

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»



**В. Г. Сукиасов**

## **Компьютерные технологии в машиностроении**

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ  
для студентов, обучающихся в магистратуре по направлениям подготовки  
15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2023

УДК 004:94

Рецензент

доктор технических наук, профессор кафедры инжиниринга технологического оборудования ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» О. В. Агеев

Сукиасов, В. Г.

Компьютерные технологии в машиностроении: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ для студентов, обучающихся в магистратуре по направлениям подготовки 15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование / В. Г. Сукиасов. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 43 с.

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ содержит методические материалы к лабораторным работам, включающие формулировку целей и задач, план и подробные инструкции по выполнению, а также контрольные вопросы для каждой из работ и требования к оформлению отчетов.

Табл. 1, рис. 33, список лит. – 5 наименований

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию методической комиссией Института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30.05.2023 г., протокол № 05

УДК 004:94

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2023 г.  
© Сукиасов В. Г., 2023 г.

## Оглавление

Введение .....	4
Лабораторная работа № 1 «Основы геометрического моделирования в Препроцессоре ПК Ansys» .....	7
Лабораторная работа № 2 «Построение и модификация геометрических моделей в Препроцессоре ПК Ansys» .....	11
Лабораторная работа № 3 «Создание конечноэлементных моделей в Препроцессоре ПК Ansys» .....	15
Лабораторная работа № 4 «Решение линейных задач структурного анализа средствами ПК Ansys» .....	18
Лабораторная работа № 5 «Решение задач структурного анализа при наличии массовых нагрузок и циклической симметрии конструкции» .....	24
Лабораторная работа № 6 «Структурный анализ каркасной конструкции» ..	31
Библиографический список .....	41
Приложение. Образец оформления титульного листа отчета о лабораторных работах .....	42

## ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Компьютерные технологии в машиностроении» является формирование у обучающихся основных понятий и представлений о существующих средствах компьютеризации инженерной деятельности, освоение технологий взаимодействия с промышленными программными комплексами, овладение методиками и приемами разработки расчетных моделей технических объектов и процессов, автоматизированного выполнения расчетов машиностроительных конструкций и обработки полученных результатов.

Основные задачи изучения дисциплины:

- приобретение знаний об основных характеристиках и функциональных возможностях программных пакетов САПР, применяемых в машиностроении;
- знакомство с интерфейсом ПК Ansys, средствами подготовки расчетных моделей и обработки полученных результатов;
- овладение приемами геометрического моделирования, построения конечноэлементных моделей и подготовки исходных данных для численного анализа элементов оборудования и технологических процессов;
- освоение методики выполнения расчетов с применением ПК Ansys, наглядного представления и интерпретации полученных результатов;
- формирование знаний, умений и навыков, необходимых для освоения специальных инженерных дисциплин.

В результате изучения дисциплины студент должен:

- **знать** проблемы создания технологического оборудования различных типов; современное инженерное программное обеспечение, его основные виды, возможности, области применения; основные идеи и принципы организации автоматизированного выполнения машиностроительных расчетов; классификацию и этапы разработки задач анализа;
- **уметь** выполнять работы по проектированию и расчету технологического оборудования на основе компьютерных технологий; строить адекватные расчетные модели машиностроительных конструкций; выполнять расчеты и интерпретировать их результаты; оценивать точность численных решений; находить пути модернизации оборудования с опорой на результаты компьютерного моделирования и анализа;
- **владеть** методиками расчета и проектирования агрегатов и узлов технологического оборудования в соответствии с техническими заданиями на основе компьютерных технологий; приемами геометрического моделирования технических объектов; методиками обоснованного выбора и назначения

атрибутов расчетной модели; средствами настройки параметров вычислительного процесса; приемами обработки и наглядного представления результатов компьютерного анализа.

При реализации дисциплины «Компьютерные технологии в машиностроении» организуется практическая подготовка путем проведения лабораторных работ, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Целью лабораторного практикума является непосредственное освоение широко распространенной в современном машиностроении компьютерной технологии – программного комплекса (ПК) Ansys. Результатом должно стать приобретение первоначальных навыков взаимодействия с интерфейсом ПК Ansys и овладение наиболее существенными приемами геометрического моделирования, подготовки и выполнения анализа, а также обработки полученных результатов.

По итогам лабораторного практикума студент должен:

уметь:

- выполнять работы по проектированию и расчету технологического оборудования на основе компьютерных технологий;

- строить адекватные расчетные модели машиностроительных конструкций; выполнять расчеты и интерпретировать их результаты; оценивать точность численных решений;

- находить пути модернизации оборудования с опорой на результаты компьютерного моделирования и анализа;

владеть:

- методиками расчета и проектирования агрегатов и узлов технологического оборудования в соответствии с техническими заданиями на основе компьютерных технологий;

- приемами геометрического моделирования технических объектов; методиками обоснованного выбора и назначения атрибутов расчетной модели;

- средствами настройки параметров вычислительного процесса;

- приемами обработки и наглядного представления результатов компьютерного анализа.

Выполнение каждой из лабораторных работ предусматривает четкую формулировку цели работы, изучение методических указаний, выполнение предусмотренных операций и фиксацию результатов. При этом следует добиваться полного осмысления логики выполняемых действий и понимания выбора используемых средств, а также умения ответить на все контрольные вопросы в ходе защиты отчетов о лабораторных работах. Отчеты о лабораторных

работах оформляются в соответствии с требованиями стандартов для текстовых документов. Отчет о каждой работе должен содержать название работы, формулировку задания, а также цели, задачи и план (разделы 1–3), заимствованные непосредственно из данного пособия. Далее приводятся графические и текстовые материалы, предусмотренные для включения в отчет инструкциями раздела 4.

Аттестация студентов по лабораторным работам происходит путем защиты отчетов и является обязательным условием допуска к сдаче экзамена в третьем семестре. Защита готовых отчетов может происходить на лабораторных занятиях или во время консультаций. Отчеты принимаются только у студентов, лично участвовавших в выполнении работ. На защите отчетов студентам необходимо продемонстрировать знание цели и порядка выполнения работы, общих идей и методологии компьютерного моделирования и анализа, понимание существа выполненных операций и умение интерпретировать полученные результаты, а также аргументированно ответить на контрольные вопросы. Оценка работы осуществляется по системе «зачтено» – «не зачтено», при этом учитываются следующие основные параметры:

- 1) полнота и правильность выполнения задания;
- 2) способность квалифицированно отвечать на вопросы;
- 3) аккуратность оформления;
- 4) своевременность сдачи.

Студенты, защитившие отчеты о всех лабораторных работах, получают оценку «зачтено». Студенты, не имевшие пропусков занятий, выполнившие и оформившие все лабораторные работы, получают зачет автоматически.

При необходимости для обучающихся инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом их индивидуальных психофизических особенностей.

В данном учебно-методическом пособии представлены методические материалы к лабораторным работам. Основное содержание пособия составляют краткие инструкции по выполнению работ; в приложении приведен образец оформления титульного листа отчета о лабораторных работах. Более детальные сведения содержатся в справочных руководствах [1 – 5]. Их изучение в сочетании с настоящим пособием позволит студентам самостоятельно углубить свои знания и расширить арсенал используемых средств.

## Лабораторная работа № 1

### Основы геометрического моделирования в Препроцессоре ПК Ansys

#### 1. Цели работы

Знакомство с интерфейсом, приобретение первоначальных навыков геометрического моделирования.

#### 2. Задачи работы

1. Получить представление о технологии взаимодействия с ПК Ansys (вход-выход, создание и сохранение БД).
2. Ознакомиться с интерфейсом.
3. Освоить простейшие приемы создания геометрических моделей.

#### 3. План проведения занятия

1. Изучение начальных этапов работы с ПК Ansys в интерактивном режиме.
2. Выполнение моделирования сверху вниз.
3. Выполнение моделирования снизу-вверх.

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Создать папку (рабочую директорию) для хранения файлов. Название папки и путь к ней не должны содержать символов кириллицы.
2. Открыть *Launcher*. Просмотреть выпадающие списки, не изменяя выбор по умолчанию.
3. Присвоить имя создаваемой базе данных, не употребляя символов кириллицы (например, lab1\_a и т.п.). Прописать путь к папке, созданной в п.1.
4. Запустить *Launcher*.
5. Ознакомиться с рабочим окном Ansys; изучить структуру главного меню *Main Menu* и меню утилит *Utility Menu*.
6. Перейти в режим отображения *Reverse Video* (белый фон): *Utility Menu\PlotCtrls\Style\Colors\ Reverse Video*.
7. Включить нумерацию поверхностей и объемов *Colors only: Utility Menu\PlotCtrls\Numbering...→* выбрать нужные компоненты, выбрать из списка *Colors only → OK*.
8. Открыть раздел *Modeling* в Препроцессоре.

#### Геометрическое моделирование сверху вниз

9. Создать блок с центром в начале координат по размерам ребер вдоль осей X, Y, Z: *Main Menu\Preprocessor\Modeling\Create\Volumes\Block\By Dimensions\* ввести  $(-13;13)$ ,  $(-2;2)$ ,  $(-1;1)$  для X, Y, Z соответственно → *OK*.

10. Создать цилиндр по размерам: *Main Menu\Preprocessor\Modeling\Create\Volumes\Cylinder\By Dimensions\* ввести наружный радиус 3; внутренний радиус 2; длина в пределах  $-3 \leq Z \leq 3 \rightarrow OK$ .
11. Создать тор (подобно пп. 9, 10): *Main Menu\Preprocessor\Modeling\Create\Volumes\Torus\* наружный радиус 14; внутренний радиус – оставить поле пустым; радиус сечения 3  $\rightarrow OK$ .
12. Перенести начало координат вдоль оси Z на 2: *Utility Menu\Work Plane\Offset WP to\XYZ Locations*  $\rightarrow 0,0,2 \rightarrow OK$ . Создать сплошной шар радиуса 2.5 с центром в начале координат: *Main Menu\Preprocessor\Modeling\Create\Volumes \Sphere\Solid Sphere\WP X=0, WP Y=0, Radius =2.5*  $\rightarrow OK$ . Вернуть начало координат в положение глобального начала: *Utility Menu\Work Plane\Align WP with\Global Cartesian*.
13. Повернуть рабочую плоскость на  $90^0$  вокруг оси X по часовой стрелке: *Utility Menu\Work Plane\Offset WP by Increment...*  $\rightarrow$  бегунок *Degrees* перевести в положение 90  $\rightarrow$  нажать клавишу **X-G**  $\rightarrow OK$ . Создать правильную 5-угольную призму с центром основания в начале координат (0;0), радиус описанной окружности 2, угол  $90^0$ , глубина 13. Вернуть начало координат в исходное положение.
14. Сохранить в виде графических файлов полученные объемы и поверхности в наиболее выгодном ракурсе и масштабе *Fit View*.

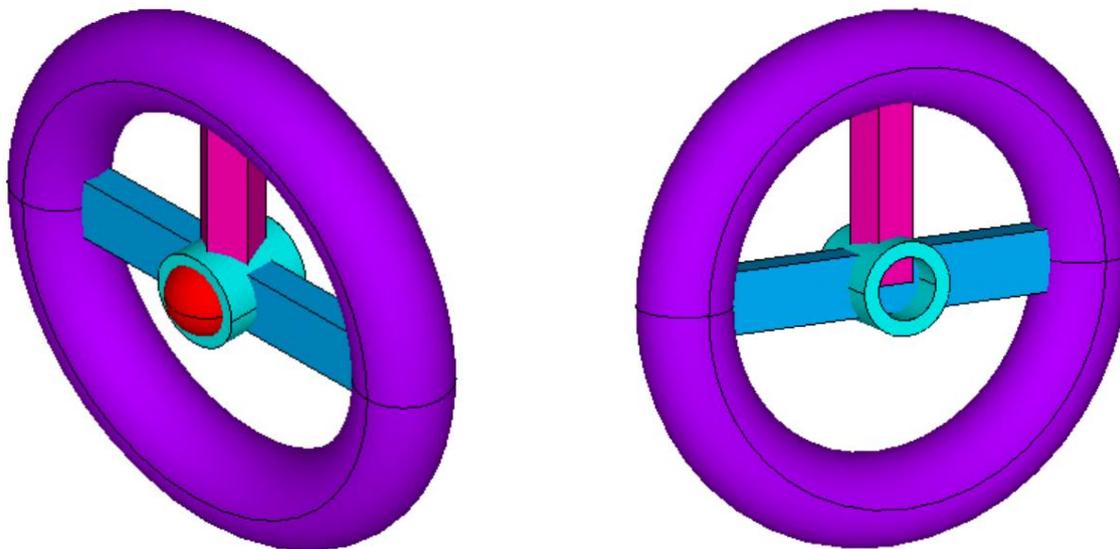


Рис.1. Результат выполнения пп. 9–13

15. Выбрать все. Сжать нумерацию всех объектов. Сохранить БД.
16. Скопировать из списка *Global Status* информацию о геометрии *Solid model summary* и включить в отчет.
17. Выйти без сохранения.

18. Задать имя новой БД (например, lab1\_b и т.п.) и запустить *Launcher*.
19. Перейти в режим отображения *Reverse Video* (белый фон).
20. Включить нумерацию точек, линий, поверхностей и объемов *Colors&Numbers: Utility Menu\PlotCtrls\Numbering...* → выбрать нужные компоненты, выбрать из списка *Colors&Numbers* → *OK*.

#### Геометрическое моделирование снизу-вверх

21. Открыть блок *Modeling* в Препроцессоре.
22. Создать замкнутую окружность радиуса 10 с центром в глобальном начале координат: *Modeling\Create\Lines\Arcs\Full Circle* → 0,0,0 → *Apply* → 10 → *OK*.
23. Повернуть рабочую плоскость на  $90^0$  против часовой стрелки относительно оси Z: *Utility Menu\Work Plane\Offset WP by Increment...* → бегунок *Degrees* перевести в положение 90 → нажать клавишу  → *OK*.
24. Создать полуокружность радиуса 30 с центром в начале координат: *Modeling\Create\Lines\Arcs\By Cent & Radius* → 0,0,0 (включить радиокнопку *WP Coordinates*) → *Apply* → 30 → *Apply* → указать величину дуги  $180^0$  → *OK*.
25. Совместить рабочую плоскость с глобальным началом координат: *Utility Menu\Work Plane\Align WP with\Global Cartesian*.
26. Перенести начало координат рабочей плоскости в новое положение: *Utility Menu\Work Plane\Offset WP to\XYZ Locations* → 130,-90,0 → *OK*.
27. Создать замкнутую окружность радиуса 10 с центром в начале координат рабочей плоскости: *Modeling\Create\Lines\Arcs\Full Circle* → 0,0,0 (включить радиокнопку *WP Coordinates*) → *Apply* → 10 → *OK*.
28. Повернуть рабочую плоскость на  $180^0$  против часовой стрелки относительно оси Z: *Utility Menu\Work Plane\Offset WP by Increment...* → бегунок *Degrees* в положении 90 → дважды нажать клавишу  → *OK*.
29. Создать полуокружность радиуса 30 с центром в начале координат: *Modeling\Create\Lines\Arcs\By Cent & Radius* → 0,0,0 (включить радиокнопку *WP Coordinates*) → *Apply* → 30 → *Apply* → указать величину дуги  $180^0$  → *OK*.
30. Совместить рабочую плоскость с глобальным началом координат (п. 25).
31. Создать ключевые точки KP15(160;30;0), KP16(100;-30;0): *Modeling\Create\Keypoints\In Active CS* → 15; 160,30,0 → *Apply* → 16; 100,-30,0 → *OK*.
32. Построить прямолинейные отрезки KP5 – KP15; KP14 – KP15; KP7 – KP16; KP12 – KP16: *Modeling\Create\Lines\Straight Line* → кликнуть мышью последовательно две точки → *OK*.
33. Построить скругления в угловых точках контура (радиус 6 для внутреннего угла и радиус 10 для наружного): *Modeling\Create\Lines\Line Fillet* → кликнуть мышью нужные линии → *Apply* → ввести радиус скругления → *OK*.

34. Создать поверхность, ограниченную всеми построенными линиями: *Modeling\Create\Areas\Arbitrary\By Lines* → 1,18,1 (включить радиокнопку *Min, Max, Inc*) → *OK*.

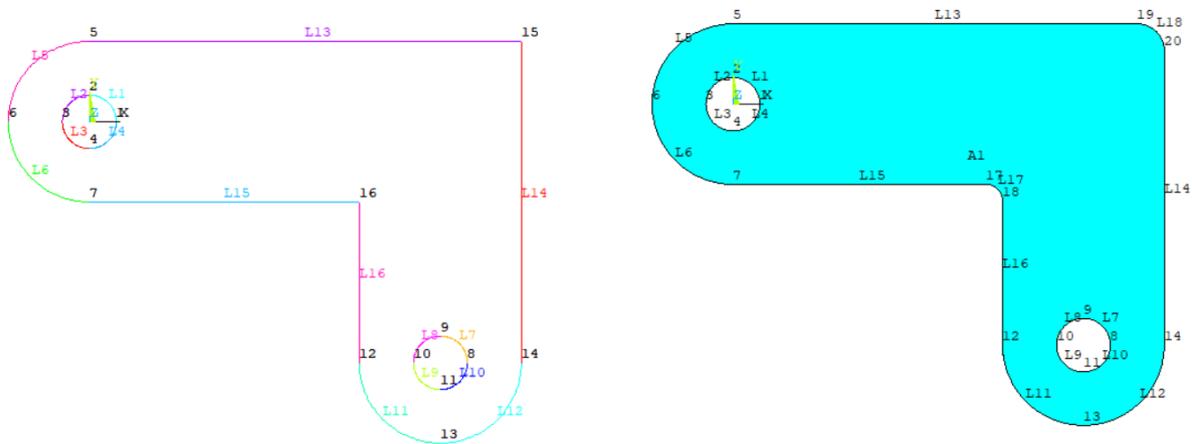


Рис. 2. Результаты выполнения пп. 22–32 и пп. 33–34

35. Отобразить модель в изометрии. Создать объем путем вытягивания поверхности по нормали к ее плоскости на толщину 16: *Modeling\Operate\Extrude\Areas\Along Normal* → кликнуть мышью поверхность либо ввести 1 → *Apply* → ввести толщину 16 → *OK*.

36. Нумерацию компонентов модели перевести в режим *Colors only*.

37. Выбрать все. Сохранить БД. Скопировать из списка *Global Status* информацию о геометрии *Solid model summary* и включить в отчет.

38. Развернуть изображение так, чтобы были видны сквозные отверстия. Систему координат сделать невидимой: *Utility Menu\PlotCtrls\Window Controls\Window Options\Location of triad = Not shown* (выбрать из списка). Сохранить в виде графических файлов объем и поверхности в масштабе *Fit View*.

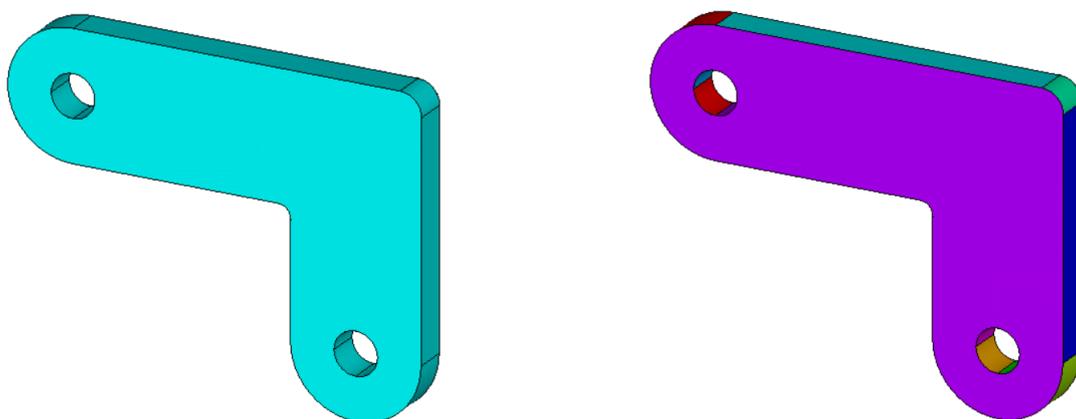


Рис. 3. Отображение объема и поверхностей кронштейна

39. Выйти без сохранения.

40. Удалить лишние файлы в рабочей директории (все, кроме двух БД \*.db и двух текстовых документов \*.0, а также графических файлов с изображениями моделей).

### **5. Контрольные вопросы**

1. Каким образом начинается сеанс работы с ПК Ansys?
2. Как устроено рабочее окно Ansys?
3. В чем суть геометрического моделирования сверху вниз?
4. Какие объемные примитивы предусмотрены в Препроцессоре?
5. В чем суть геометрического моделирования снизу-вверх?
6. Каким образом можно управлять отображением нумерации компонентов модели?
7. Каким образом можно управлять положением и ориентацией рабочей плоскости?

### **Лабораторная работа № 2**

#### **Построение и модификация геометрических моделей в Препроцессоре ПК Ansys**

##### **1. Цели работы**

Приобретение навыков создания и модификации геометрических моделей.

##### **2. Задачи работы**

1. Продолжить знакомство с интерфейсом.
2. Освоить приемы построения и модификации геометрических моделей.
3. Закрепить навыки управления рабочей плоскостью.

##### **3. План проведения занятия**

1. Выполнение логических операций с геометрическими объектами.
2. Управление положением объема в модели.

##### **4. Порядок выполнения работы**

1. Выполнить логические операции с объемами.
  - 1.1. Создать задание с новым именем.
  - 1.2. Открыть БД с моделями пяти объемных примитивов, сохраненную в ЛР1. Включить режим отображения *Reverse Video*.
  - 1.3. Выбрать объемы 1 и 2 (блок и цилиндр).

1.4. Открыть список логических операций и в настройках выбрать сохранение исходных объектов: *Preprocessor\Modeling\Operate\Booleans\Settings\Keep input entities?* → *Yes* → *OK*.

1.5. Вычесть из цилиндра блок: *Preprocessor\Modeling\Operate\Booleans\Subtract\Volumes*\выбрать цилиндр → *Apply*\выбрать блок → *OK*. Выбрать и отобразить новый объем. Сохранить изображение результата в виде графического файла и включить в отчет.

1.6. Вычесть из блока цилиндр подобно п. 1.5, при этом изменив порядок выбора объемов. Выбрать и отобразить новые объемы. Сохранить изображение результата в виде графического файла и включить в отчет.

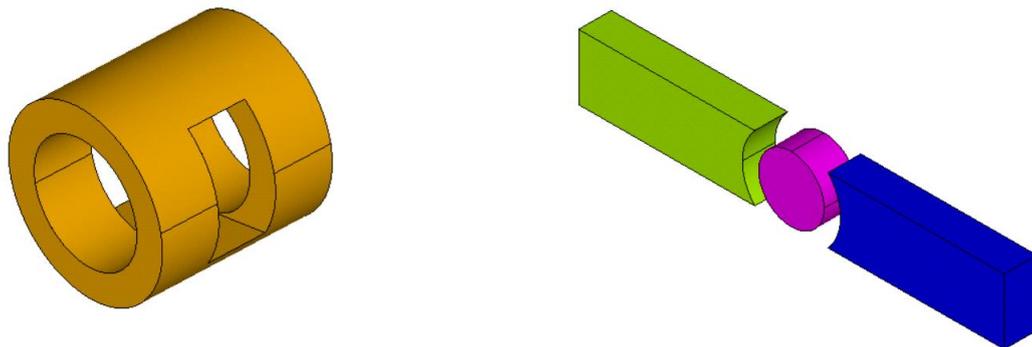


Рис. 4. Результаты логических операций пп. 1.5 и 1.6

1.7. Выбрать все: *Select Everything*. Скопировать из списка *Global Status* информацию о геометрии *Solid model summary* и включить в отчет. Удалить новые объемы.

1.8. Выбрать все. Отобразить объемы. Выполнить операцию *Partition* для пяти выбранных объемов. Скопировать из списка *Global Status* информацию о геометрии *Solid model summary* и включить в отчет.

1.9. Выбрать из списка и отобразить три объема с наибольшим количеством поверхностей. Включить их изображения в отчет.

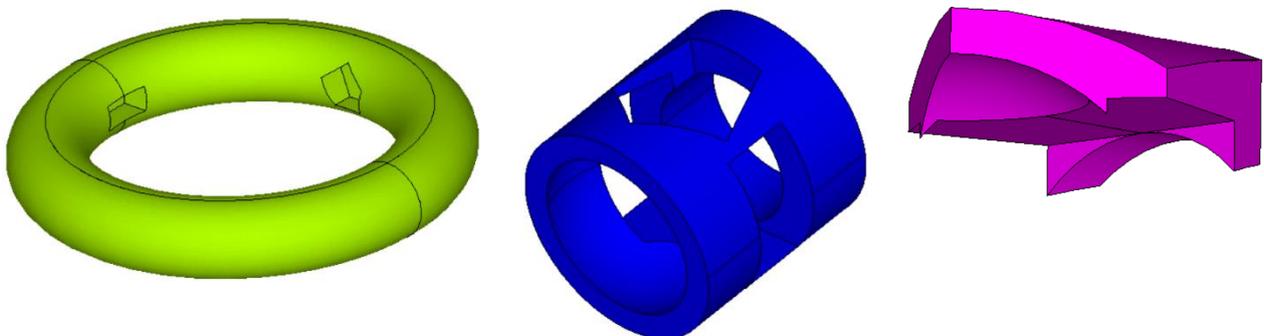


Рис. 5. Результаты логической операции п. 1.8

1.10. В настройках логических операций снять выбор с сохранения исходных объектов (см. п. 1.4).

1.11. Выбрать все. Слить все объемы в одной логической операцией *Add*. Скопировать из текстового файла и включить в отчет геометрические характеристики полученного объема: *Modeling\Operate\Calc Geom Items\Of Volumes\OK*.

1.12. Выйти без сохранения.

2. Изменить положение объема в составе 3D-модели.

2.1. Открыть БД с моделью углового кронштейна из ЛР1.

2.2. Отобразить систему координат в глобальном начале. Скопировать объем со смещением  $Z = 100$ .

2.3. Повернуть новый экземпляр кронштейна (объем 2) вокруг центра правого отверстия по часовой стрелке на угол  $30^0$  путем зеркального отражения относительно рабочей плоскости.

2.3.1. Отобразить линии. Выбрать 4 линии, образующие контур правого нижнего отверстия на передней поверхности объема 2.

2.3.2. Построить точку в центре контура, т.е. посреди двух крайних точек вертикального (либо горизонтального) диаметра: *Modeling\Create\Keypoints\KP between KPs*\указать 2 точки  $\rightarrow$  *Apply\RAFI = 0.5*  $\rightarrow$  *OK*.

2.3.3. Сориентировать рабочую плоскость по точкам: *Utility Menu\Work Plane\Align WP with\Keypoints +* \указать последовательно 3 точки – центр окружности, правую и верхнюю точки контура  $\rightarrow$  *OK*.

2.3.4. Повернуть рабочую плоскость вокруг  $Z$  на  $15^0$  по часовой стрелке (см. ЛР1, п. 28).

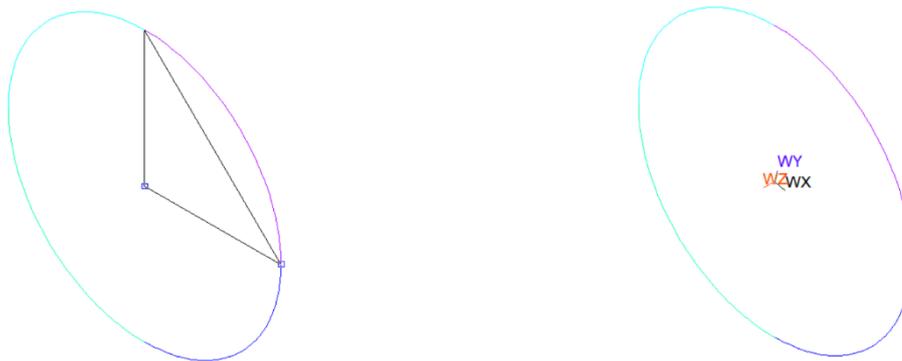


Рис. 6. Управление положением рабочей плоскости согласно пп. 2.3.3 и 2.3.4

2.3.5. Активную систему координат совместить с рабочей плоскостью: *Utility Menu\Work Plane\Change Active CS to\Working Plane*.

2.3.6. Выбрать все. Выбрать объем 2. Отобразить объемы.

2.3.7. Отобразить зеркально (без копирования) объем 2 относительно плоскости  $YZ$ : *Modeling\Reflect\Volumes\Pick All\Plane of symmetry* – радиокнопка  $YZ$ , *Existing volumes will by* – выбрать из списка *Moved* → *OK*.

2.3.8. Повернуть рабочую плоскость вокруг  $Z$  на  $15^\circ$  по часовой стрелке. Активную систему координат совместить с рабочей плоскостью.

2.3.9. Отобразить зеркально (без копирования) объем 2 относительно плоскости  $YZ$ .

2.4. Вернуть активную систему координат к глобальной декартовой, совместить с ней рабочую плоскость.

2.5. Выбрать все. Сохранить изображение объемов в виде графического файла и включить в отчет.

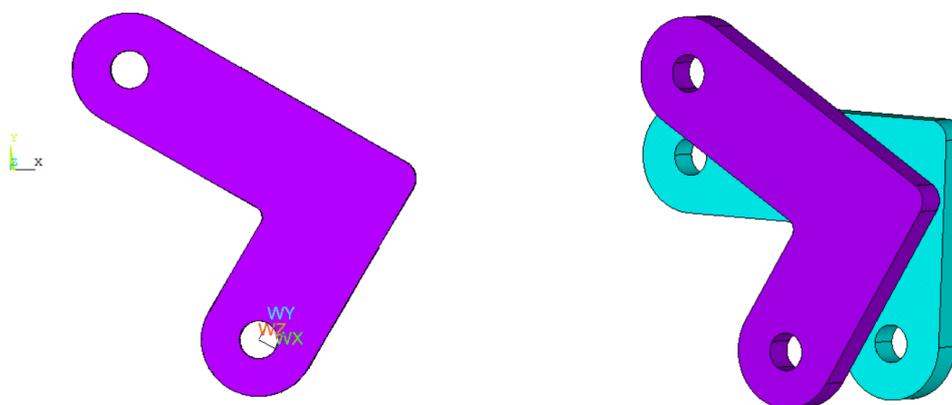


Рис. 7. Объем 2 после поворота, обособленно и вместе с объемом 1

2.6. Сохранить БД. Выйти без сохранения.

## 5. Контрольные вопросы

1. Какие логические операции возможны с геометрическими объектами?
2. Какие существуют настройки логических операций?
3. Что является результатом операции слияния объемов?
4. В чем суть операции вычитания объемов?
5. Каким образом добиться поворота объема вокруг требуемой оси на требуемый угол?

## Лабораторная работа № 3

### Создание конечноэлементных моделей в Препроцессоре ПК Ansys

#### 1. Цели работы

Приобретение навыков построения и модификации конечноэлементных моделей.

#### 2. Задачи работы

1. Освоить приемы свободного разбиения на конечные элементы (КЭ) объемной модели.
2. Освоить приемы упорядоченного разбиения на КЭ объемной модели.

#### 3. План проведения занятия

1. Построение КЭ модели путем дискретизации объема с автоматическими настройками.
2. Построение КЭ модели путем дискретизации объема с ручными настройками.

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Создать задание с новым именем.
2. Добавить 1-й тип КЭ из раздела *Solid*: тетраэдр с 10-ю узлами *TET187*.
3. Добавить 2-й тип КЭ из раздела *Solid*: шестигранник с 20-ю узлами *BRICK186*.
4. Создать модель блока по двум углам и Z: угловая точка (-70;-25;0), ширина 30, высота 50, глубина 40.
5. Создать модель сплошного цилиндра радиуса 20 и длины 50 с основанием в плоскости XY, центр в точке (0;0).
6. Сохранить БД. Выбрать и отобразить блок. Выбрать поверхности, относящиеся к объему, и линии, относящиеся к поверхностям.
7. Разбить блок на КЭ 1-го типа с автоматическими настройками по умолчанию (свободное разбиение).

7.1. Из меню *Meshing* вызвать панель *MeshTool*; в секции *Element Attributes* по умолчанию выбран параметр *Global* → *Set\Element type number 1* (в выпадающем списке) → *OK*.

7.2. Там же установить флажок в секции *Smart Size*; бегунок оставить в положении 6 по умолчанию.

7.3. Там же в секции *Mesh* нажать кнопку *Mesh* → *Pick All*.

7.4. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет. Ликвидировать КЭ разбиение блока: *Volume Clear*.

8. Разбить блок на КЭ 2-го типа с автоматическими настройками по умолчанию (упорядоченное разбиение):

8.1. На панели *MeshTool* в секции *Element Attributes: Global* → *Set\Element type number 2* (в выпадающем списке) → *OK*.

8.2. На панели *MeshTool* в секции *Shape* нажать радиокнопку *Hex*, при этом включится режим упорядоченного разбиения *Mapped*, а *Smart Size* станет неактивным. Там же в секции *Mesh* нажать кнопку *Mesh* → *Pick All*.

8.3. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет. Ликвидировать КЭ разбиение блока.

9. Разбить блок на КЭ 2-го типа с ручными настройками (упорядоченное разбиение):

9.1. Отобразить линии.

9.2. На панели *MeshTool* выключить *Smart Size*.

9.3. В секции *Size* выбрать *Lines* → *Set\* число разбиений линии – все по 10.

9.4. В секции *Mesh* нажать кнопку *Mesh* → *Pick All*.

9.5. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.

9.6. Ликвидировать КЭ разбиение блока: *MeshTool\Volumes\Clear*.

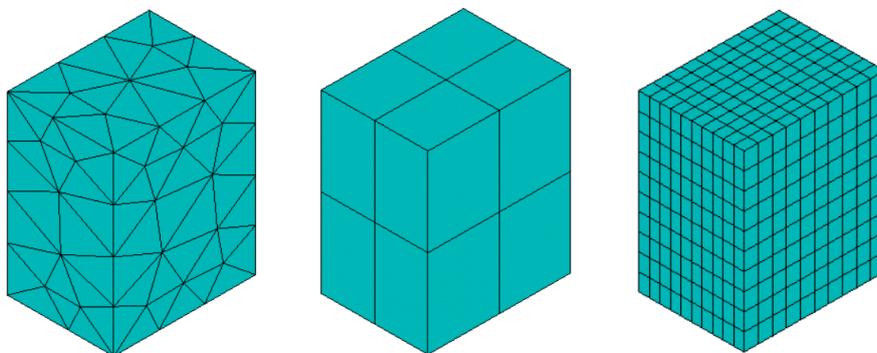


Рис. 8. КЭ модели блока в соответствии с пп. 7, 8 и 9

10. Выбрать все, затем выбрать цилиндр и относящиеся к нему поверхности и линии.

11. Разбить цилиндр элементами 1-го типа с автоматическими настройками (свободное разбиение); *Smart Size* = 5. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.

12. Отключить *Smart Size* и разбить цилиндр элементами 1-го типа с ручными настройками. Число делений образующих – 16, все дуги – по 8. На запрос системы о повторном разбиении уже разбитого на КЭ объема ответить утвердительно. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.

13. Ликвидировать КЭ разбиение цилиндра: *MeshTool\Volume\Clear*. Очистить разбиение всех линий: *MeshTool\Lines\Clear*.

14. Разбить цилиндр элементами 2-го типа с автоматическими настройками (упорядоченное разбиение). *Smart Size* = 5. На панели *MeshTool* в секции *Mesh*: с включенными радиокнопками *Hex* и *Sweep* нажать кнопку *Sweep* → *Pick All*. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.

15. Отключить *Smart Size* и разбить цилиндр элементами 2-го типа с ручными настройками. Число делений образующих – 16, все дуги – по 8. На запрос системы о повторном разбиении уже разбитого на КЭ объема ответить утвердительно. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.

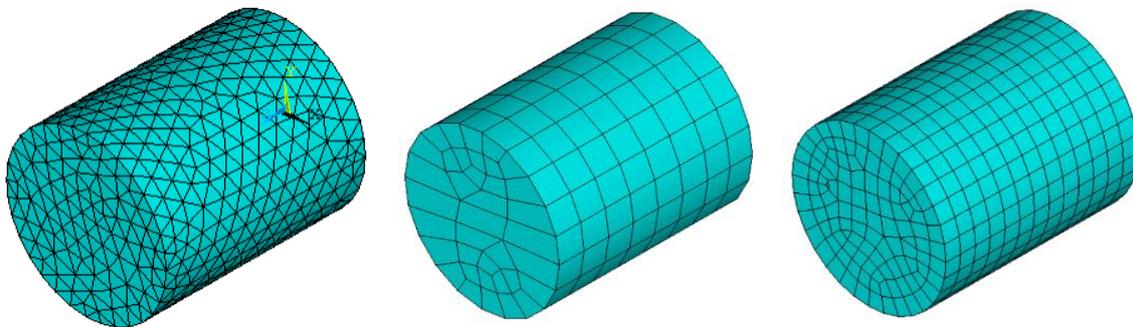


Рис. 9. КЭ модели цилиндра в соответствии с пп. 12, 14 и 15

16. Сохранить БД. Выйти без сохранения.

## 5. Контрольные вопросы

1. Сколько узлов могут содержать плоские элементы?
2. Сколько узлов могут содержать объемные элементы?
3. Какие существуют способы создания КЭ модели?
4. Как можно управлять густотой КЭ сетки?
5. Как получить доступ к параметрам существующей КЭ модели?
6. Какие элементы предпочтительны для создания объемной КЭ модели?

## Лабораторная работа № 4

### Решение линейных задач структурного анализа средствами ПК Ansys

#### 1. Цели работы

Освоение методики выполнения структурного анализа.

#### 2. Задачи работы

1. Совершенствование навыков дискретизации моделей с автоматическими и ручными настройками.
2. Подготовка расчетной модели для структурного анализа.
3. Выполнение анализа и постпроцессинг результатов.

#### 3. План проведения занятия

1. Построение КЭ модели уголкового кронштейна.
2. Назначение свойств материала.
3. Задание внешних нагрузок и краевых условий.
4. Выполнение расчетов.
5. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.

#### 4. Порядок выполнения работы

##### Решение 3-мерной задачи линейного статического анализа

1. Создать задание с новым именем.
2. Загрузить модель кронштейна из сохраненной БД (ЛР №1): *Resume from...*
3. Добавить 1-й тип КЭ из раздела *Solid*: тетраэдр с 10-ю узлами *TET187*.
4. Добавить 2-й тип КЭ из раздела *Solid*: шестигранник с 20-ю узлами *BRICK186*.
5. Назначить свойства материала на панели *Preprocessor\Material Props\Material Models*. Выбрать модель материала: структурный линейный упругий изотропный; заполнить поля на открывшейся панели: модуль упругости  $E_X = 2.0e+05$  ( $2 \cdot 10^5$  МПа), коэффициент Пуассона  $PRXY = 0.3$ .
6. Разбить кронштейн на КЭ 1-го типа в автоматическом режиме, *Smart Size = 5*, неупорядоченное разбиение. *Shape: Tet Free*.
7. Сохранить БД. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.
8. Задать условия закрепления модели: *Loads\Define Loads\Apply\Structural\Displacement*. На 4-х поверхностях, образующих правое (вид спереди) отверстие, задать неподвижность в плоскости кронштейна  $UX = UY = 0$ ; Для одного из узлов,

- лежащих на поверхности правого отверстия, строго посреди толщины кронштейна ( $Z = 8$ ), ограничить перемещение в поперечном направлении:  $UZ = 0$ .
9. Задать нагружение левого отверстия (в его нижней половине) равномерным давлением величиной  $6.25 \text{ Н/мм}^2$ , это обеспечит суммарную вертикальную нагрузку (вниз)  $2000 \text{ Н}$ .
  10. Сохранить БД. Проверить информацию о типах КЭ и свойствах материала в списке *List\Properties*, также об ограничениях и нагрузках – в списке и *List\Loads*.
  11. Назначить тип анализа: *Solution\Analysis Type\New Analysis\Static* → *OK*.
  12. Инициировать выполнение расчета: *Solution\Solve\Current LS*. Закрыть информационное окно */Status Command*; На панели *Solve Current Loadstep* подтвердить начало расчета: *OK*.
  13. По окончании расчета закрыть панель *Solution is done!*
  14. Открыть Постпроцессор и выполнить считывание результатов последнего шага решения: *General Postproc\Read Results\Last Set*.
  15. Отобразить деформированную конфигурацию модели вместе с исходной: *General Postproc\Plot Results\Deformed Shape\Def + undeformed* → *OK*. Сохранить изображение и включить в отчет.

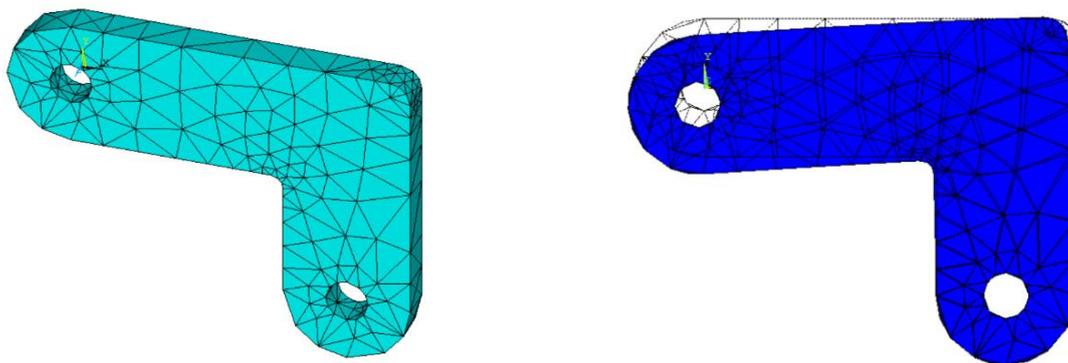


Рис. 10. КЭ модель в соответствии с п. 7 и деформированная конфигурация кронштейна

16. Открыть результаты вычисления реакций: *General Postproc\List Results\Reaction Solu\All struct force F* → *OK\Total Values*. Скопировать и включить в отчет сведения последней строки *TOTAL VALUES*.
17. Отобразить и включить в отчет поля перемещений – координатных компонент  $UX$ ,  $UY$ ,  $UZ$  и полного  $Usum$ : *General Postproc\Plot Results\Contour Plot\Nodal Solu\DOF Solution*.
18. Отобразить и включить в отчет поля усредненных (узловое представление) эквивалентных напряжений по фон Мизесу: *General Postproc\Plot Results\Contour Plot\Nodal Solu\Stress\von Mises stress*.

19. Отобразить и включить в отчет поля неусредненных (элементное представление) эквивалентных напряжений по фон Мизесу: *General Postproc\Plot Results\Contour Plot\Element Solu\Stress\von Mises stress*. Сравнить максимальные значения напряжений в пп.18 и 19.
20. Открыть список подсчитанных напряжений: *General Postproc\List Results\Nodal Solution\Stress\von Mises stress*. Скопировать и включить в отчет данные строки максимальных значений *MAXIMUM VALUES*.
21. Удалить КЭ сетку и разбиение линий: *Preprocessor\Meshing\MeshTool\Clear Volumes\Pick All; Preprocessor\Meshing\MeshTool\Clear Lines\Pick All*.
22. Разбить кронштейн на КЭ 2-го типа в автоматическом режиме *Smart Size = 5*, упорядоченное разбиение *Shape: Hex Sweep*.
23. Сохранить БД. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.
24. Проверить наличие нагрузок и ограничений на поверхностях в списках *List\Loads*.
25. Для одного из узлов, лежащих на поверхности правого отверстия, строго посреди толщины кронштейна  $Z = 8$ , ограничить перемещение в поперечном направлении:  $UZ = 0$ .
26. Выполнить расчет (см. пп. 12–14) и зафиксировать его результаты в соответствии с пп. 14, 16, 18–20. Сравнить наибольшие напряжения для узлового и элементного представлений.
27. Разбить кронштейн на КЭ 2-го типа в автоматическом режиме *Smart Size = 2*, упорядоченное разбиение. *Shape: Hex Sweep*.
28. Выполнить действия пп. 23–26.
29. Выйти без сохранения.

#### Решение 2-мерной задачи анализа плоского напряженного состояния

30. Создать задание с новым именем. Загрузить модель кронштейна из БД, сохраненную по результатам ЛР №1. Назначить свойства материала (п.5).
31. Удалить объем (*Volumes Only*) и все поверхности, исключая лицевую поверхность в плоскости  $Z = 0$ .
32. Выбрать тип КЭ: плоский 8-узловой *Plane183*. Настроить КЭ на режим плоского напряженного состояния с учетом толщины: *Options... → Plane Strs w/thk → ОК*.
33. Назначить КЭ толщину 16 в разделе *Real Constants* Препроцессора.
34. Разбить на КЭ поверхность в автоматическом режиме *Smart Size = 5*, неупорядоченное разбиение *Shape: Quad Free; Mesh Areas*.

35. Сохранить БД. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.
36. Задать условия закрепления модели: *Loads\Define Loads\Apply\Structural\Displacement*. На четырех дугах, образующих контур правого (вид спереди) отверстия, задать полную неподвижность  $UX = UY = 0$ .
37. Задать нагружение левого отверстия (на двух нижних дугах) равномерным давлением величиной  $6.25 \text{ Н/мм}^2$ , это обеспечит суммарную вертикальную нагрузку (вниз)  $2000 \text{ Н}$ .
38. Выполнить расчет (см. пп. 12–14) и зафиксировать его результаты в соответствии с пп. 16, 18–20. Сравнить наибольшие напряжения для узлового и элементного представлений.
39. Отобразить в крупном масштабе напряжения (узловое представление) в зоне концентрации напряжений (КН) и включить в отчет.

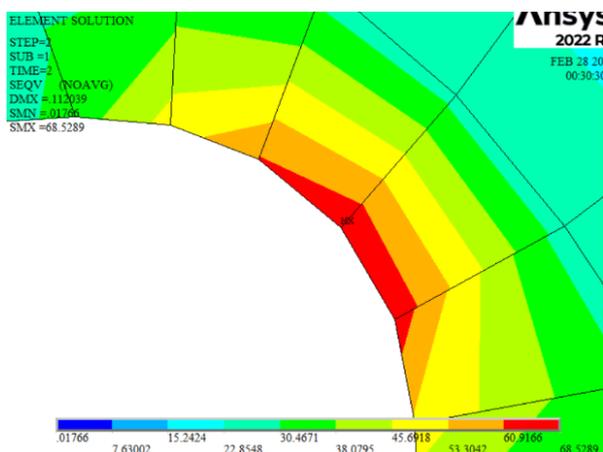


Рис. 11. Напряжения по фон Мизеса в зоне КН (элементное представление)

40. Снять КЭ разбиение с поверхности и линий. Создать упорядоченное разбиение поверхности (пп. 41–49).
41. Убедиться, что в настройках логических операций не выбрано сохранение исходных объектов.
42. Отобразить линии. Соединить точки, ограничивающие дуги контуров отверстий и наружного контура (по три для каждого отверстия).
43. Оставшуюся 4-ю точку контура каждого отверстия скопировать на расстояние 20 (вправо и вверх) и соединить с копией. Каждую из двух полученных точек соединить двумя наклонными линиями с точками наружного контура (см. рис.).
44. Соединить отрезками точки, ограничивающие скругления наружного и внутреннего углов. Разделить эти линии пополам: *Divide\Lines w/Options; Ratio = 0.5*.

Соединить полученные точки деления с угловыми точками п. 43, а также между собой.

45. Устранить дублирование объектов путем их совмещения: *Numbering Ctrl\Merge Items\All*. Сжать нумерацию всех объектов: *Numbering Ctrl\Compress Numbers\All*. Сохранить БД.

46. Разделить исходную поверхность на 14 частей, ограниченных четырьмя линиями каждая: *Divide\Area By Line\Pick all → Apply \Pick all → OK*. Проверить общее количество поверхностей в списке *List\Status\Global Status*. Повторно сжать нумерацию всех объектов.

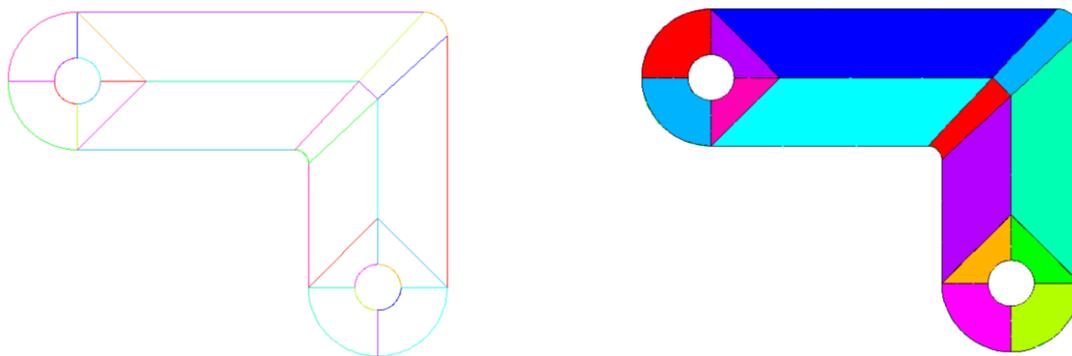


Рис. 12. Линии и поверхности в соответствии с пп. 44 и 46

47. Отобразить линии и разделить их путем указания количества КЭ вдоль каждой: *Meshing\Mesh Tool\Size Lines → Set*. Все дуги (14 шт.), а также 8 наклонных отрезков разделить на 6 частей; вертикальные и горизонтальные отрезки вокруг отверстий – на 3 части. Разделить прямолинейные отрезки: 3 горизонтальных – на 10 частей, 3 вертикальных – на 8 частей.

48. Скорректировать разбиение 4 прямолинейных отрезков, примыкающих к входящему углу, обеспечив сгущение КЭ сетки в зоне КН. Для этой цели указать величину коэффициента *Spacing Ratio* равной 5 (или 0.2 для смены направления сгущения), оставив прежним число делений на КЭ.

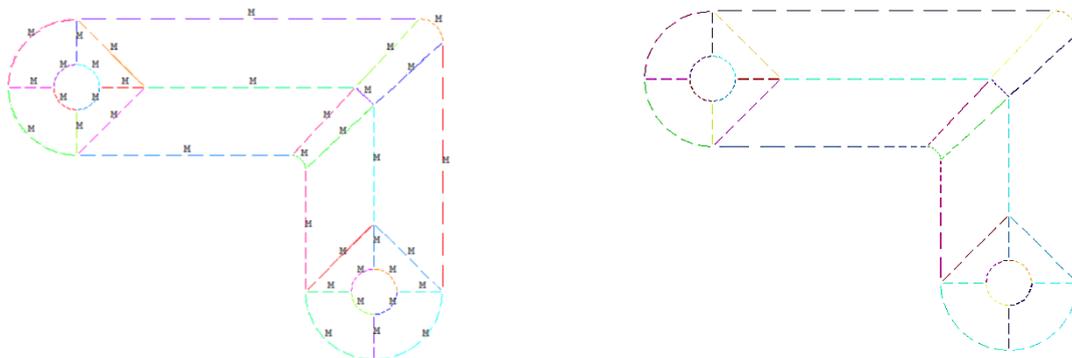


Рис. 13. Разбиение линий: равномерное и со сгущением в зоне КН

49. Отключить *Smart Size* и выполнить упорядоченное разбиение всех поверхностей *Mapped*.

50. Сохранить изображение КЭ модели и включить в отчет. Включить в отчет количественные данные о КЭ разбиении: *List\Status\Global Status*. Сохранить БД.

51. Задать полное закрепление контура правого отверстия и нагружение нижней полуокружности левого отверстия равномерным давлением величиной 6.25.

52. Выполнить расчет и зафиксировать его результаты: деформированное состояние; реакции; напряженное состояние в виде полей эквивалентных напряжений по фон Мизесу (*Nodal Solution* и *Element Solution*), а также максимальных значений из списка *List Results*. Включить эти данные в отчет. Сравнить максимальные напряжения узлового и элементного представлений.

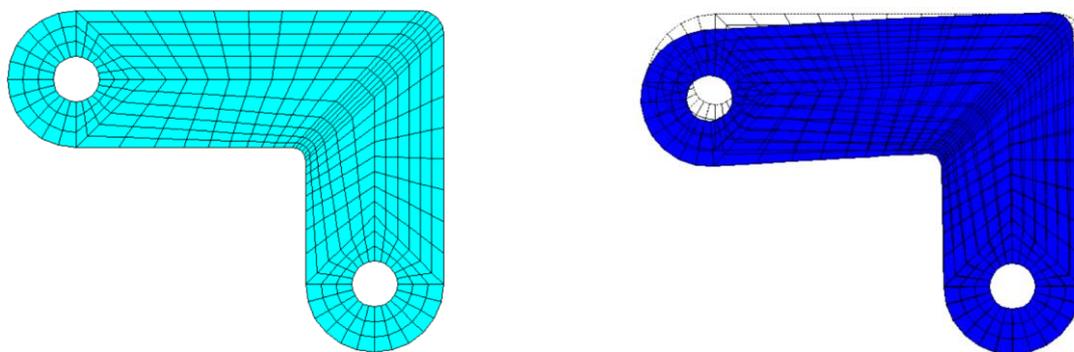


Рис. 14. КЭ модель в соответствии с п. 49 и деформированная конфигурация кронштейна

53. Выйти без сохранения.

## 5. Контрольные вопросы

1. Какие свойства материала необходимы для выполнения структурного анализа?
2. Каким образом двумерные КЭ настраиваются на решение плоской задачи?
3. Какие подготовительные операции требуются перед непосредственным запуском расчета?
4. Каким образом может быть получен доступ к результатам расчета?
5. Какие возможны варианты представления полей напряжений? В чем их различие?
6. Каким образом можно оценить точность результатов анализа?

## Лабораторная работа № 5

### Решение задач структурного анализа при наличии массовых нагрузок и циклической симметрии конструкции

#### 1. Цели работы

Дальнейшее освоение методики выполнения структурного анализа.

#### 2. Задачи работы

1. Совершенствование навыков геометрического моделирования снизу-вверх и КЭ дискретизации моделей.
2. Подготовка расчетной модели для структурного анализа.
3. Выполнение анализа и постпроцессинг результатов.

#### 3. План проведения занятия

1. Построение КЭ модели фрагмента компрессорного диска.
2. Назначение свойств материала.
3. Задание внешних нагрузок и краевых условий.
4. Выполнение расчетов.
5. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Открыть задание с новым именем. Включить нумерацию геометрических объектов *Colors&Numbers*.

Построение сектора циклически симметричной модели компрессорного диска

2. Построить 10 точек с координатами в рабочей плоскости, приведенными в таблице.

Таблица

#### Координаты точек в рабочей плоскости

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
WX	25	25	4	4	7	7	4	4	30	30
WY	90	115	155	230	230	255	255	300	300	325

3. Последовательно соединить точки КР1 – КР10 прямолинейными отрезками.
4. Построить скругления:
  - радиусом 10 между линиями L7 и L8;
  - радиусом 3 между линиями L6 и L7, L3 и L4;
  - радиусом 20 между линиями L2 и L3; L1 и L2.
5. Зеркально отразить все линии (*pick all*) относительно плоскости *YZ*.

6. Замкнуть контур, соединив горизонтальными отрезками попарно крайние верхние и крайние нижние точки.
7. Сохранить БД.
8. Соединить точки КР12 и КР28 дугой окружности радиуса 20, центр кривизны со стороны точки 14 (внизу): *Modeling\Create\Lines\Arcs\By End KPs & Rad\12,28* → *Apply\14* → *Apply\* ввести радиус 20 → *OK*.
9. Скопировать точки КР12 и КР28 со смещением 25 вдоль *Y*. Соединить точки 12 и 28 вертикальными отрезками с их копиями.
10. Убедиться, что в настройках логических операций включено сохранение исходных объектов, и разделить полученными отрезками линию L25 на три части. Удалить линию L25.
11. Соединить горизонтальными отрезками попарно точки КР27 и КР11, КР26 и КР13, КР25 и КР6, КР24 и КР5, КР23 и КР14, КР22 и КР15, КР21 и КР4, КР20 и КР17, КР19 и КР16.
12. Создать поверхность по четырем линиям, образующим замкнутый контур (например, L1, L26, L13, L40); таким же образом получить следующую поверхность, всего – 13. Изображение поверхностей включить в отчет.

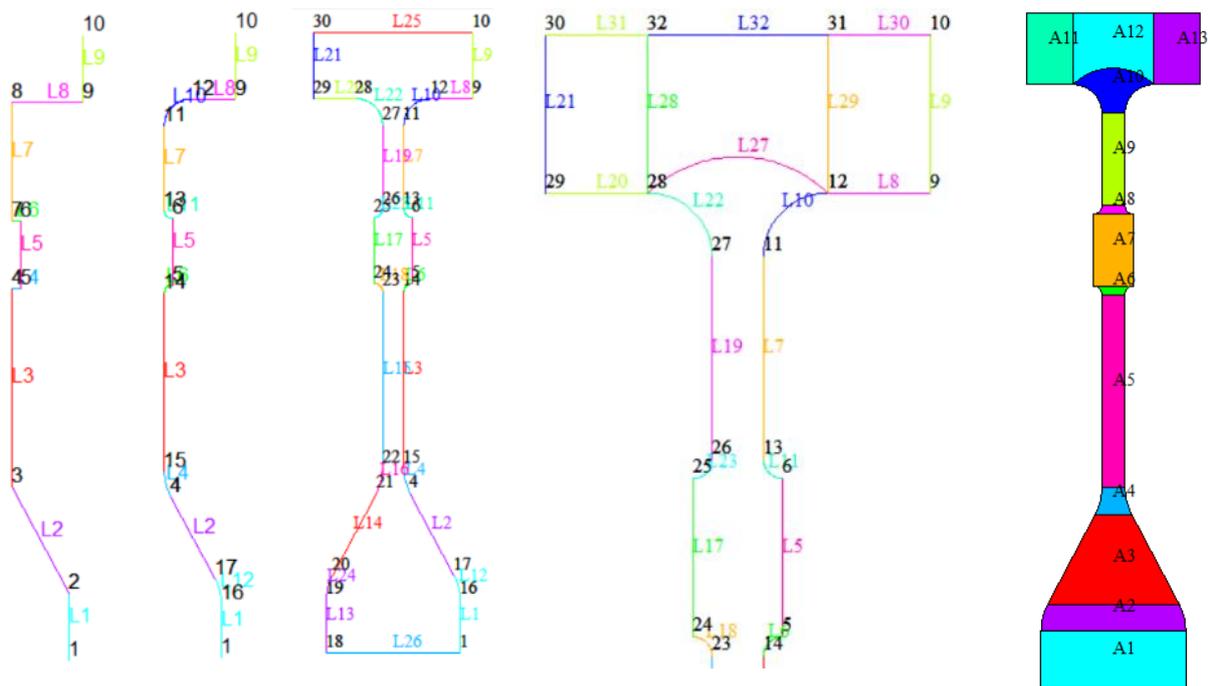


Рис.15. Этапы построения сечения модели в соответствии с пп. 2 – 6, 8 – 12

13. Построить 2 точки (КР33 и КР34) с координатами (40;0), (-40;0) в рабочей плоскости для указания оси вращения.

14. Создать объемы вращением поверхностей A1 – A13 вокруг оси на угол  $120^\circ$ : *Modeling\Operate\Extrude\Areas>About Axis\Pick All\33,34* → *Apply\ARC = 12* → ОК.
15. Выбрать плоскую боковую поверхность обода A64, а также относящиеся к ней линии (*Lines Attached to Areas*). Выбрать относящиеся к линиям точки (*Keypoints Attached to Lines*). Отобразить линии, вид справа.
16. Создать 2 точки, лежащие посреди верхней и нижней дуг: *Modeling\Create\Keypoints\On Line w\Ratio\указать дугу* → *Apply\Line ratio = 0.5* → ОК. Создать между этими точками новую точку, на расстоянии 10 от нижней: *Modeling\Create\Keypoints\KP between KPs\указать нижнюю, затем верхнюю точку* → *Apply\DIST = 10* → ОК.
17. Сориентировать рабочую плоскость по точкам: *Utility Menu\Work Plane\Align WP with\Keypoints + \указать последовательно 3 точки: вновь созданные среднюю и верхнюю, а затем левую верхнюю точку контура* → ОК.
18. Создать 3 точки в рабочей плоскости: (0;12), (10;4), (20;4). Последовательно соединить точки прямолинейными отрезками.
19. Активную систему координат совместить с рабочей плоскостью: *Utility Menu\Work Plane\Change Active CS to\Working Plane*. Две полученные линии (п.18) зеркально отразить относительно плоскости XZ. Замкнуть контур двумя прямолинейными отрезками. Скруглить острые углы, радиус = 2.

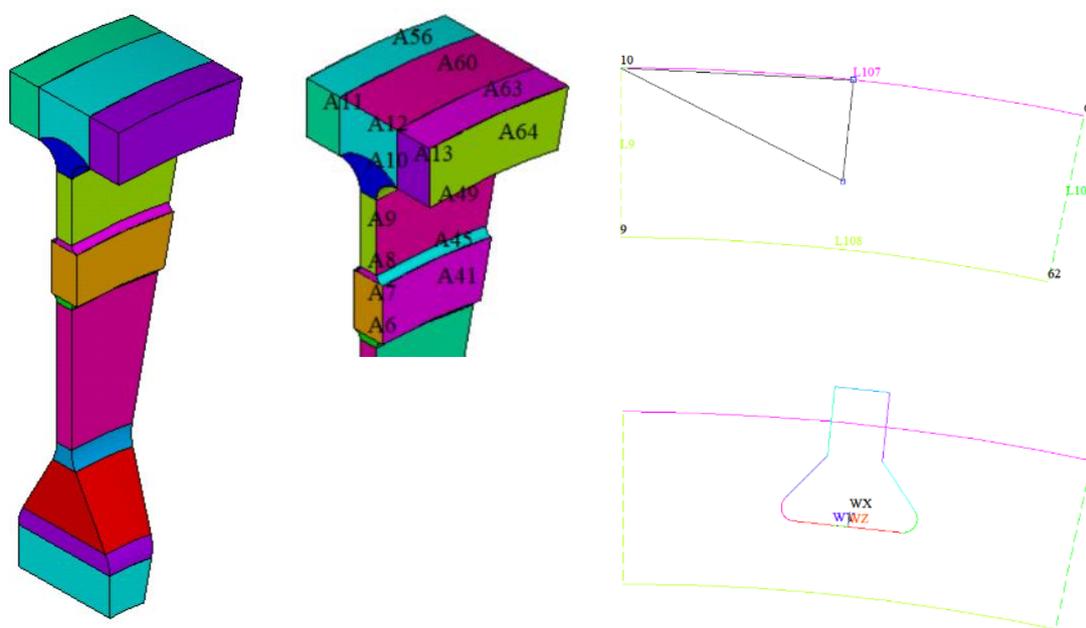


Рис. 16. Этапы построения модели сектора в соответствии с пп. 14–19

20. Вернуть активную систему координат к глобальной декартовой, совместить с ней рабочую плоскость.
21. Создать поверхность, ограниченную контуром п. 19, указав последовательно 8 линий.
22. Выбрать все. Создать объем вытягиванием полученной поверхности вдоль нормали на расстояние 70 (либо -70, в зависимости от ориентации базовой поверхности). Полученный объем должен пересечь созданный в п. 14 сектор.
23. В настройках логических операций отключить сохранение исходных объектов. Вычесть полученный объем из объемов, которые он пересекает, указав последовательно 3 объема, *Apply*, далее объем п. 22, *OK*.
24. Выбрать все. Сохранить изображение полученных объемов в виде графического файла и включить в отчет.
25. Сжать нумерацию всех объектов. Сохранить БД. Скопировать из списка *Global Status* информацию о геометрии *Solid model summary* и включить в отчет.
26. Определить автоматически сектор циклически симметричной модели: *Modeling\Cyclic Sector\Cyclic Model\Auto Defined\Ok*. В пункте меню *Cyclic Expansion* выбрать опцию *On*. Обновить отображение объемов.

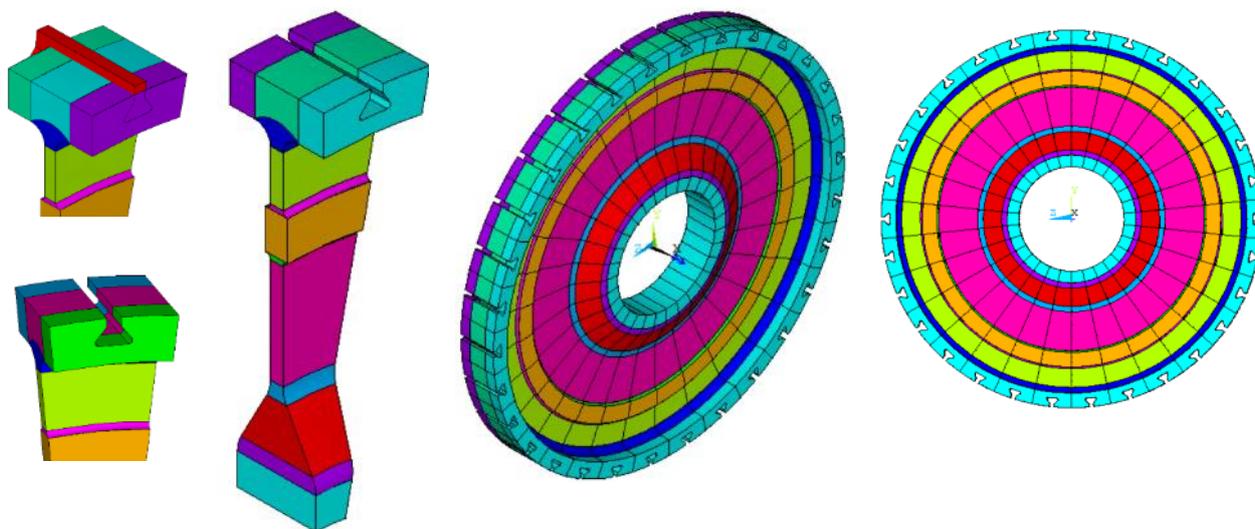


Рис. 17. Этапы построения модели диска в соответствии с пп. 21–23 и 26

27. Сохранить изображение в виде графического файла и включить в отчет.

#### Подготовка расчетной модели

28. Отключить *Cyclic Expansion*.
29. Выбрать тип КЭ: 20-узловой шестигранный элемент *SOLID186*.
30. Задать свойства линейно упругого изотропного материала: модуль упругости  $2e+05$ ; коэффициент Пуассона 0.3; задать плотность  $7.8e-09$ .

31. Выбрать 4 объема: в основании сектора, утолщенный участок диска, наружный плоский участок диска и переходной участок от диска к ободу, с выпуклой верхней гранью (V10, V4, V2, V1). Выбрать относящиеся к объемам поверхности (*Areas Attached to Volumes*) и относящиеся к поверхностям линии (*Lines Attached to Areas*). Разделить выбранные линии на 8 частей (панель *MeshTool*, секция *SizeControls*).
32. Выбрать все. На панели *MeshTool* в секции *Element Attributes* подтвердить глобальную настройку по умолчанию: № типа КЭ – 1; № материала – 1.
33. Выбрать все, затем снять выбор с трех объемов на ободу диска (с вырезом). Для оставшихся объемов выполнить разбиение на 6-гранные КЭ методом *Sweep*.
34. Выбрать все, затем три объема на ободу диска (см. выше). Для них выполнить КЭ разбиение *Sweep*.
35. Выбрать все. Сжать нумерацию всех объектов. Сохранить БД. Включить в отчет изображение КЭ модели, в том числе сектор и диск полностью (*Cyclic Expansion = ON*), а также сведения из текстового файла *Global Status*.

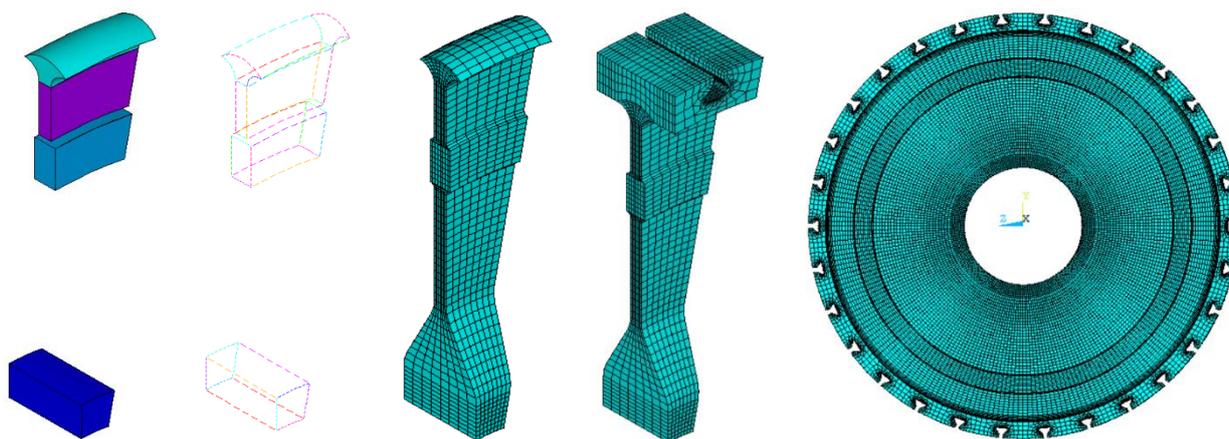


Рис. 18. Этапы построения КЭ модели диска в соответствии с пп. 31, 33–35

36. Задать инерционную нагрузку в виде угловой скорости с компонентами 210; 0; 0.
37. Создать цилиндрическую систему координат соосно оси вращения диска. Для этого совместить рабочую плоскость *WP* с началом глобальной декартовой системы, затем повернуть ее вокруг *Y* на 90° против часовой стрелки: *WorkPlane\Offset WP by Increments...*, на панели *Offset WP* установить бегунок *Degrees* в положение 90 и нажать кнопку . Далее создать локальную систему координат: *WorkPlane\Local Coordinate Systems\Create Local CS\At WP Origin*, на открывшейся панели выбрать из списка цилиндрическую систему → *OK*.

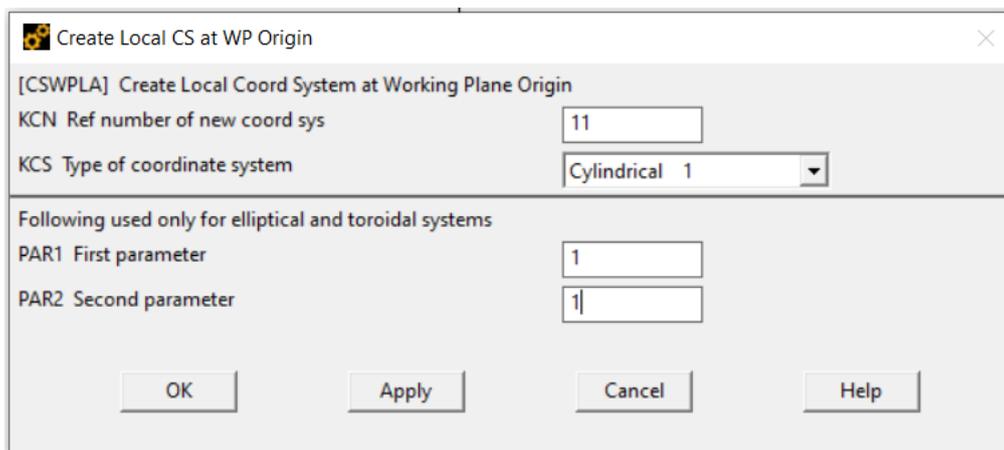


Рис. 19. Панель управления созданием локальной системы координат

38. Сделать систему координат *CS 11* активной: *WorkPlane\Change Active CS to\Specified Coord Sys...*, на панели ввести в поле номер 11 → *OK*.

39. Сориентировать узлы модели в *CS 11*: *Modeling\Move/Modify\Rotate Node CS\To Active CS*.

40. Выбрать поверхность в основании сектора, затем узлы, относящиеся к этой поверхности. Закрепить выбранные узлы в окружном и осевом направлениях  $UY = UZ = 0$ . Сохранить БД.

#### Выполнение анализа и обработка результатов

41. Запустить структурный анализ. По завершении расчета выполнить считывание результатов (*Last set*) в Постпроцессоре.

42. Включить отображение результатов относительно цилиндрической системы координат: *General Postproc\Options for Outp*, на панели выбрать из списка тип координатной системы и ввести в поле ее номер.

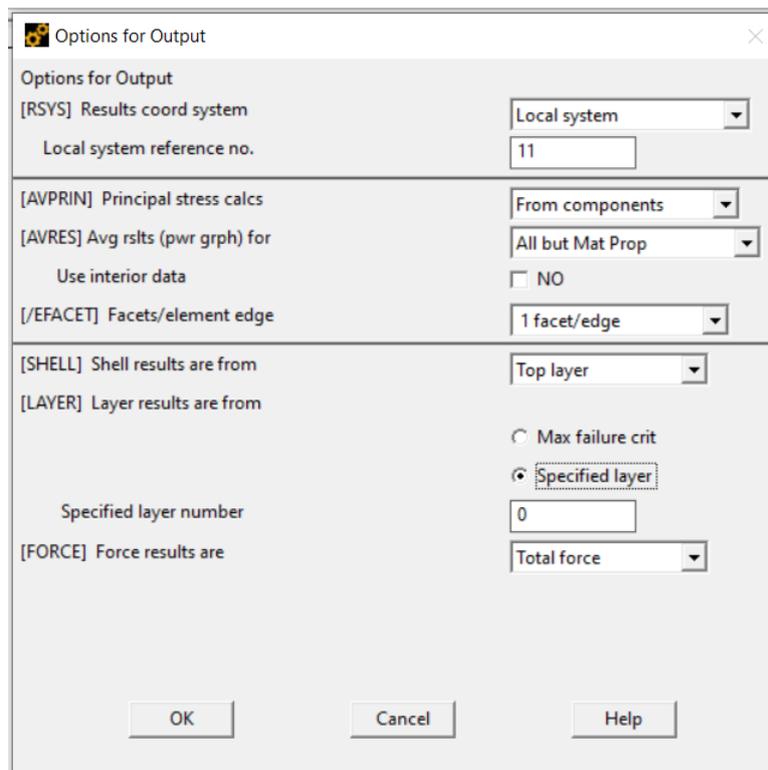


Рис. 20. Панель управления параметрами отображения результатов анализа

43. Отобразить и включить в отчет поля эквивалентных напряжений по фон Мизесу: а) узловое представление; б) элементное представление. Сравнить максимальные напряжения для двух вариантов.

44. Для вариантов а) и б) отобразить полную картину напряженного состояния вращающегося диска: *General Postproc\Cyclic Analysis\Cyc Expansion\On*. Включить изображения в отчет.

45. Отобразить и включить в отчет эпюры радиальных (*X-Component*) напряжений, окружных (*Y-Component*) напряжений, а также 1-го главного напряжения для всего диска (аналогично п. 44).

46. Отобразить и включить в отчет эпюры радиальных, окружных и суммарных перемещений для всего диска.

47. Выйти без сохранения.

## 5. Контрольные вопросы

1. Каким образом учитывается циклическая симметрия геометрической модели?

2. Как совместить рабочую плоскость с гранью объемной модели?

3. Какая формообразующая операция выполняется при создании сектора циклически симметричной модели? Какие компоненты модели должны быть предварительно созданы?

4. Как задается центробежная нагрузка на модель?
5. Какая характеристика материала должна быть задана для возможности учета сил инерции?
6. Каким образом отобразить полную циклически симметричную модель на основе модели отдельного сектора?

## **Лабораторная работа № 6**

### **Структурный анализ каркасной конструкции**

#### **1. Цели работы**

Дальнейшее освоение приемов построения КЭ моделей и методики выполнения структурного анализа.

#### **2. Задачи работы**

1. Совершенствование навыков геометрического моделирования снизу-вверх и КЭ дискретизации моделей.
2. Подготовка расчетной модели для структурного анализа.
3. Выполнение анализа и постпроцессинг результатов.

#### **3. План проведения занятия**

1. Построение КЭ модели каркасного кожуха.
2. Назначение свойств материала.
3. Задание внешних нагрузок и краевых условий.
4. Выполнение расчетов.
5. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.

#### **4. Порядок выполнения работы**

1. Открыть задание с новым именем. Включить нумерацию геометрических объектов *Colors&Numbers*.

##### Построение модели каркасной конструкции

2. Выбрать и добавить в задание стержневой и оболочечный типы КЭ *BEAM188* и *SHELL181*.

Назначить свойства материала структурной линейно упругой изотропной модели: модуль упругости  $2e+05$  (МПа), коэффициент Пуассона 0.3; указать плотность  $7.8e-06$  (кг/мм<sup>3</sup>).

3. Перенести рабочую плоскость *WP* в точку (0;0;-1600) и создать в данной плоскости контур боковой стороны каркасной конструкции.

3.1. Построить в рабочей плоскости полуокружность радиуса 600: *Modeling\Create\Lines\Arcs\By Cent & Radius* → 0,0 → *Apply* → 600 → *Apply* → 180 → *OK*.

3.2. Создать 2 точки в рабочей плоскости (-700;80) и (1300;80), соединить их прямой.

3.3. Создать дугу радиуса 700 с центром в начале координат *WP* и углом раскрытия  $60^\circ$ .

3.4. Создать точку в начале координат *WP* и соединить ее с левой точкой новой дуги.

3.5. Убедиться, что в настройках логических операций *Settings* отключено сохранение исходных объектов. Для дуги *L1* и пересекающей ее прямой *L5* выполнить операцию *Partition*. Удалить дугу радиуса 700 и отрезок прямой, примыкающий к ее крайней точке.

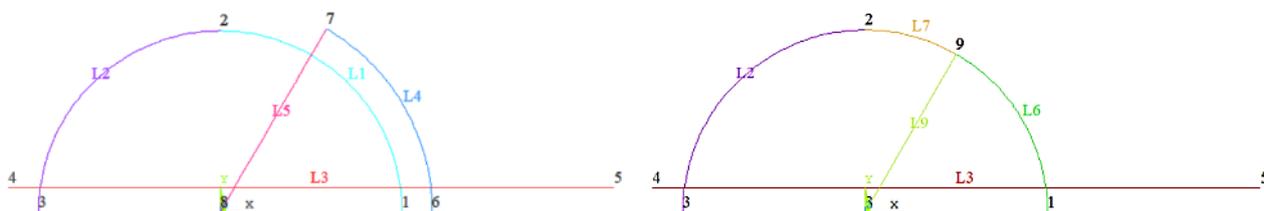


Рис. 21. Построение линий в соответствии с пп. 3.1–3.5

3.6. Совместить начало координат *WP* с общей точкой *KP9* двух новых дуг *L6* и *L7*, направив ось *WX* к центру дуг (*KP8*), а ось *WY* к правой точке горизонтальной прямой: *Work Plane\Align WP with\Keypoints* → выбрать последовательно 3 точки мышью → *OK*. В текущем положении рабочей плоскости создать точку с координатами (0,1200) и соединить ее с текущим началом координат *WP*. Построить вертикальный отрезок из центра до точки *KP2* на стыке дуг *L2* и *L7*.

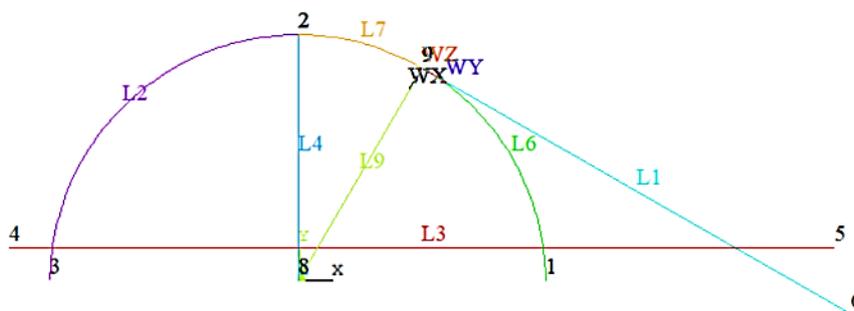


Рис. 22. Результат построений в соответствии с п. 3.6

3.7. Удалить наклонный отрезок L9 и дугу L6. Для всех оставшихся линий выполнить операцию *Partition*. Удалить все отрезки (5 шт.) за пределами контура.

3.8. Вернуть *WP* в начало координат глобальной системы. Сжать нумерацию всех объектов. Сохранить БД.

4. В меню *Meshing*, на панели *MeshTool* в секции *Lines* назначить число КЭ вдоль линий: 10 для L2, L3, L6 и 20 для L1, L4, L5.

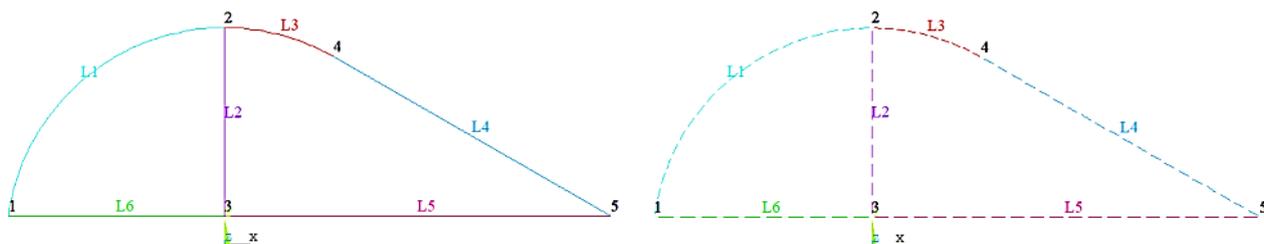


Рис. 23. Результаты выполнения пп. 3.7 и 4

5. В меню *Section\Beam\Common Sections* на панели *Beam Tool* настроить параметры сечений стержневых КЭ: для ID = 1 присвоить имя (например, c1), выбрать тип сечения **L** (уголок), назначить размеры  $W1 = W2 = 40$ ;  $t1 = t2 = 4$ ; в списке *Offset To* выбрать *Shear Cen*. Для просмотра модели поперечного сечения КЭ на панели *Beam Tool* нажать кнопку *Meshview*.

6. В меню *Meshing*, на панели *MeshTool* выбрать в секции *Global* тип элемента *BEAM188*, материал 1, номер сечения 1 (1-й номер указывается по умолчанию).

7. Разбить линии L1, L3, L4 на КЭ *BEAM*. Отобразить элементы: *PlotCtrls\Style\Size and Shape\Display of Element* → *On*. Разбиение линий на стержневые КЭ, особенно с несимметричным сечением, например, в виде уголка, во многих случаях требует указания точки ориентации. Эта точка задает положение поперечного сечения профиля относительно оси стержня.



Рис. 24. КЭ модель бокового шпангоута в соответствии с п. 7

8. Если ориентация уголка не соответствует изображению на рис. (вертикальная полка – вверх, с наружной стороны), следует снять КЭ (*Clear*) с соответствующей линии, затем на панели *MeshTool* в секции *Element Attributes*: выбрать из списка *Lines* вместо *Global*, нажать *Set*, выбрать линию (линии), установить флажок в поле *Pick Orientation Keypoint* и указать точку ориентации, после чего выполнить повторное разбиение на КЭ. Если ожидаемый эффект не достигнут, следует повторить описанные действия и указать другую точку. Точки ориентации можно получить копированием крайних точек линии с небольшим смещением в поперечном к линии направлении, в том числе в плоскости и из плоскости контура (см. ниже).

9. Скопировать точку КР3 со смещением 10 вдоль оси *Y*. Полученная точка будет точкой ориентации для линий L5 и L6 (см. ниже). В меню *Section\Beam\Common Sections* на панели *Beam Tool* создать сечение подобно п.5, но с новыми номером (ID=2) и именем, при этом в списке *Offset To* выбрать *Location* и ввести 36 в поле *Offset-Y*, 0 в поле *Offset-Z*. На панели *MeshTool* указать для линий L5 и L6 сечение ID=2 и точку ориентации (см. п.8), после чего разбить эти линии на КЭ *BEAM*.

10. В меню *Section\Beam\Common Sections* на панели *Beam Tool* создать новое сечение ID=3 подобно п.5, при этом в списке *Offset To* выбрать *Location* и ввести 36 в поле *Offset-Z*, 0 в поле *Offset-Y*. Скопировать точку КР2 со смещением -10 вдоль оси *Z*. Полученную точку назначить точкой ориентации для линии L2, при этом выбрать сечение ID=3. Разбить линию L2 на КЭ *BEAM*.

11. Скопировать линии L1, L3, L4 вместе с КЭ на расстоянии 800 вдоль *Z*. Полученные линии еще раз скопировать таким же образом.

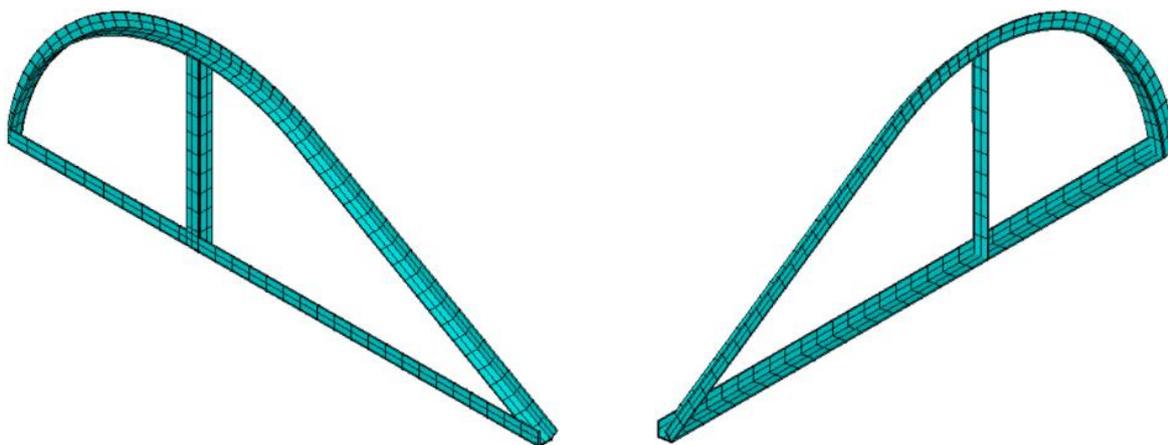


Рис. 25. КЭ модель (в двух ракурсах) боковой стороны каркасной конструкции по итогу выполнения п. 10

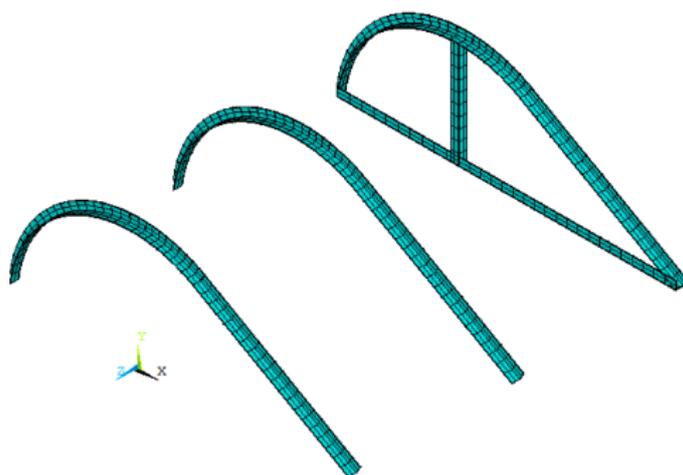


Рис. 26. КЭ модель после копирования линий согласно п. 11

12. Скопировать линии L1 – L6 без КЭ на расстоянии 3200 вдоль Z.

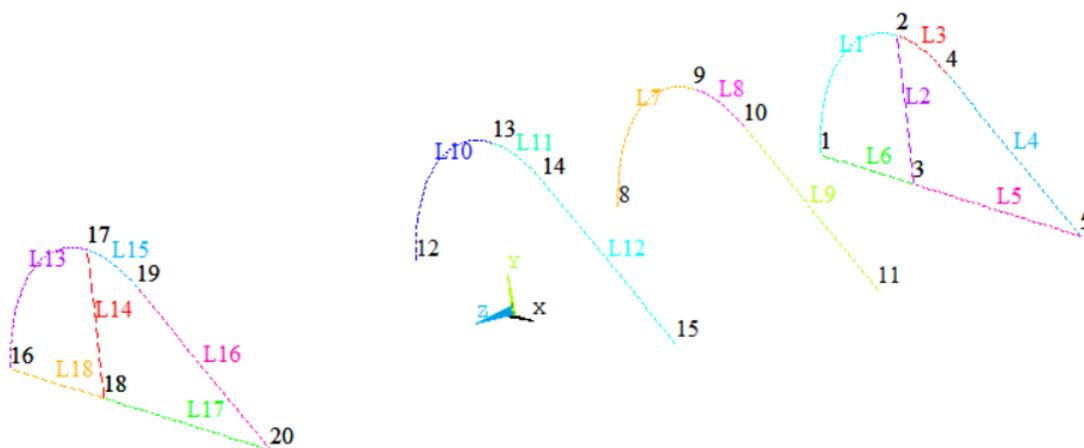


Рис. 27. Линии и точки после копирования согласно п. 12

13. Скопировать точку КР20 (см. рис. 27) со смещением 10 вдоль оси Y. Полученную точку КР21 назначить точкой ориентации для линии L16, сечение ID=1. Скопировать точку КР16 со смещением -10 вдоль оси X. Полученную точку КР22 назначить точкой ориентации для линии L13, сечение ID=1. Скопировать точку КР17 со смещением 10 вдоль оси Y. Полученную точку КР23 назначить точкой ориентации для линии L15, сечение ID=1. Разбить на КЭ линии L13, L15 и L16.
14. Скопировать точку КР20 со смещением 10 вдоль оси Z. Полученную точку КР24 назначить точкой ориентации для линий L17 и L18, сечение ID=3. Разбить на КЭ линии L17 и L18.
15. Точку КР16 назначить точкой ориентации для линии L14, сечение ID=2. Разбить на КЭ линию L14.

16. Скопировать линии L13, L15, L16 вместе с КЭ на расстоянии -800 вдоль Z.

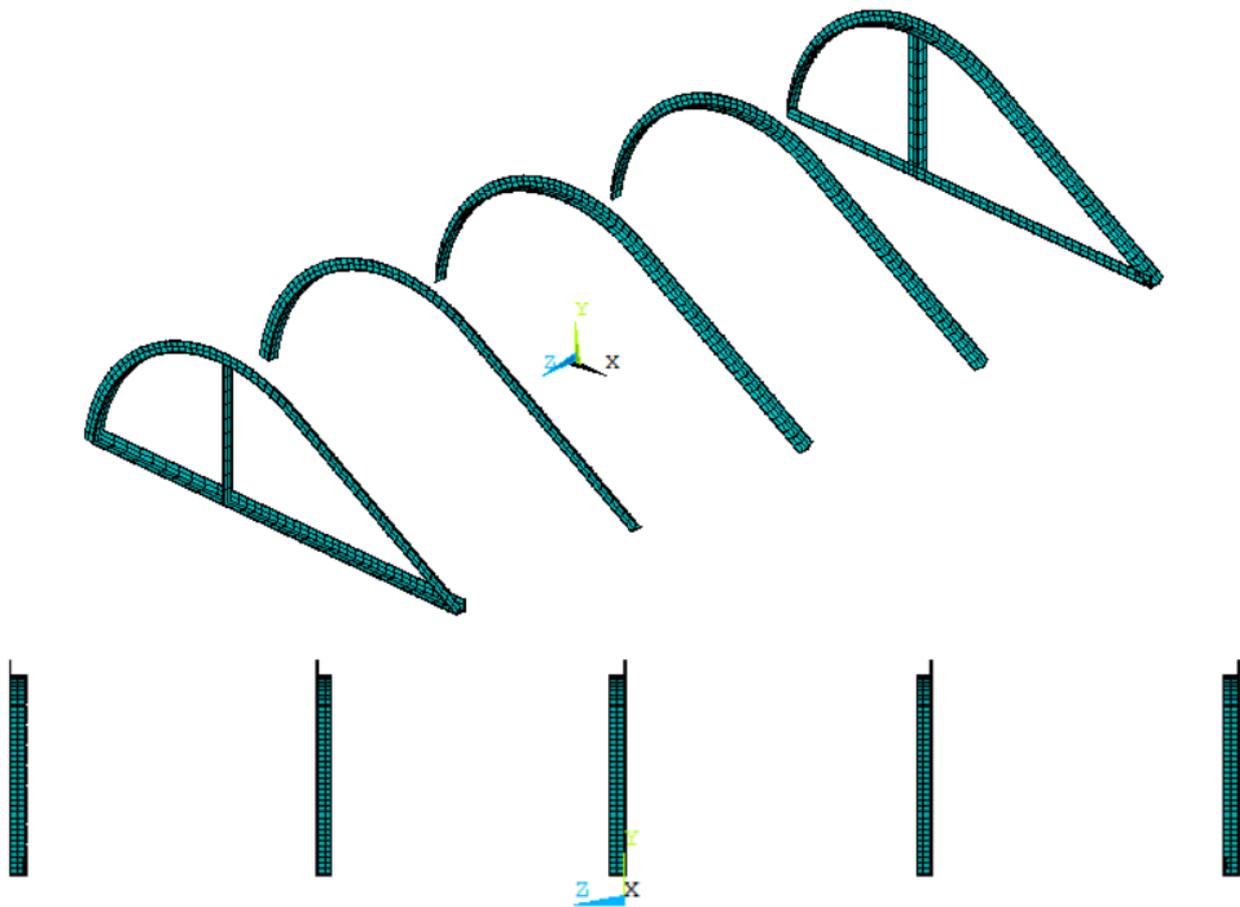


Рис. 28. КЭ модель (в изометрии и спереди) после выполнения пп. 13–16

17. Соединить линиями вдоль Z соответствующие точки соседних контуров (кроме точек КР3 и КР18, см. рис. 27), при этом все линии направить в сторону роста Z. Назначить число КЭ по всем продольным линиям 10. Выбрать все; изображение линий включить в отчет.

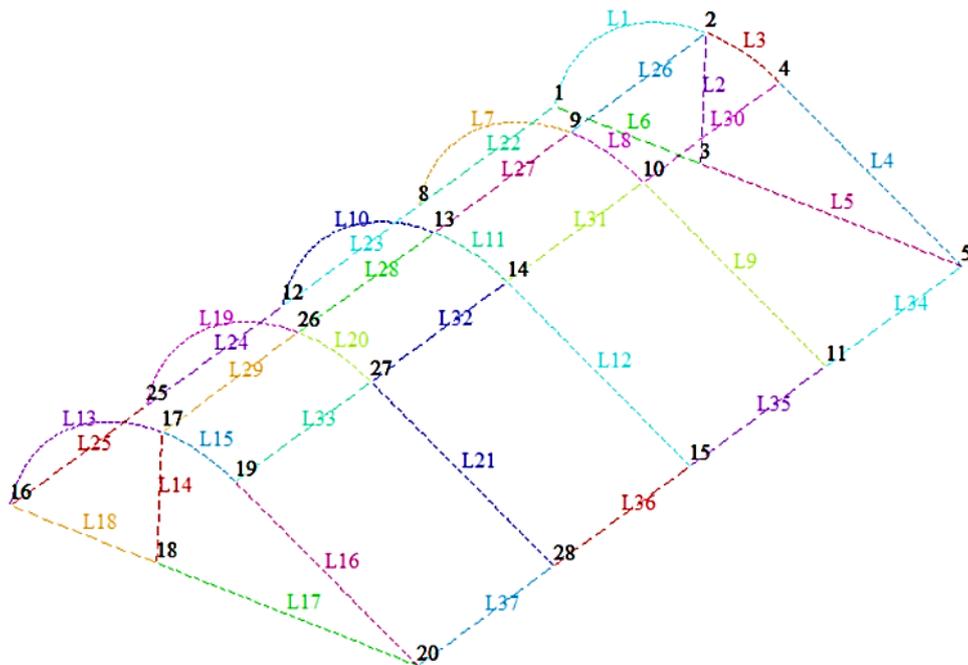


Рис. 29. Линии и точки после выполнения п. 17

18. В меню *Section\Beam\Common Sections* на панели *Beam Tool* создать новое сечение ID=4 подобно п.5, в списке *Offset To* выбрать *Location* и ввести 0 в поле *Offset-Y* и в поле *Offset-Z*.

19. Создать точку с координатами (0;0;-1600). Совместить начало координат *WP* с созданной точкой, направив оси *WX* и *WY* к точкам КР1 и КР2 (см. рис. 29) соответственно: *Work Plane\Align WP with\Keypoints* → выбрать последовательно 3 точки мышью → *OK*. В текущем положении рабочей плоскости создать точку с координатами (610;0;0). Полученную точку назначить точкой ориентации для линий L22 – L25 (см. рис.), сечение ID=4. Разбить линии L22 – L25 на КЭ *BEAM*.

20. Совместить начало координат *WP* с созданной в п.19 точкой (0;0;-1600), направив оси *WX* и *WY* к точкам КР4 и КР5 (см. рис. 29) соответственно: *Work Plane\Align WP with\Keypoints* → выбрать последовательно 3 точки мышью → *OK*. В текущем положении рабочей плоскости создать точку с координатами (610;0;0). Полученную точку назначить точкой ориентации для линий L30 – L33 (см. рис. 29), сечение ID=4. Разбить линии L30 – L33 на КЭ *BEAM*.

21. Вернуть *WP* в начало координат глобальной системы. Сохранить БД.

22. В меню *Section\Beam\Common Sections* на панели *Beam Tool* создать новое сечение ID=5, выбрать тип сечения □ (труба), назначить имя и размеры  $W1 = 40$ ;  $W2 = 60$ ;  $t1 = t2 = t3 = t4 = 4$ ; в списке *Offset To* выбрать *Location* и ввести 2 в поле *Offset-Y*, 0 в поле *Offset-Z*.

23. Назначить КР4 точкой ориентации для линий L34 – L37 (см. рис. 29), сечение ID=5. Разбить линии L34 – L37 на КЭ *BEAM*. Изображение КЭ модели включить в отчет.

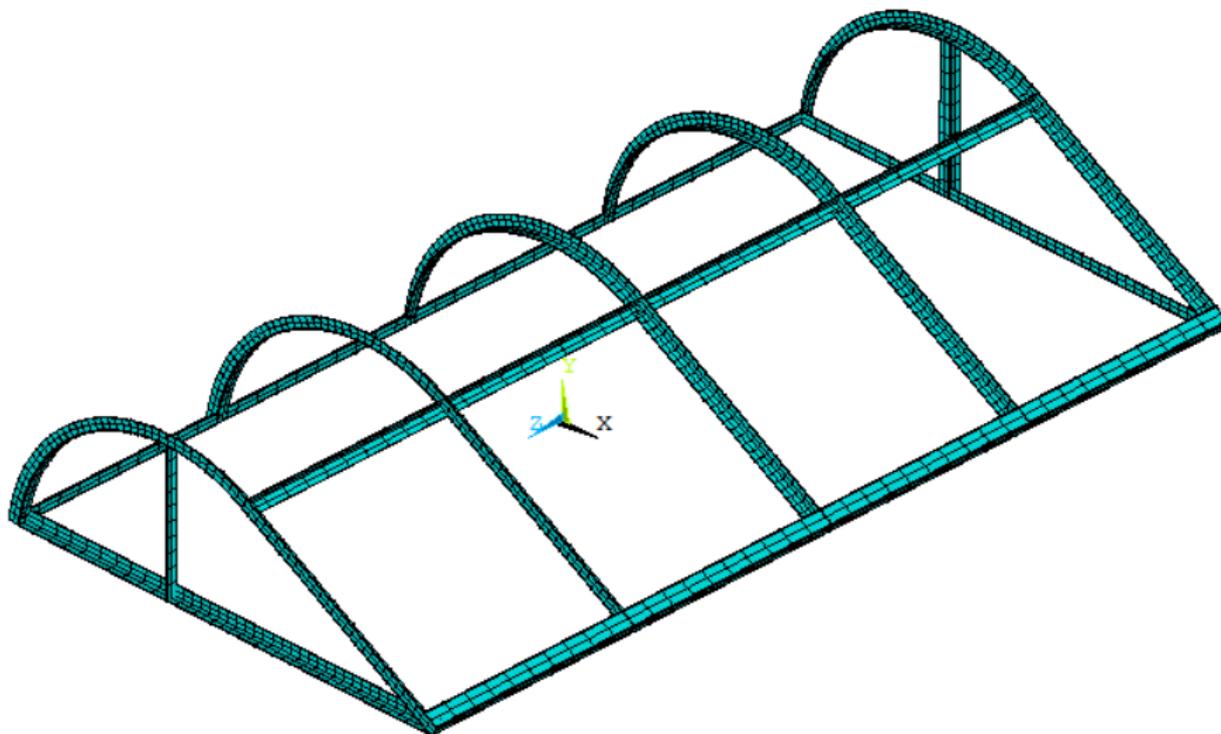


Рис. 30. КЭ модель стержневого каркаса по итогу выполнения п. 23

24. Создать 12 поверхностей по линиям, при этом последовательно указывая по 4 ограничивающие линии (далее *Apply*). Каждая поверхность имеет прямоугольный план и ограничена двумя продольными линиями (из набора L22 – L37) и двумя поперечными линиями (из набора L1 – L21, за исключением L2, L5, L6, L14, L17, L18, см. рис.). Порядок указания линий для всех поверхностей должен быть единообразным (например, обход по часовой стрелке). Это обеспечит одинаковую ориентацию нормалей ко всем поверхностям и, соответственно одинаковую ориентацию КЭ относительно срединной поверхности.

25. В меню *Section\Shell\Lay-up\Add/Edit* на панели *Create and Modify Shell Sections* настроить параметры сечений оболочечных КЭ: присвоить имя сечению с очередным номером ID=6, указать толщину 2. В списке *Section Offset* выбрать *User-Input-Location*, а в поле *User Defined Value* ввести значение -3.

26. В меню *Meshing*, на панели *MeshTool* установить атрибуты КЭ для всех поверхностей: выбрать в секции *Global* тип элемента *SHELL181*, материал 1, сечение с номером 6 (как в п. 25).

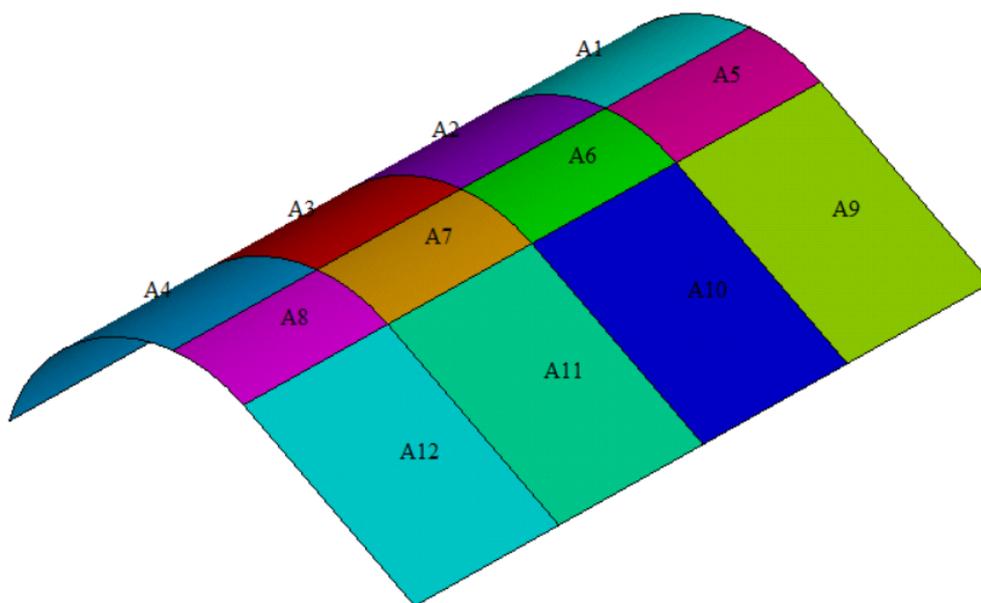


Рис. 31. Поверхностная модель в соответствии с п. 24

27. Создать упорядоченное разбиение поверхностей на КЭ *SHELL*: на панели *MeshTool* включить в секции *Shape* радиокнопки *Quad* и *Mapped*; на диалоговой панели *Mesh Areas* выбрать *Pick All*. Отобразить КЭ и убедиться, что полка уголка стержневых элементов лежит строго поверх обшивки; в противном случае скорректировать значение в поле *User Defined Value* (см. п. 25).

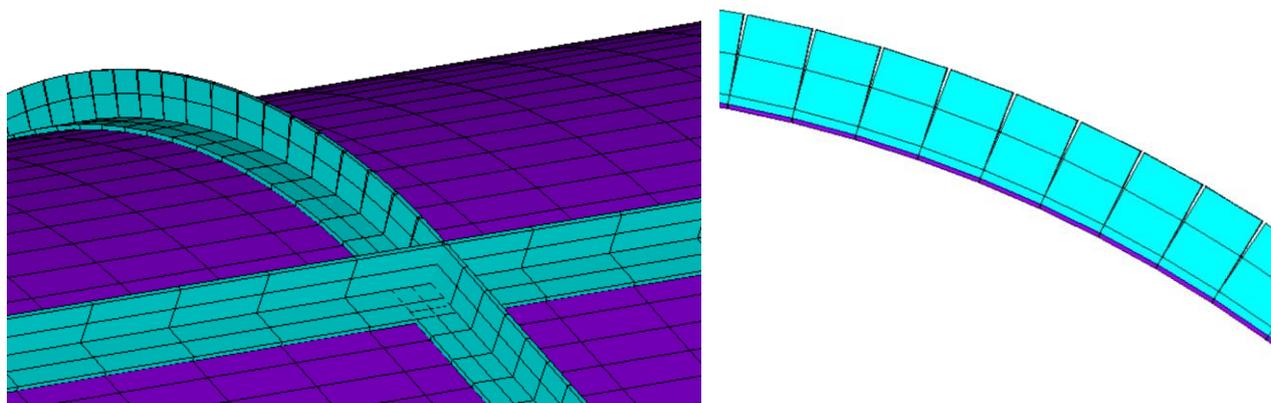


Рис. 32. Взаимное положение стержневых и оболочечных КЭ по итогу выполнения п. 27

28. Выбрать все; сжать нумерацию всех объектов; сохранить БД. Сохранить в виде графического файла и включить в отчет изображение полной КЭ модели. Скопировать из списка *Global Status* и включить в отчет информацию о геометрии *Solid model summary* и о КЭ модели *Finite element model summary*.

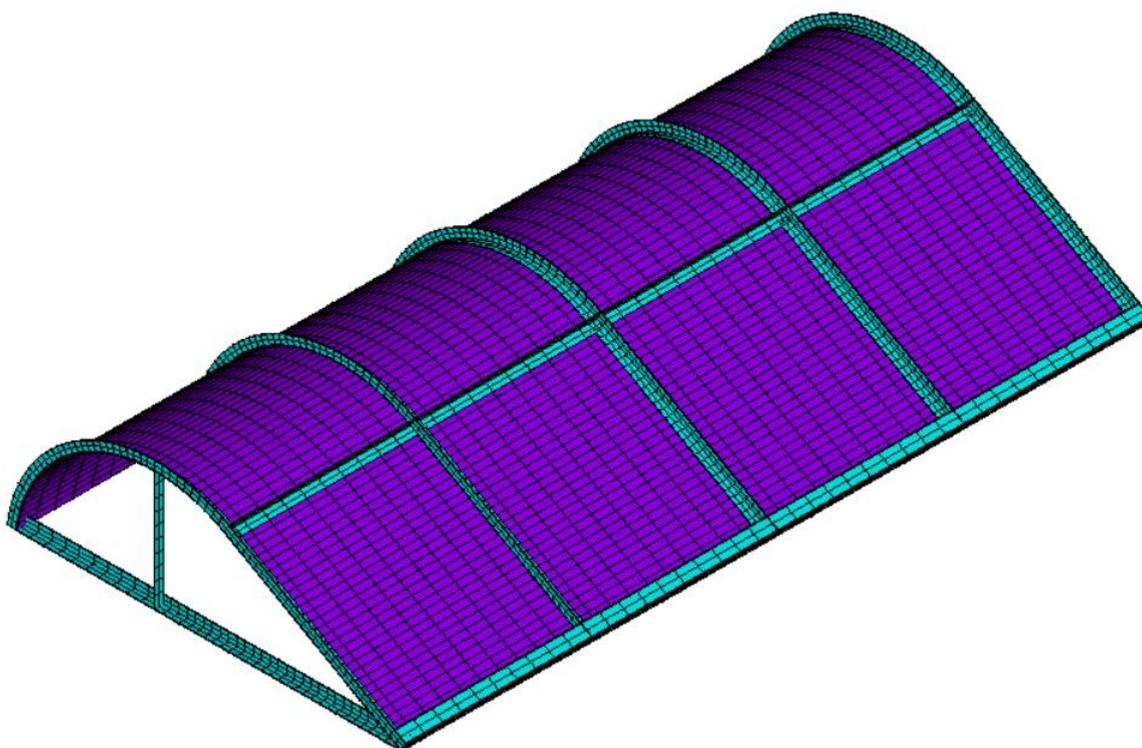


Рис. 33. Полная КЭ модель кожуха

#### Подготовка расчетной модели

29. В разделе *Loads* Препроцессора закрепить крайние точки опорного контура конструкции: КР1 и КР16 (см. рис. 29) в трех направлениях  $UX=UY=UZ=0$ ; КР5 и КР20 только в вертикальном направлении  $UY=0$ .

30. В разделе *Loads* Препроцессора задать нагружение конструкции собственным весом: *Loads\Define Loads\Apply\Structural\Inertia\Gravity\Global*  $\rightarrow Y-comp = 9.81$  (м/с<sup>2</sup>). Сохранить БД.

#### Выполнение анализа и обработка результатов

31. Запустить структурный анализ. По завершении расчета выполнить считывание результатов в Постпроцессоре (*Last Set*).

32. Отобразить и включить в отчет поля вертикальных перемещений  $UY$  и полных перемещений  $USUM$ .

33. Отобразить и включить в отчет поля эквивалентных напряжений по фон Мизесу: а) узловое представление; б) элементное представление. Сравнить максимальные напряжения для двух вариантов.

34. Выбрать стержневые элементы (тип 1): *Select Entities\Elements\By Attributes\Elem type num\Min,Max,Inc = 1,1,1*  $\rightarrow OK$ ; выполнить действия п. 33.

35. Выбрать оболочечные элементы (тип 2); выполнить действия п. 33.

36. Выйти без сохранения.

## **5. Контрольные вопросы**

1. Какие геометрические объекты могут быть разбиты стержневыми КЭ? Какой тип у этих элементов?
2. Какие средства предназначены для настройки геометрических параметров стержневых КЭ?
3. Какие геометрические объекты могут быть разбиты оболочечными КЭ? Какой тип у этих элементов?
4. Какие средства предназначены для настройки геометрических параметров оболочечных КЭ?
5. Каким образом добиться реалистичной видимости стержневых и оболочечных элементов в составе КЭ модели?

## **Библиографический список**

1. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров: справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – Москва: Машиностроение, 2004. – 511 с.
2. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – Москва: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
3. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство / под ред. А. К. Любимов. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006. – 227 с.
4. Елисеев, К. В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах: учеб. пособие / К. В. Елисеев, Т. В. Зиновьева. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 112 с.
5. Черепашков, А. А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении: учеб. / А. А. Черепашков, Н. В. Носов. – Волгоград: ИН-ФОЛИО, 2009. – 591 с.

Образец оформления титульного листа отчета о лабораторных работах

Федеральное агентство по рыболовству  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»  
Институт агроинженерии и пищевых систем  
Кафедра инжиниринга технологического оборудования



Лабораторные работы по дисциплине  
«Компьютерные технологии в машиностроении»

ЛР.32.15.04.01.ПЗ

Студент группы -ОЗМС \_\_\_\_\_

Руководитель \_\_\_\_\_ доц. Сукиасов В.Г.

Калининград 20\_\_

Локальный электронный методический материал

Владимир Георгиевич Сукиасов

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 3,0. Печ. л. 2,7.

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет».  
230022, Калининград, Советский проспект, 1