фронтальной и боковой границах воздушной среды определяются командами в командах № 12-14 (Таблица 66).

Таблица 66 – Команды задания краевых условий для радиального сечения снаряда

№	Команда	№	Команда
1.	DL, 7, , VX, 0, 1	8.	ALLSEL, ALL
2.	DL, 7, , VY, V0, 1	9.	DL, 13, , VX, 0, 1
3.	LSEL, S, LINE, , 1, 6	10.	DL, 15, , VX, 0, 1
4.	LSEL, A, LINE, , 8, 9	11.	DL, 16, , VX, 0, 1
5.	LSEL, A, LINE, , 12	12.	DL, 7, , PRES, 0, 1
6.	DL, ALL, , VX, 0, 1	13.	DL, 10, , PRES, 0, 1
7.	DL, ALL, , VY, 0, 1	14.	DL, 17, , PRES, 0, 1

Модель течения (турбулентное адиабатическое движение текучей среды) определяется уже известными командами (Таблица 40). Однако напомним, что в данном разделе вместо команды № 4 (Таблица 40) следует использовать команду:

FLDATA1, SOLU, COMP, 1.

Она задает сжимаемость среды.

Параметры решателя остаются такими же, как и ранее (Таблица 40).

Пример списка команд для отображения результатов решения приведен ранее в задачах гидромеханики (Таблица 52, Рисунок 76). Кроме того, можно использовать команду *PLNSOL, ENKE* для отображения распределения кинетической энергии турбулентного потока (Рисунок 77).

3.2.5. Обсуждение результатов моделирования

Предложена универсальная параметрическая модель геометрии конструкции осколочно-фугасного снаряда для определения его оптимальных аэродинамических характеристик при движении в неподвижной воздушной среде. Решение поставленной задачи производится с использованием модуля FLOTTRAN CFD программы ANSYS 10 ED.

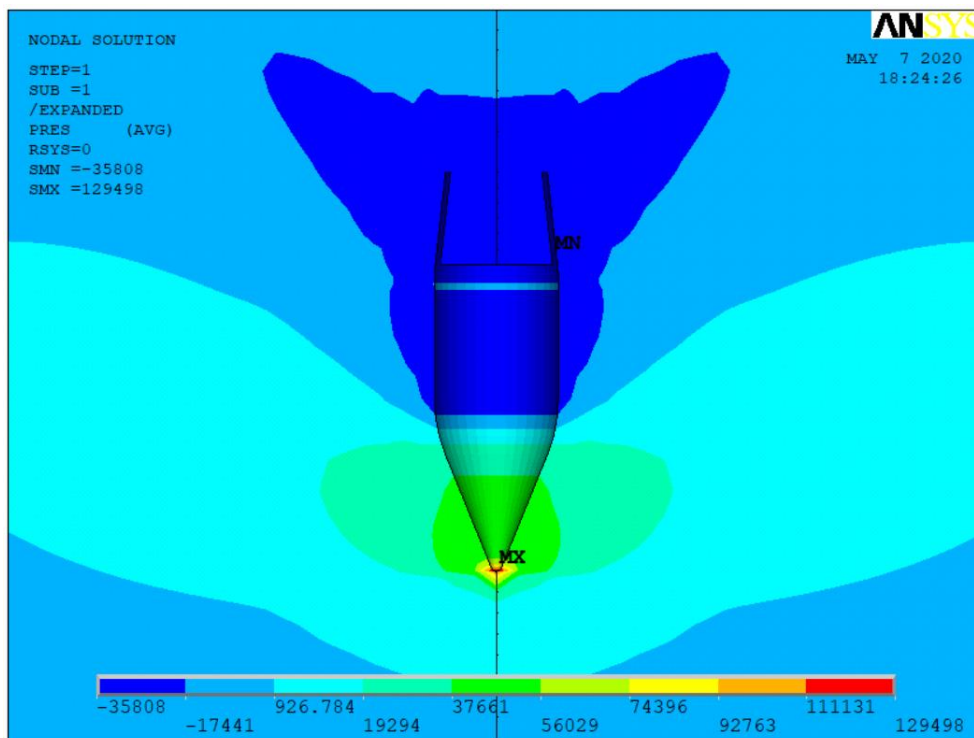


Рисунок 76 – Распределение давлений вокруг артиллерийского снаряда

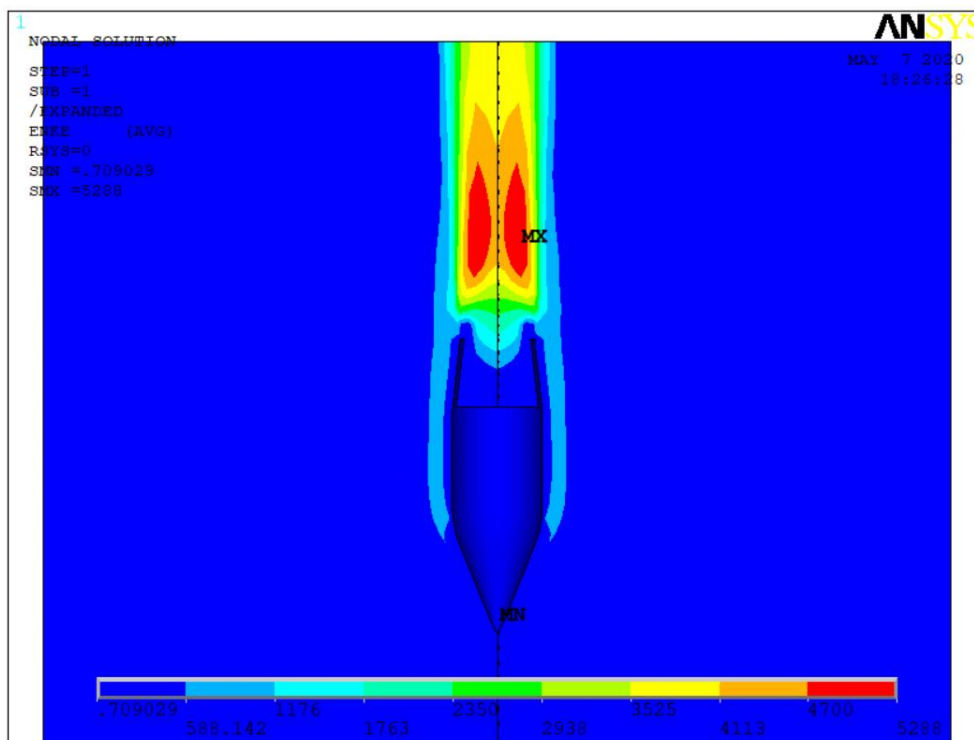


Рисунок 77 – распределение кинетической энергии вихря, возникающего в аэродинамическом следе снаряда

Для сокращения раздела, посвященного описанию создания параметрической модели задачи и подготовки данных для ее решения, используется текстовые команды APDL с подробными комментариями. Методическое изложение материала позволит разобраться в нем как инженерам

со стажем, так и начинающим профессиональную деятельность выпускниками технических ВУЗов, а также произвести самостоятельную корректировку кода для изучения аэродинамики боеприпасов других конструкций при различных параметрах газовой среды.

Возможность вариации геометрических характеристик снаряда и термодинамических параметров набегающего потока воздушной среды позволяет существенно сократить процесс аэродинамического проектирования конструкции боеприпасов.

3.2.6. Определение влияния параметров генерации газов в газогенераторе артиллерийского снаряда на его дозвуковую аэродинамику

В отличие от реактивного движения газогенератор не предназначен для создания реактивной тяги, а только снижает энергию вихреобразования в задонной области артиллерийского снаряда при его движении в воздухе [63, 71].

Процесс газогенерации обеспечивается дегрессивным сгоранием [72] специального топливного заряда газогенератора, расположенного в донной части артиллерийского снаряда [71].

Необходимо отметить, что созданная ранее [63] параметрическая модель фугасного снаряда подходит также для оценки необходимых параметров газогенератора, а также формы и размеров его сопла.

В качестве цели решаемой задачи поставлено определение скорости истечения газа из сопла, и давления газа внутри газогенератора. Вариация этих параметров должна минимизировать кинетическую энергию вихря в задонном пространстве снаряда, возникающего при его движении в воздухе.

Следует также указать, что с помощью предлагаемой модели можно также определить каким образом будет влиять на газодинамику снаряда и интегральную силу сопротивления снаряду некоторый реактивный эффект от работы газогенератора.

Таким образом, исследователь с помощью данной модели также может оценить не только эффективность обычного газогенератора, но и определить его параметры для начала реактивного движения артиллерийского снаряда. Это позволит не только компенсировать силу сопротивления в задонной части снаряда, но и силу сопротивления, возникающую перед его головной частью, что должно привести к значительному увеличению дальности стрельбы из артиллерийских систем.

3.2.7. Корректировка постановки задачи

Дополнительно предполагается, что газ, истекающий из сопла газогенератора, по своим свойствам полностью совпадает с воздухом. Необходимость такого упрощения объясняется тем, что во FLOTRAN довольно сложно решаются задачи многокомпонентного течения. Это несколько не

умалюет прикладное значение построенного решения, поскольку оно даже в этом случае позволяет установить ориентировочные значения необходимые для работы газогенератора (давление на выходе газогенератора и скорость истечения газа).

3.2.8. Корректировка краевых условий

Единственным изменением является назначение на дне сопла с помощью команды *DL, 6, , VY, 0.1*V0, 1*, скорости потока истекающих из газогенератора газов (в данном случае назначена скорость в размере 10% от скорости полета снаряда) и давления в газогенераторе (на дне сопла) командой *DL, 6, , PRES, 50000, 1* (в данном случае на дне сопла устанавливается давление на 50000 Па превышающее атмосферное).

Обе эти команды могут быть просто добавлены в конец уже известной таблицы (Таблица 66), поскольку они будут назначены последними, то просто исправят нужным образом уже известные краевые условия. Остальные параметры воздуха (Таблица 61) остаются без изменений, а параметры решателя (Таблица 40) необходимо скорректировать и вместо команды № 4 (Таблица 40) следует использовать команду:

FLDATA1, SOLU, COMP, 1,

задающую сжимаемость среды.

3.2.9. Обсуждение полученных результатов для газогенератора

Проведено исследование влияния газогенератора на аэродинамику артиллерийского снаряда (Рисунок 78).

Установлено, что разработанная ранее модель для снаряда без газогенератора после соответствующего изменения значений параметров и краевых условий пригодна для решения поставленной задачи.

Установлено, что если в качестве критерия решения задачи использовать условие минимума кинетической энергии вихря в заданном пространстве снаряда при его полете, то можно указать интервалы изменений значений скорости истечения газов и давления на дне сопла, которые будут задавать ориентировочное оптимальное решение поставленной задачи.

Для значений геометрических параметров модели снаряда $POL_K = 0.061$, $L_USL = 0.40$, $L_USL_D = 0.39$, $L_USL_GOL = 0.15$, $L_S = 0.15$, $R_D = 0.015$, $R_HV = 0.05$, $S = 0.03$, $R_GOL = 0.005$, $R = 0.15$ (Рисунок 73, Таблица 64) и параметров набегающего потока воздуха $V0 = 400$, $T0 = 20$ были получены оптимальные интервалы значений скорости истечения газов и манометрического давления.

При решении набора задач определено, что кинетическую энергию вихря в задонной части снаряда можно уменьшить на 15-17%. При этом следует ожидать пропорционального увеличения дальности стрельбы снарядами данного вида.

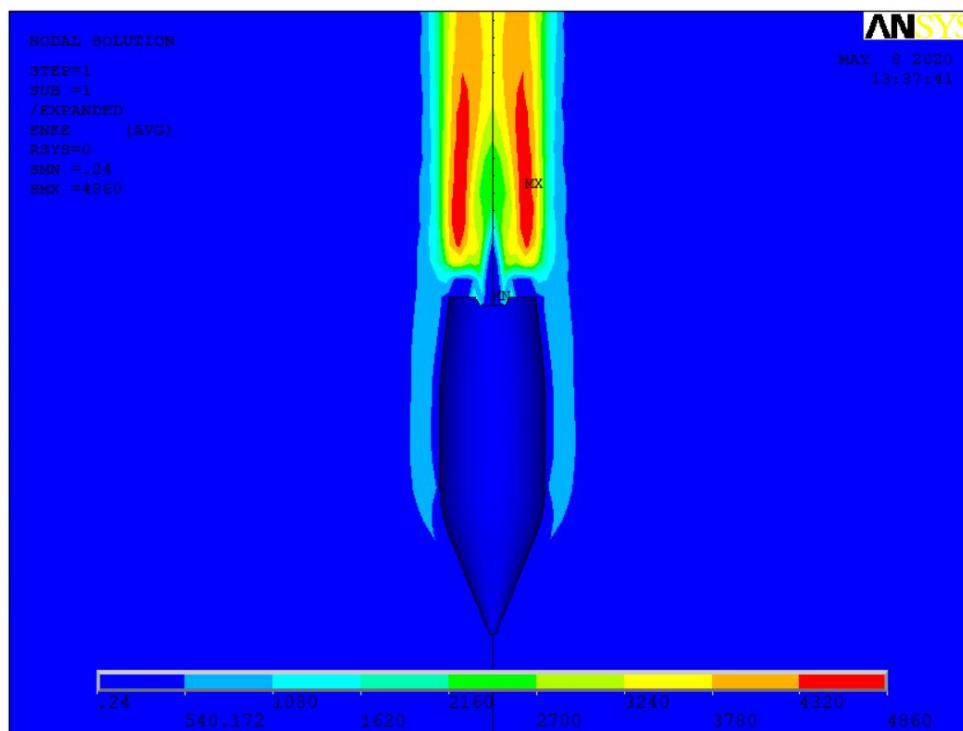


Рисунок 78 – Близкая к минимальным значениям энергия вихреобразования в задонной части снаряда

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попык, К.Г. Конструирование и расчет автомобильных и тракторных двигателей / К.Г. Попык – М.: Высшая школа, 1973. – 400 с.
2. Дьяченко, Н.Х. Конструирование и расчет двигателей внутреннего сгорания / Н.Х. Дьяченко, Б.А. Харитонов, В.М. Петров, Б.П. Байков, С.А. Батурин, Ю.Н. Исаков, Ф.М. Лимонов, Н.Н. Шабров – Л.: Машиностроение, 1979. – 392 с.
3. Кравчук А.С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: курс лекций для студ. механико-математического фак, обуч. по спец. 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 1. Графический интерфейс и командная строка. Средства создания геометрической модели / А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 130 с. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43440> (Дата доступа: 03.06.2025)
4. Кравчук А.С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: курс лекций для студ. механико-математического фак., обуч. по спец. 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 2. Средства отображения и редактирования геометрических компонентов твердотельной модели. Примеры создания твердотельных моделей средствами ANSYS для решения физических задач / А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 145 с. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43443> (Дата доступа: 03.06.2025)
5. Кравчук А.С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: курс лекций для студ. механико-математического фак., обуч. по спец. 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 3. Определение физических констант материалов и конечноэлементное разбиение твердотельной модели. Примеры выполнения этих действий с построенными ранее моделями / А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 193 с. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43444> (Дата доступа: 03.06.2025)
6. Кравчук А.С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: курс лекций для студ. механико-математического фак., обуч. по спец. 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 4. Ограничения и нагрузки. Разделы Solution и General Postproc главного меню. Примеры постановки краевых задач, их решения и просмотра результатов / А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – 118 с. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43445> (Дата доступа: 03.06.2025)
7. Кравчук А.С. Методика расчета напряженного состояния в плоскости кривошипа между шейками коленчатого вала / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук, И.А. Тарасюк // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2017, Т.5, №2. – С. 17-25 [Электронный ресурс] URL:

- https://elibrary.ru/download/elibrary_30503756_99398171.pdf (Дата доступа: 03.06.2025)
8. Кравчук А.С. Моделирование стационарного турбулентного обтекания цилиндрического препятствия потоком вязкой несжимаемой жидкости в ступенчатой трубе / А.С. Кравчук, И.А. Тарасюк // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т.5, №2. – С. 26-31. [Электронный ресурс] URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30503757_57078835.pdf (Дата доступа: 03.06.2025)
 9. Кравчук А.С. Облегченные конструкции шатуна и расчет их напряженного состояния при осевом нагружении / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2017, Т.5, №3. – С. 42-53 [Электронный ресурс] URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30503752_91063668.pdf (Дата доступа: 03.06.2025)
 10. Рощин Г.И. Детали машин и основы конструирования / Г.И. Рощин, Е.А. Самойлов, Н.А. Алексеева, В.В. Джамай, Н.Л. Зезин, Ю.Б. Михайлов, Е.В. Серпичева, И.А. Тимофеев – М.: Дрофа, 2006. – 415 с.
 11. ГОСТ 9484–81 – Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба трапецеидальная. Профили – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 4 с.
 12. ГОСТ 24737–81 – Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба трапецеидальная однозаходная. Основные размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 6 с.
 13. Кравчук А.С. Параметрический расчёт напряжённого состояния зубьев в передаче винт–гайка / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук, И.А. Тарасюк // Мир транспорта, 2018, Т. 16, № 5. – С. 70–83.
 14. Лапшин А.В. Двустороннее шлифование в подвижных центрах / А.В. Лапшин, В.Н. Балашов, С.Н. Юдаев // Металлообработка, 2011, № 3(63). – С. 2-7.
 15. Сухарев В.М. Двустороннее шлифование / В.М. Сухарев, А.С. Денисов – Киев: Техніка, 1977. – 80 с.
 16. Полетаев В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин / В.А. Полетаев, Д.И. Волков – Москва: Машиностроение, 2006. – 272 с.
 17. Физико-технологические основы методов обработки / под ред. А.П. Бабичева. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 113 с.
 18. Двустороннее плоское шлифование [Электронный ресурс] URL: <https://www.atlantic-schlifkrugi.ru/sposob-lifovaniya/dvustoronnee-ploskoe-shlifovanie/> (Дата доступа: 03.06.2025)
 19. Филин А.Н. Способ двустороннего торцового шлифования / А.Н. Филин, В.Г. Рахчеев, Д.А. Лапенков [Электронный ресурс] URL: www.findpatent.ru/patent/218/2182072.html (Дата доступа: 03.06.2025)
 20. Евстигнеев А.Д. Способ управления двусторонним торцовым шлифованием и устройство для его осуществления / А.Д. Евстигнеев, Л.В. Худобин, В.Ф. Гурьянихин [Электронный ресурс]

- [URL:https://findpatent.ru/patent/249/2490110.html](https://findpatent.ru/patent/249/2490110.html) (Дата доступа: 03.06.2025)
21. Евстигнеев А.Д. Способ двустороннего шлифования тонкостенных заготовок / А.Д. Евстигнеев, В.Ф. Гурьянихин, М.А. Белов [Электронный ресурс] [URL:https://findpatent.ru/patent/228/2285604.html](https://findpatent.ru/patent/228/2285604.html) (Дата доступа: 03.06.2025)
 22. Притирочный станок полировальный станок AC microLine 1500-L [Электронный ресурс] <https://www.aeroexpo.com.ru/prod/lapmaster-wolters-gmbh/product-183818-68779.html> (Дата доступа: 03.06.2025)
 23. Установка двусторонней шлифовки JYDM-16 [Электронный ресурс] URL: <https://www.dipaul.ru/catalog/shlifovka-i-polirovka/ustanovka-dvustoronney-shlifovki-jydm-16/> (Дата доступа: 03.06.2025)
 24. Вайнер Л.Г. Характер вращения роликов и точность обработки при двустороннем торцешлифовании // Вестник ТОГУ, 2010, №4 – С. 111–120.
 25. Вайнер Л.Г. Особенности формирования микрогеометрии торцевых поверхностей при двустороннем шлифовании / Л.Г. Вайнер, В.М. Давыдов, В.В. Заев // Вестник машиностроения 2014 №11. – С. 58-61.
 26. Балашов В.Н. Силовое взаимодействие заготовки с абразивными кругами при двустороннем шлифовании / В.Н. Балашов, С.Н. Юдаев, А.А. Гневашев // Известия Московского государственного технического университета МАМИ, 2013, Т. 2, № 1 (15). – С.242-244.
 27. Балашов В.Н. О стабилизации работы абразивных кругов при двухстороннем шлифовании в подвижных центрах / В.Н. Балашов, С.Н. Юдаев // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2016. № 12(33). [Электронный ресурс] URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/4066> (Дата доступа: 03.06.2025)
 28. Козерук А.С. Методика оценки напряженного состояния линз с тонким центром / А.С. Козерук, В.О. Кузнечик, В.И. Шамкалович// Приборы и методы измерений, 2010, № 1. – С. 119-124.
 29. Климович В.Ф. Перспективная технология двусторонней обработки высокоточных оптических деталей со сферическими поверхностями / Климович В.Ф., Козерук А.С. // Наука и техника, 2012, № 2 – С. 18-23.
 30. Кравчук А.С. Определение изменения осевых размеров сферических линз при обжати в цанге для двустороннего шлифования / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук // Cloud of Science, 2020, Т. 7, № 2 – С. 285-296 [Электронный ресурс] URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_42708814_84191720.pdf (Дата доступа: 03.06.2025)
 31. Ишлинский А.Ю. Осесимметрическая задача пластичности и проба Бринелля / А.Ю. Ишлинский // Прикладная математика и механика. 1944. Т. 8, вып. 3. – С. 201-224.
 32. Ишлинский А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю. Ишлинский, Д.Д. Ивлев – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 704 с.
 33. Shield R.T. On the plastic flow of materials under conditions of axial symmetry / R.T. Shield // Proc. Roy. Soc. 1955, A 233 – P. 267-287.

34. Richmond O. Sphere indentation with application to the Brinell hardness test / O. Richmond, M.L. Morrison, M.L. Devenpeck // Int. J. Mech. Sc., 1974, N 16 – P. 75-79.
35. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон – Москва: Мир, 1989. – 510 с.
36. Kravchuk A. Penetration of a pyramid indenter into a multilayer coating/ A. Kravchuk, Z. Rymuza, D. Jarzabek // Int. J. Mat. Res. 2009. V. 100, N. 7. – P. 933-935.
37. Кравчук А.С. Прикладные контактные задачи для обобщенной стержневой модели покрытия / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук – СПб: Научно-технические технологии, 2019. – 221 с. [Электронный ресурс] URL: https://publishing.intelgr.com/archive/core_model.pdf (Дата доступа: 03.06.2025)
38. Лукьянова А.Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS / А.Н. Лукьянова – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 52 с.
39. Азаров А.И. и др. Сборник задач по методам вычислений / под. ред. П.И. Монастырного. Минск: Изд. центр БГУ, 2007. 376 с.
40. Кравчук А.С. Параметрическое моделирование упругопластического вдавливания шара и конуса / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук // Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2017, Т.5, №4 [Электронный ресурс] URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2019/11/2019-N4-Kravchuk.pdf> (Дата доступа: 03.06.2025)
41. Часс С.И. Гидромеханика в примерах и задачах / С.И. Часс. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. – 216 с.
42. Ковальногов Н.Н. Основы гидравлики / Н.Н. Ковальногов, Е.Н. Коврижных. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004 –86 с.
43. Лапшев Н.Н. Гидравлика / Н.Н. Лапшев – М.: Издательский центр «Академия». –272 с.
44. Шабаров В.В. Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач / В.В. Шабаров. – Нижний Новгород: ННГУ, 2006 – 108 с.
45. ГОСТ 17375-2001 Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Отводы крутоизогнутые типа 3D (R = 1,5 DN). Конструкция. – Москва: Стандартинформ, 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-17375-2001> (Дата доступа: 03.06.2025)
46. ГОСТ 17380-2001 Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030181> (Дата доступа: 03.06.2025)
47. ГОСТ 17376-2001 Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Тройники. Конструкция. – Москва: Стандартинформ, 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-17376-2001> (Дата доступа: 03.06.2025)

48. Еремкин А. И., Баканова С. В., Канакина О. Н. Запорно-регулирующая арматура в системах отопления. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 88 с.
49. Новиков В. Т. Основы проектирования и оборудование предприятий органического синтеза. Часть 1. Трубопроводная арматура. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 292 с.
50. Дискový затвор / Википедия [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80 (Дата доступа: 03.06.2025)
51. ГОСТ 24856-81 (ИСО 6552–80) Арматура трубопроводная промышленная. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2005. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200011740> (Дата доступа: 03.06.2025)
52. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский — М.: «Энергия», 1978. — 704 с.
53. Чухарева Н.В. Определение количественных характеристик нефти и газа в системе магистральных трубопроводов / Н.В. Чухарева, А.В. Рудаченко, В.А. Поляков – Томск: Из-во Томского политехнического университета, 2010. – 311 с.
54. ГОСТ 26969-86 Диафрагмы стандартные для расходомеров. Технические условия – Москва: Изд-во стандартов, 1995. – 20 с.
55. ГОСТ 8.586.3-2005 (ИСО 5167-3:2003) Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования – Москва: Стандартинформ, 2007. – 27 с.
56. Лурье М.С. Тела обтекания вихревых расходомеров / М.С. Лурье, О.М. Лурье // Датчики и системы. — 2008. — № 10. – С. 21-23.
57. Стариков В.П. Граница точности формирования перепада давления в сужающих устройствах / В.П. Стариков, Н.А. Владимирова // Сб. мат. 26-ой международной конференции «Коммерческий учет теплоносителей», 20-22 ноября 2007 г. – СПб.: Борей-Арт, 2007. – С. 299-305.
58. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
59. Шабловский О.Н. Динамика вихрей и теплоперенос в потоке вязкой жидкости / О.Н. Шабловский – Гомель: УО "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого", 2001. – 142 с.
60. Торпедное оружие: методические указания для самостоятельной работы по дисциплине «Боевые средства флота и их боевое применение» / В.В. Косарев, В.Н. Садовников СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. 48 с.
61. Торпеда УГСТ «Физик-2» / «Футляр». Загадочная новинка российского флота / Военное обозрение [Электронный ресурс] URL: <https://topwar.ru/122273-torpeda-ugst-fizik-2-futlyar-zagadochnaya-novinka-rossiyskogo-flota.html> (Дата доступа: 03.06.2025)
62. "Футляр" для "Ясеня": на какие торпеды делает ставку российский флот / Новости ВПК [Электронный ресурс] URL:

- https://vpk.name/news/379568_futlyar_dlya_yasenya_na_kakie_torpedy_delaet_stavku_rossiiskii_flot.html (дата доступа: 03.06.2025)
63. Кравчук А.С. Параметрическая модель обтекания осколочно-фугасного снаряда потоком воздуха / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук, И.А. Тарасюк // Перспективы науки, 2018, № 7 (106). – С. 44-51.
 64. Ананьев В.А. Системы вентиляции и кондиционирования / В.А. Ананьев, Л.Н. Балугева, В.П. Мурашко – Москва: Евроклимат, 2008 – 504 с.
 65. Генкин Ю.В. Конструкция артиллерийских выстрелов / Ю.В. Генкин, Я.О. Павлов, М.А. Преображенская. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. – 114 с.
 66. Чурбанов Е.В. Краткий курс баллистики / Е.В. Чурбанов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2006. – 291 с.
 67. Биматов В.И. Математическое моделирование обтекания тел на основе программного модуля ANSYS CFX / В.И. Биматов, В.В. Фарапонов, Н.В. Савкина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6/3. – С. 8-10.
 68. Коломийцев А.В. Применение аэродинамических методов проектирования для разработки летательных аппаратов максимальной плотности компоновки с заданными траекторными характеристиками / А.В. Коломийцев, С.Н. Ларьков, И.Ю. Долженко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 3. – С. 45-49.
 69. Wessam M.E. Aerodynamic characteristics of unguided artillery projectile / M.E. Wessam, Z.H. Chen // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1014. – Pp. 165-168.
 70. DeSpirito J. CFD computation of Magnus moment and roll-damping moment of a spinning projectile / J. DeSpirito, K.R. Heavy; Army Research Lab, Aberdeen Proving Ground MD Weapons and Materials Research Directorate. – Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 2006. – 24 p.
 71. Генкин Ю.В. Конструкция артиллерийских выстрелов / Ю.В. Генкин, Я.О. Павлов, М.А. Преображенская. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. – 114 с.
 72. Уравнения состояния газа. Идеальный газ, реальный газ.../ Вунивере.ру [Электронный ресурс] URL: <http://vunivere.ru/work59993/page5> (дата доступа: 03.06.2025)