

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 направлению  
подготовки 15.04.01 Машиностроение  
Часть 2

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2024

РЕЦЕНЗЕНТ

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания  
ФГБОУ ВО «КГТУ» М. Н. Альшевская

Сукиасов, В. Г.

Компьютерные технологии в машиностроении: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение. Ч. 2 / В.Г. Сукиасов. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. – 59 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. 2, рис. 44, список лит. – 5 наименований

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 20 февраля 2024 г., протокол № 5

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию в качестве электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 20 мая 2024 г., протокол № 5

УДК 004:94

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2024 г.  
© Сукиасов В. Г., 2024 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
Лабораторная работа № 7 «Численное решение конструктивно нелинейной контактной задачи» .....	7
Лабораторная работа № 8 «Анализ термоупругого деформирования тройника трубопроводной арматуры» .....	17
Лабораторная работа № 9 «Анализ колебаний стержневой конструкции» .....	25
Лабораторная работа № 10 «Основы работы на платформе Ansys Workbench» .....	32
Лабораторная работа № 11 «Анализ течения потока жидкости в канале» .....	39
Лабораторная работа № 12 «Анализ обтекания билборда воздушным потоком» .....	45
Библиографический список .....	57
Приложение. Образец оформления титульного листа отчета о лабораторных работах .....	58

## 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 допуск к экзамену. Студенты, не имевшие пропусков занятий в течение 3-го семестра, самостоятельно выполнившие и оформившие все лабораторные работы, а также успешно прошедшие тестирование в ЭИОС, получают экзаменационную оценку «отлично» автоматически.

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

Для студентов очной и очно-заочной форм обучения предусмотрено выполнение двенадцати лабораторных работ – по шесть во 2 и 3-м семестрах. В данном пособии представлены методические материалы к лабораторным работам, выполняемым в 3-м семестре. 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 № 7***

#### **Численное решение конструктивно нелинейной контактной задачи**

**Цель работы:** Получение практических умений и навыков построения КЭ моделей и методики выполнения структурного анализа.

#### **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.

#### **План проведения занятия**

1. Построение геометрической модели средствами внешней CAD-системы.
2. Передача модели в Ansys и первичная обработка в Препроцессоре.
3. Задание свойств материала, построение КЭ модели.
4. Создание контактных пар, задание нагрузки.
5. Настройка параметров вычислительного процесса.
6. Выполнение анализа. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.

#### **Порядок выполнения работы**

Построение геометрической модели ролика и опорной конструкции

1. Запустить КОМПАС-3D, подтвердить наличие лицензии.

2. Построить параметрическую модель ролика в виде симметричного элемента вращения (рисунок 1), эскиз сечения разместить в плоскости  $yz$ .

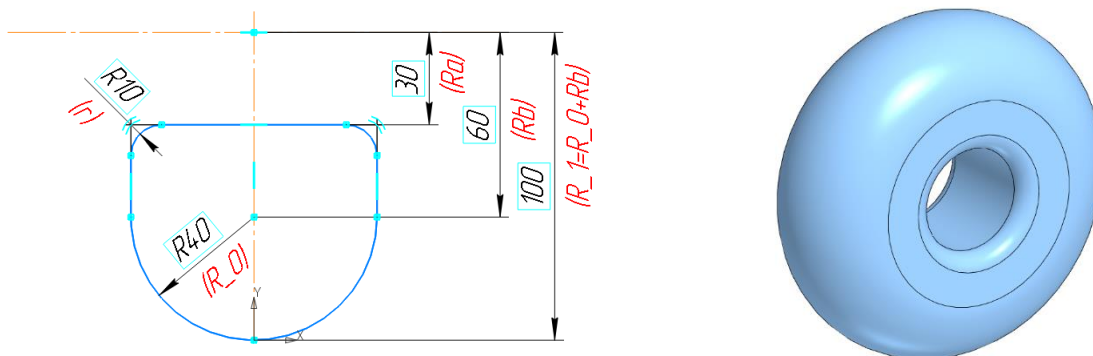


Рисунок 1 – Модель ролика в соответствии с п. 2

3. Построить параметрическую модель опорной конструкции (рисунок 2) в виде элемента выдавливания в обе стороны на 40мм, симметрично от плоскости  $yz$ .

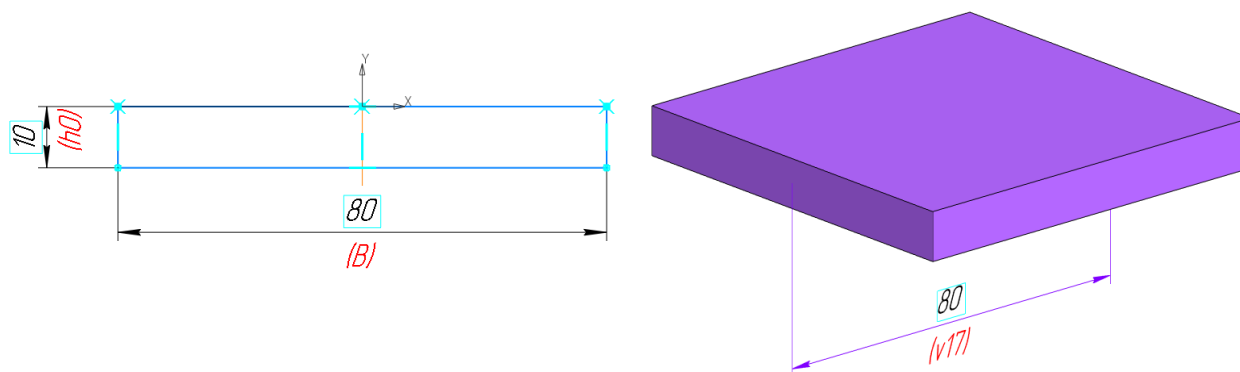


Рисунок 2 – Модель опоры в соответствии с п. 3

4. Создать сборку из построенных деталей (рисунок 3), при этом совместить начало координат опоры и начало координат сборки (*Совпадение*), зафиксировать опору. Для ролика установить совпадение координатных плоскостей  $zx$  и  $zy$  с соответствующими плоскостями опоры. Для координатной плоскости  $xu$  ролика и верхней горизонтальной поверхности опоры установить сопряжение *На расстоянии*, назначить расстояние 0. Включить в отчет изображение сборки.



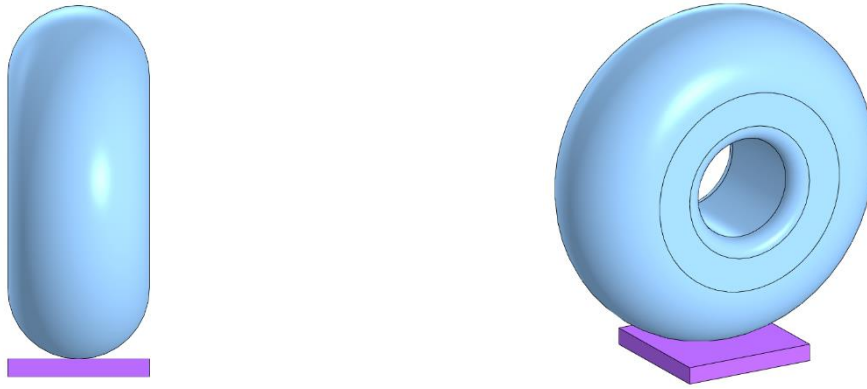


Рисунок 3 – Модель сборки в соответствии с п. 4

5. Экспортировать модель сборки в формат *Parasolid (\*.x\_t)*, в имени файла не использовать символы кириллицы, сохранить файл в рабочей директории Ansys.

#### Импорт и обработка геометрической модели в ПК Ansys

6. Открыть задание с новым именем. Включить нумерацию геометрических объектов *Colors only*.

7. Импортировать модель в формате *Parasolid: File\Import\PARA...*; на панели управления (рисунок 4) в выпадающем списке *Geometry Type*: оставить по умолчанию *Solids Only*.

8. Настроить способ отображения модели: *PlotCtrls\Style\Solid Model Facets... → Normal faceting → OK*.

9. Выбрать все. Последовательно удалить поверхности, линии (то и другое с нижестоящими объектами) и ключевые точки. При появлении диагностики подтвердить клавишей *Proceed*.

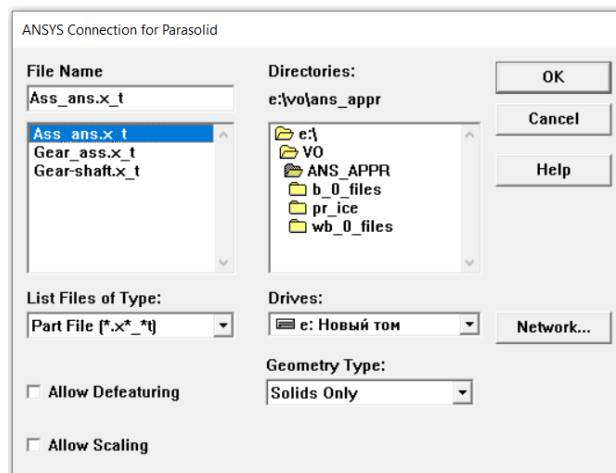


Рисунок 4 – Панель импорта геометрической модели в Ansys

10. Выбрать все. Назначить отображение нумерации геометрических объектов *Colors only*. Отобразить объемы, включить изображение в отчет. Сохранить БД. Скопировать из текстового файла *Global Status* и включить в отчет данные *Solid model summary* о параметрах геометрической модели.

11. Повернуть модель на  $90^{\circ}$  вокруг оси *X*: рабочую плоскость совместить с глобальной системой, затем повернуть на  $45^{\circ}$  вокруг *X* по часовой стрелке; активную систему координат совместить с рабочей плоскостью; зеркально отразить все объемы (без копирования) относительно плоскости *XZ*.

12. Вернуть рабочую плоскость и активную систему координат к глобальной декартовой.

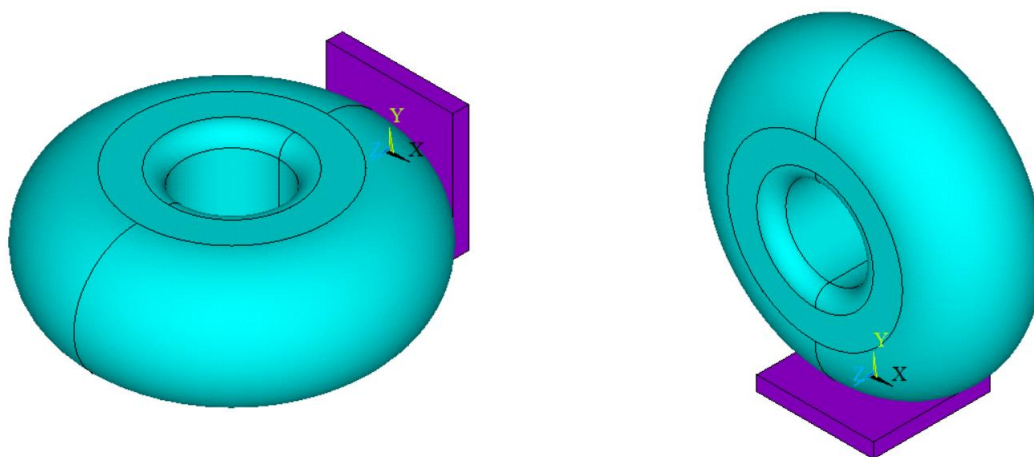


Рисунок 5 – Объемы после импорта и после поворота

#### Построение КЭ модели ролика и опорной поверхности

13. Разрезать модель вертикальной плоскостью симметрии *XY*: *Modeling\Operate\Booleans\Divide\Volu by WrkPlane* → *Pick All*. Повторить операцию с плоскостью *ZY*, предварительно повернув рабочую плоскость на  $90^{\circ}$  вокруг оси *Y*. Удалить объемы, оставив четверть модели, как показано на рисунке 6. Сохранить БД.

14. Создать 3 точки посреди трех дуг: *L10*, *L52* и *L48* (рисунок 6).

15. Сориентировать рабочую плоскость по трем созданным точкам и разрезать этой плоскостью объем ролика.

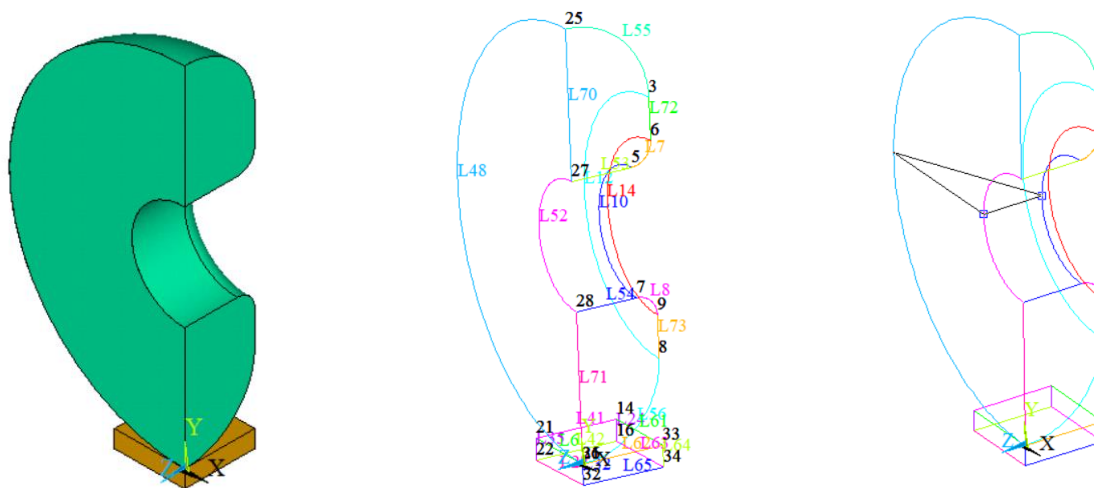


Рисунок 6 – Операции с объемами и с линиями

16. Вернуть рабочую плоскость к глобальной декартовой системе координат. Сжать нумерацию всех объектов. Сохранить БД. Изображение модели включить в отчет.

17. Выбрать и добавить в задание тип КЭ: двадцатиузловой шестигранник *Solid186*.

18. Задать свойства упругих изотропных материалов: 1)  $E = 2 \cdot 10^{11}$ (Па),  $\nu = 0.3$ ; 2)  $E = 1 \cdot 10^{10}$ (Па),  $\nu = 0.4$ . Сохранить БД.

19. Выделить объем опоры и относящиеся к нему поверхности и линии. На панели *Mesh Tool* назначить материал номер 1.

20. Указать число разбиений на КЭ для линий: 3 для вертикальных ребер и 10 для остальных, при этом установить пятикратное сгущение (*Spacing ratio* 0.2 или 5; при необходимости скорректировать после визуального контроля) для горизонтальных линий вблизи плоскостей симметрии. Выполнить упорядоченное разбиение объема на КЭ методом *mapped*.

21. Выделить два объема ролика и относящиеся к ним поверхности и линии. Назначить материал номер 2.

22. Указать число разбиений на КЭ для линий: 20 для пяти дуг окружного направления нижнего объема, в том числе для двух дуг, относящихся к торообразной поверхности, – с пятикратным сгущением (*Spacing ratio* 5) вблизи плоскости симметрии  $X=0$ ; 12 для пяти дуг окружного направления верхнего объема (равномерно); в каждом из трех поперечных сечений четвертой тора – большая дуга на 12 частей с пятикратным сгущением (*Spacing ratio* 0.2) вблизи плоскости симметрии  $Z=0$ , прямой отрезок в плоскости  $Z=0$  на 18 частей с двукратным сгущением (*Spacing ratio* 2 или 0.5) вблизи наружной дуги тора, дуга скругле-

ния на 3 части равномерно, примыкающие к скруглению прямые отрезки на 3 и на 8 частей (рисунок 7) равномерно.

23. Выполнить упорядоченное разбиение на КЭ объемов ролика, применив метод *sweep*.

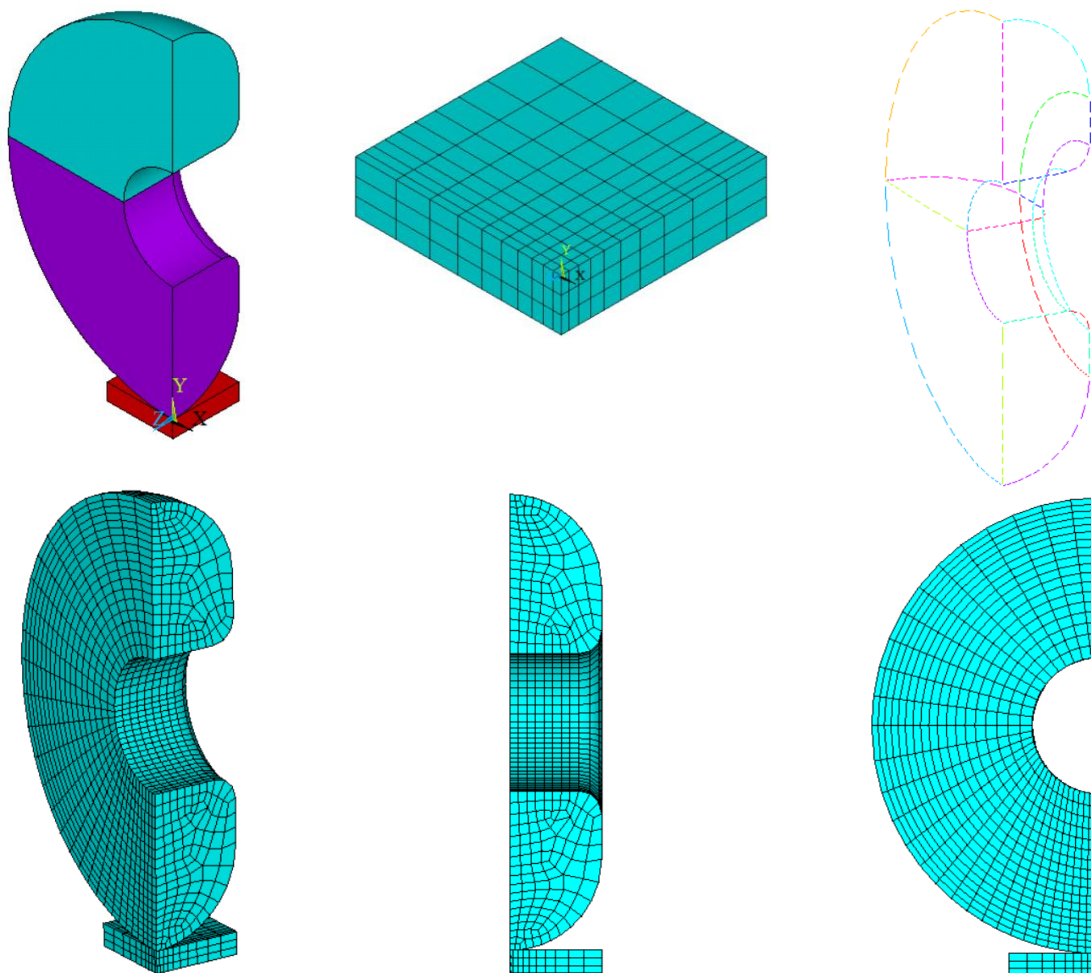


Рисунок 7 – Результаты операций согласно пп. 15 и 19–22

24. Выбрать все. Проверить качество КЭ сетки: *Preprocessor\Meshing\Check Mesh\Individual Elm>Select Warning/Error Elements*. Убедиться в отсутствии КЭ с ошибками и предупреждениями.

25. Выбрать все. Сохранить БД. Изображение КЭ модели включить в отчет.

#### Подготовка расчетной схемы для решения контактной задачи

26. Отобразить поверхности. Находясь в *Препроцессоре*, создать контактную пару с помощью *Менеджера контактных пар*, доступ к которому показан на рисунке 8.

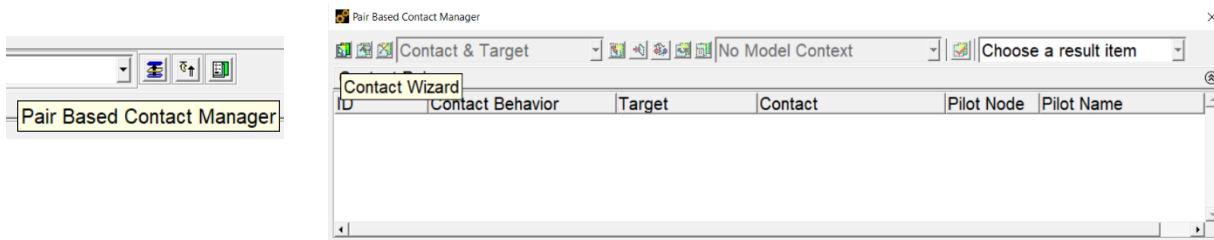


Рисунок 8 – Начало взаимодействия с *Менеджером контактных пар*

26.1. Включить интерактивного помощника *Contact Wizard* (рисунок 9) и после нажатия кнопки *Pick Target...* указать целевую поверхность *Target* – верхнюю горизонтальную поверхность опоры.

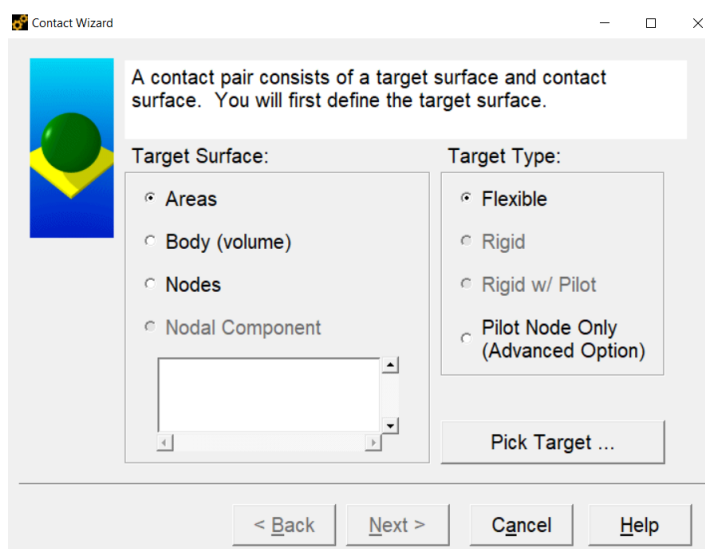


Рисунок 9 – Панель *Contact Wizard*

26.2. Нажав кнопки *Next* и *Pick Contact...*, указать контактную поверхность *Conta* – торообразную поверхность нижней части ролика; тип элементов – поверхность к поверхности.

26.3. Нажав кнопку *Next*, указать коэффициент трения 0.3; материал 2.

26.4. Подтвердить создание контактной пары кнопкой *Create*. Завершить операцию кнопкой *Finish*.

26.5. Отобразить контактные элементы, включить изображение в отчет.

27. Выбрать все. Сохранить БД. Открыть список *List\Properties\Element Types*. Скопировать и включить в отчет информацию о типах КЭ.

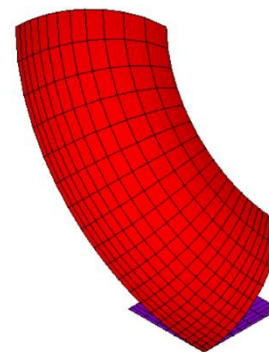
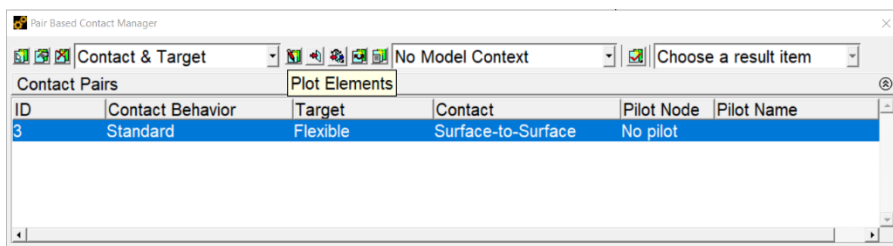


Рисунок 10 – Результат создания контактной пары согласно п. 26

28. Задать условия симметрии: *Loads\Define Loads\Apply\Structural\Displacement\Symmetry B.C.\On Areas* → указать все вертикальные поверхности в плоскостях  $X=0$  и  $Z=0$  → ОК.

29. Закрепить нижнюю горизонтальную поверхность опоры в вертикальном направлении. Для этого выбрать узлы, принадлежащие данной поверхности, и назначить для них ограничение  $U_y = 0$ .

30. На цилиндрической поверхности нижней части ролика задать давление  $1 \cdot 10^6$  (Па). Эта нагрузка дает суммарную вертикальную силу 900Н на  $\frac{1}{4}$  ролика или 3600Н на весь ролик.

31. Выбрать все. Сохранить БД.

### Выполнение расчетов и отображение результатов

32. Запустить задачу на выполнение. На запрос системы о продолжении при наличии диагностических предупреждений ответить утвердительно.

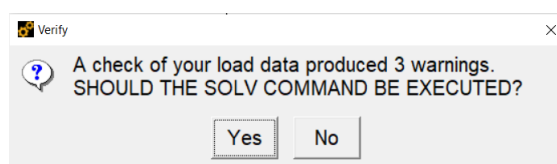
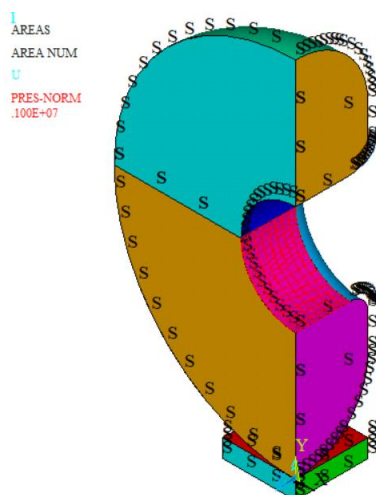


Рисунок 11 – Модель с заданными нагрузками и диалоговое окно перед началом расчета

33. По окончании расчета перейти в Постпроцессор и выполнить считывание результатов: *Read Results\Last Set*.

34. Открыть список *List Results\Reaction Solu\All struc force F* и скопировать в отчет данные TOTAL VALUES.

35. Выбрать объем опоры и относящиеся к нему элементы; выбрать узлы, относящиеся к элементам. Отобразить в изометрии и включить в отчет поля вертикальных перемещений (вдоль  $Y$ ) и эквивалентных напряжений по фон Мизесу.

36. Выбрать объем нижней половины ролика и относящиеся к нему элементы; выбрать узлы, относящиеся к элементам. Отобразить в наиболее наглядном ракурсе и включить в отчет поля вертикальных перемещений (вдоль  $Y$ ) и эквивалентных напряжений по фон Мизесу.

37. Выбрать все, отобразить элементы. Показать объект целиком путем отражения модели от двух плоскостей симметрии: *PlotCtrls\Style\Symmetry Expansion\User Specified Expansion...*, на панели *Expansion by values* поля ввода и выпадающие списки настроить согласно рисунка 12 → ОК.

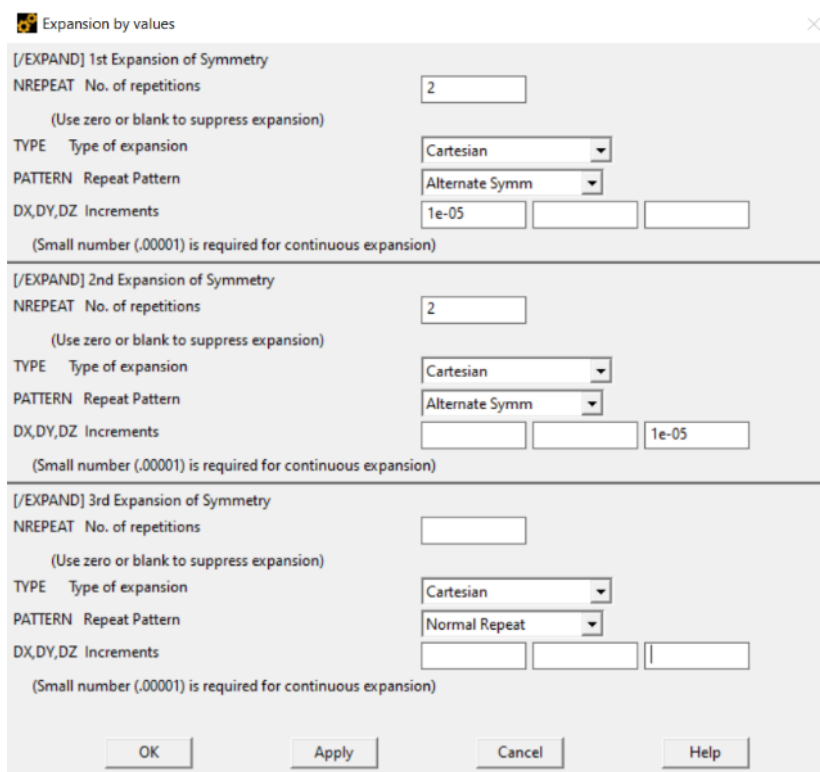


Рисунок 12 – Панель управления отображением симметричной модели

38. Выбрать элементы типа *Conta* по атрибутам, указав соответствующий номер типа элементов (см. список п. 27). Отобразить на виде сверху и включить

в отчет поля контактного давления, контактного статуса, а также внедрения контактирующих объектов (*Contact penetration*).

39. Выбрать все. Вернуться к отображению модели в виде  $\frac{1}{4}$  объекта: *PlotCtrls\Style\Symmetry Expansion\No Expansion...*; обновить изображение.

40. Перейти в *Препроцессор* и задать свойства нового упругого изотропного материала 3:  $E = 1 \cdot 10^9$ (Па),  $\nu = 0.4$ .

41. Выбрать два объема ролика и относящиеся к ним КЭ. Изменить свойства материала ролика, указав номер новой модели: *Material Props\Change Mat Num*.

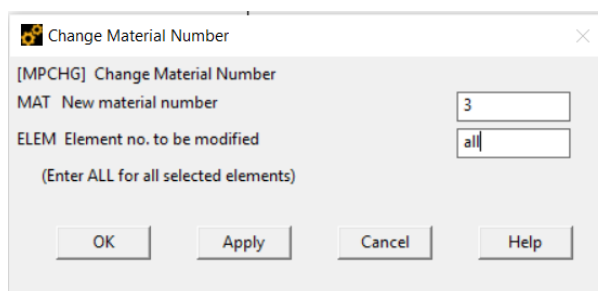


Рисунок 13 – Панель управления моделью материала для выбранных КЭ

42. В разделе *Properties Менеджера контактных пар* открыть вкладку *Friction*, где выбрать материал 3 и ввести коэффициент трения 0.3.

43. Выбрать все. Выполнить действия пп. 32–38.

44. Сравнить размеры зоны контакта и максимальное контактное давление для двух моделей материала ролика.

45. Выйти без сохранения.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит конструктивная нелинейность контактной задачи?
2. Какие элементы должны присутствовать в модели при решении контактной задачи?
3. Какие есть инструментальные средства создания и настройки контактных пар?
4. Каким образом отобразить и сохранить в виде графических файлов распределения контактного статуса и контактного давления?



## Лабораторная работа № 8

### Анализ термоупругого деформирования тройника трубопроводной арматуры

**Цель работы:** Получение практических умений и навыков построения КЭ моделей, подготовки и выполнения анализа.

#### Задачи работы

1. Совершенствование навыков геометрического моделирования снизу-вверх и КЭ дискретизации моделей.
2. Освоение методики подготовки и выполнения термического анализа.
3. Выполнение структурного анализа на основе рассчитанных температурных полей и постпроцессинг результатов.

#### План проведения занятия


1. Построение геометрической модели объекта исследования.
2. Назначение теплофизических свойств материала, формирование КЭ модели.
3. Задание условий теплообмена. Настройка параметров вычислительного процесса.
4. Выполнение термического анализа. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.
5. Трансформация термических КЭ в структурные. Импорт результатов термического анализа. Подготовка расчетной модели для решения термоупругой задачи. Управление шагами по нагрузке.
6. Выполнение структурного анализа. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.

#### Порядок выполнения работы

1. Открыть задание с новым именем. Перейти в режим *Reverse Video*, включить нумерацию геометрических объектов *Colors only*.

#### Построение геометрической модели тройника трубопроводной арматуры

2. Включить изометрический режим отображения *Isometric View*. Создать сплошной цилиндр по размерам (в метрах): *Preprocessor\Modeling\Create\Volumes\Cylinder\By Dimensions* → радиус 0.05, длина в пределах  $-0.2 \leq Z \leq 0.2$ . Аналогичным образом создать соосный цилиндр такой же длины и радиуса 0.036.

3. Повернуть рабочую плоскость  $WP$  на  $90^\circ$  вокруг  $X$  по часовой стрелке (кнопка  на панели *Offset WP*): *WorkPlane\Offset WP by Increments....* Создать сплошной цилиндр *Preprocessor\Modeling\Create\Volumes\Cylinder\Solid Cylinder* с центром  $WPX = WPY = 0$ , радиус 0.04, глубина 0.2. Создать соосный цилиндр такой же длины и радиуса 0.03. Совместить  $WP$  с глобальной декартовой системой. Сохранить БД.

4. Убедиться, что в настройках логических операций *Preprocessor\Modeling\Operate\Booleans\Settings* не выбрано сохранение исходных объектов. Выполнить операцию слияния объемов *Add* для цилиндров радиусов 0.05 и 0.04. Аналогичным образом объединить два цилиндра радиусов 0.036 и 0.03.

5. Вычесть из большего объема меньший операцией *Subtract*. Сохранить БД.

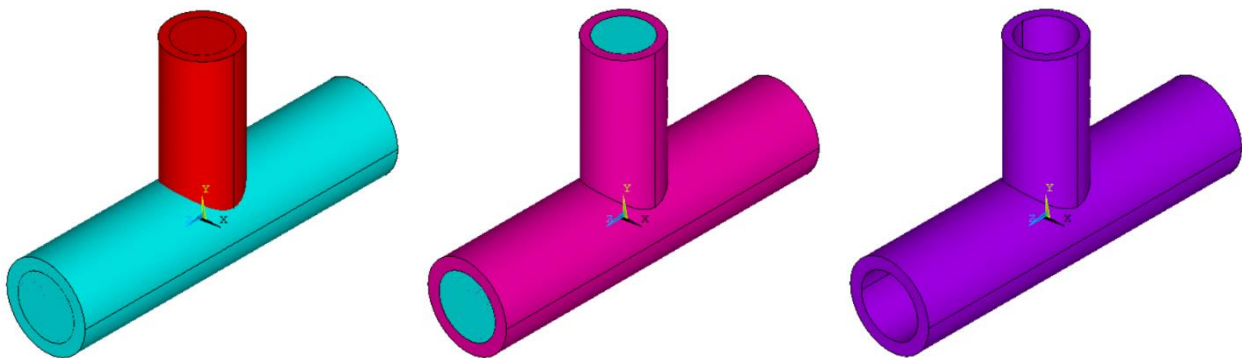


Рисунок 14 – Результаты выполнения пп. 3–5

6. Разрезать объем рабочей плоскостью: *Preprocessor\Modeling\Operate\Booleans\Divide\Volu by WrkPlane → Pick All*. Удалить образовавшийся объем в зоне  $Z > 0$ .

7. Повернуть  $WP$  на  $90^\circ$  против часовой стрелки вокруг  $Y$  и разрезать модель. Вернуть  $WP$  в исходное положение. Удалить объем в зоне  $X > 0$ .

8. Выбрать все. Сжать нумерацию всех объектов. Сохранить БД. Полученная модель имитирует  $\frac{1}{4}$  тройника с учетом двух плоскостей симметрии.

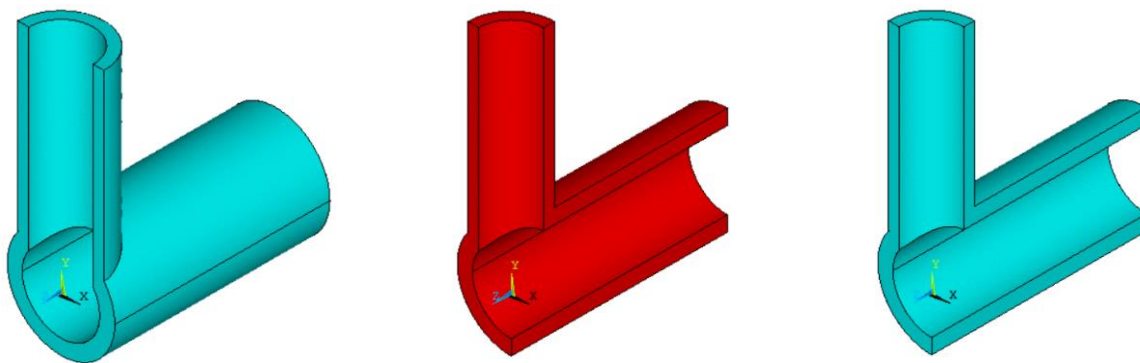


Рисунок 15 – Результаты выполнения пп. 6–8

### Создание КЭ модели тройника

9. Добавить в задание термический тетраэдральный десятиузловой КЭ *SOLID87*.

10. Назначить необходимые для анализа стационарной теплопроводности свойства изотропного материала 1: коэффициент теплопроводности  $KXX = 50$  ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ). Сохранить БД.

11. На панели *MeshTool* в списке *Global* секции *Element Attributes*: подтвердить тип КЭ и номер материала; в секции *Size* назначить для всех линий разбиение на КЭ с размером ребра 0.004.

12. Выполнить свободное разбиение объема на КЭ. Проверить качество полученной КЭ модели: *Preprocessor\Meshing\Check Mesh\Individual Elm>Select Warning/Error Elements* → *OK*. Выбор 0 КЭ с предупреждениями/ошибками подтверждает отсутствие дефектов.

13. Выбрать все. Сохранить БД. Изображения объема, поверхностей и КЭ модели включить в отчет. Скопировать из списка *Global Status* информацию о КЭ модели *Finite element model summary* и включить в отчет.

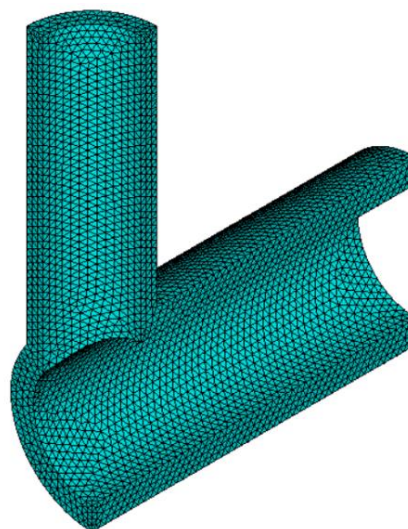
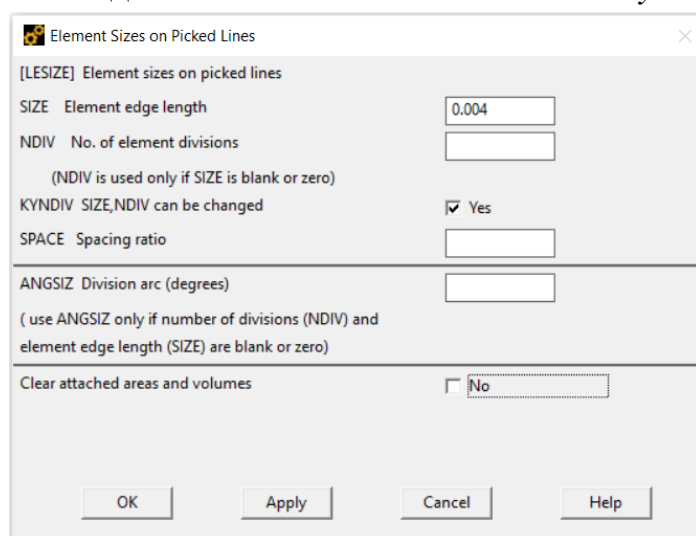


Рисунок 16 – Построение КЭ модели согласно пп. 11–12

### Подготовка расчетной модели для стационарного термического анализа

14. В разделе *Loads* Препроцессора назначить тип анализа *Steady-State*.

15. Выбрать и отобразить внутренние цилиндрические поверхности (3 шт.). Задать условия конвективного теплообмена: коэффициент теплоотдачи 400 ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ ), температура среды  $90^{\circ}$ .

16. Выбрать и отобразить наружные цилиндрические поверхности (3 шт.). Задать условия конвективного теплообмена: коэффициент теплоотдачи 20 ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ ), температура среды  $25^{\circ}$ .

17. Выбрать все. Сохранить БД. Отобразить поверхности и включить в отчет.

### Выполнение стационарного анализа и просмотр результатов

18. Запустить решение задачи. По окончании перейти в Постпроцессор, выполнить считывание результатов последнего шага. Отобразить и включить в отчет температурное поле модели, а также компоненты температурного градиента, выбрав соответствующие категории на панели *General Postproc\Plot Results\Contour Plot\Nodal Solu*.

19. Выйти без сохранения. В рабочей директории переименовать файл результатов \*.rth.

### Подготовка расчетной модели для нестационарного анализа

20. Открыть БД п.17. В Препроцессоре открыть модель материала 1 и добавить необходимые теплофизические свойства: плотность  $7800$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ), удельная теплоемкость  $500$  ( $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ).

21. В разделе *Loads* Препроцессора назначить тип анализа *Transient\Full*.

22. В подразделе *Loads\Define Loads\Settings* задать начальное условие в виде однородного температурного поля *Uniform Temp*, а также отсчетную температуру *Reference Temp* для подсчета термических деформаций; то и другое  $25^{\circ}$ .

23. Назначить параметры вычислительного процесса (рисунок 17) на вкладке *Basic* панели *Solution\Analysis Type\Sol'n Controls*: длительность процесса *Time at end of loadstep* = 3600 (с); число подшагов – 12; фиксация всех расчетных величин – на каждом подшаге → ОК. На вкладке *Transient* убедиться, что нагрузка прикладывается целиком в начале процесса (радиокнопка *Stepped loading*). Выбрать все. Сохранить БД.

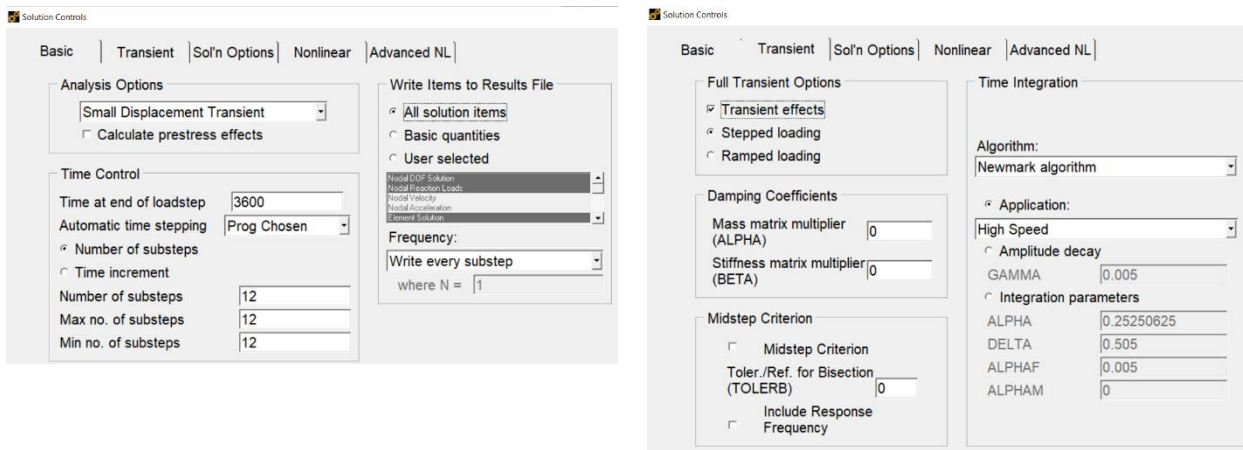


Рисунок 17 – Настройка параметров вычислительного процесса согласно п. 23

### Выполнение нестационарного анализа и просмотр результатов

24. Запустить решение задачи. По окончании перейти в Постпроцессор. Скопировать и внести в отчет информацию с панели *Results Summary*.

25. На панели *Read Results\By Pick* выполнить считывание результатов для момента времени 300 с. Отобразить и включить в отчет температурное поле. Подобным образом отобразить и включить в отчет температурное поле для моментов времени 900 с и 3600 с. Последний результат сравнить с установившимся температурным полем п. 18.

26. Проследить изменение расчетных величин во времени с помощью функций панели *Results Viewer* (рисунок 18). Сохранить и включить в расчет распределения температуры, а также  $x$ -компонент температурного градиента и теплового потока для момента времени 1000 с.

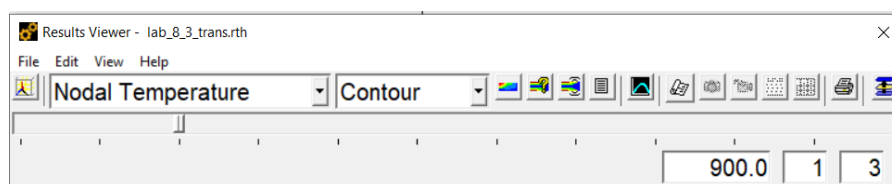


Рисунок 18 – Панель *Results Viewer*

27. Там же посредством кнопки *Time-History Variable Viewer* построить зависимость от времени температуры одного из узлов модели. Для этого на всплывающей панели *Time History Variables* добавить кнопкой  $\oplus$  *Add Data* соответствующую величину в перечень переменных *Variable List*, указав номер узла, после чего вывести график кнопкой *Graph Data*. Изображение включить в отчет. Выйти без сохранения.

### Подготовка расчетной модели для термоупругого анализа

28. Открыть с новым именем БД п. 23. В модель изотропного материала 1 добавить необходимые механические свойства: модуль упругости  $E_X=2e+11$  (Па); коэффициент Пуассона  $PRXY=0.3$ ; коэффициент температурного расширения  $ALPX=1.2e-05$  ( $K^{-1}$ ), отсчетная температура  $25^0$ . Сохранить БД.

29. Преобразовать термические КЭ в структурные: *Preprocessor\Element Type\Switch Elem Type*. Убедиться, что в списке *List\Properties\Element Types* указан тип КЭ *SOLID187*.

30. Удалить все данные о нагружении модели: *Loads\Define Loads\Delete\All Loads&Opts*. Назначить тип анализа *Static*.

31. Для трех поверхностей в плоскостях  $Z=0$  и  $X=0$  задать условия симметрии. Проверить результат в списке *List\Loads\DOF Constraints\On All Areas*. В случае отсутствия эффекта выбрать принадлежащие поверхностям узлы и для них задать условия симметрии.

32. На торцах горизонтального и вертикального патрубков задать отсутствие осевых перемещений ( $UZ=0$  и  $UY=0$  соответственно), что имитирует состояние плоской деформации длинных цилиндров. Если не достигается эффект для поверхностей, задать ограничения в узлах подобно п. 31.

33. Добавить внутреннее давление  $5e+06$  (Па) на соответствующих поверхностях (см. п. 15). Выбрать все. Сохранить БД.

34. Задать нагрузку в виде температурного поля, полученного в результате нестационарного термического анализа п. 24: *Loads\Define Loads\Apply\Structural\Temperature\From Therm Analy*. На открывшейся панели (рисунок 19) выбрать посредством браузера соответствующий файл *\*.rth*, а также указать необходимый момент времени.

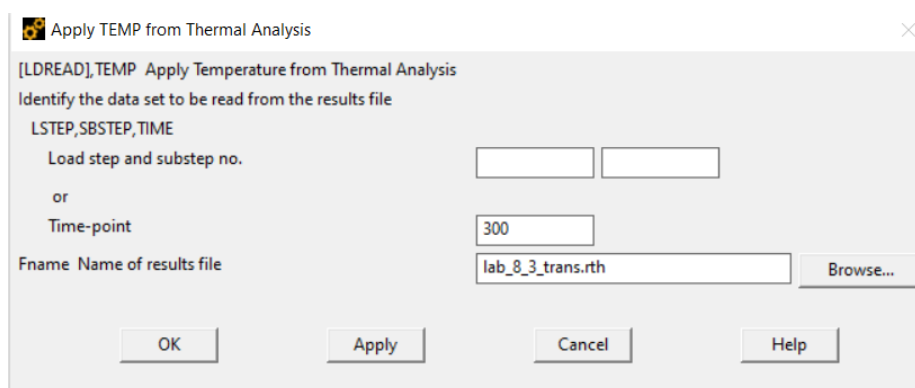


Рисунок 19 – Панель задания температурной нагрузки по результатам термического анализа

### Выполнение термоупругого анализа и просмотр результатов

35. Запустить решение задачи. По окончании перейти в Постпроцессор и выполнить считывание последнего набора результатов. Отобразить и включить в отчет поля полных перемещений и эквивалентных напряжений по фон Мизесу, при этом указать расчетный момент времени.

### Выполнение серии расчетов термоупругого деформирования тройника циклом по времени

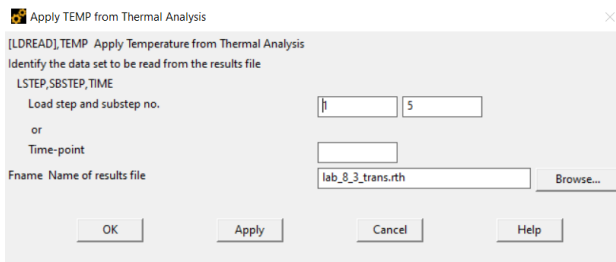
36. В командной строке ввести: ! <<<<<<<<<< /*после ! любые символы*/, нажать *Enter*. Задать тип анализа *Static*. Задать нагрузку в виде температурного поля, полученного на 5-м подшаге нестационарного термического анализа п. 24: *Loads\Define Loads\Apply\Structural\Temperature\From Therm Analy*. Указать в двух полях *Loadstep and Substep no.* 1 и 5 соответственно, как на рисунке 20, а).

37. На панели *Loads\Load Step Opts\Time/Frequenc\Time and Substeps* ввести расчетный момент времени 1500 (с) и число подшагов 1; выбрать полное приложение нагрузки в начале шага, а также запрет автоматического дробления шага нагружения – радиокнопками *Stepped* и *Off* соответственно, как на рис. 20б).

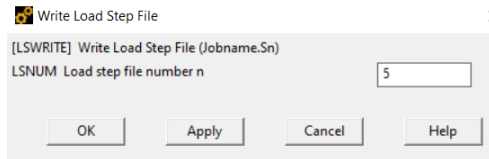
38. На панели *Loads\Load Step Opts\Write LS File* подтвердить кнопкой *OK* запись файла шага по нагрузке с номером 5, как на рисунке 20, в). В командной строке ввести: ! >>>>>>>>>> /*после ! иные символы*/, нажать *Enter*.

39. В меню *List\Files* открыть log-файл и скопировать фрагмент, заключенный между символьными строками.

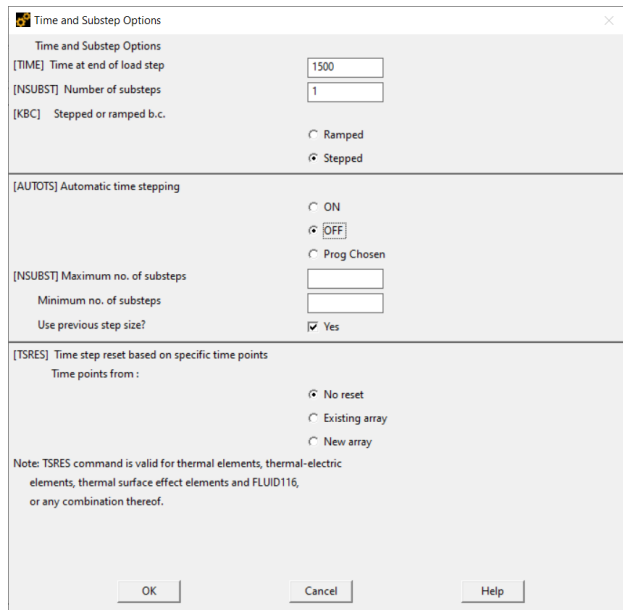
40. Отредактировать в текстовом документе скопированный набор команд, добавив вначале две переменные – величину шага по времени и общее число шагов. Операции считывания результатов термического анализа п. 36, настройки опций п. 37 и записи шага нагружения п. 38 оформить внутри цикла по номеру шага от 1 до общего числа шагов. В командах чтения и записи вместо номера шага 5 указать переменную цикла *i*. Для переменной времени TIME вместо значения 1500 указать *i\*<шаг по времени>*. Примерный вид фрагмента показан ниже.



а)



в)



б)

Рисунок 20 – Управление формированием шага нагружения согласно пп. 36–38

```

dtime=300
num=12
ANTYPE,0
*DO,i,1,num,1
LDREAD,TEMP,1,i,, 'lab_8_3_trans','rth',''
TIME,i*dtime
AUTOTS,0
NSUBST,1,, ,1
KBC,1
TSRES,ERASE
LSWRITE,i,
*ENDDO

```


41. Скопировать отредактированный текстовый фрагмент и, находясь в Препроцессоре, ввести его в командную строку, нажать *Enter*.

42. Запустить решение задачи на основе записанных в файлах шагов по нагрузке: *Solution\From LS Files*. По окончании перейти в Постпроцессор. Скопировать и внести в отчет информацию с панели *Results Summary*.

43. Для просмотра и сохранения результатов использовать панель *Results Viewer*, переход между шагами нагружения – посредством бегунка. Отобразить и включить в отчет поля 1-го главного напряжения для шагов с номерами 1, 3 и 10.

44. Найти узел с наибольшим значением эквивалентного напряжения по фон Мизесу посредством кнопки *Query Results* → *Max*. Простроить и включить в отчет график зависимости от времени эквивалентного напряжения для данного узла (см. п. 27).



45. В режиме отображения продольного разреза тройника *View\Expanded Model\Periodic\Cyclic Symmetry Expansion\Reflect about XY* анимировать кнопкой  *Animate Results\Over Results* суммарное перемещение для интервала шагов 1–6 (рисунок 21). После полного цикла нажать *Stop* на плеере. Для демонстрации использовать кнопку *Next*. Изображение для момента 1200 с включить в отчет. Выйти без сохранения.

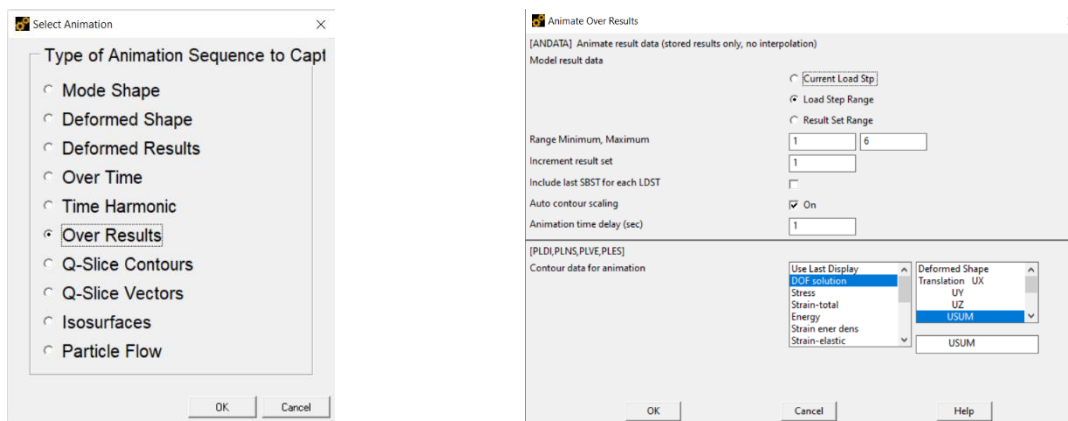


Рисунок 21– Настройка анимации результатов согласно п. 45

### Контрольные вопросы

1. Что является предметом термического анализа?
2. Какие существуют разновидности термического анализа?
3. Какие степени свободы имеются в узлах термических КЭ?
4. Какие свойства материала необходимы для выполнения термического анализа?
5. Какие варианты краевых условий возможны в задачах термического анализа?
6. Какие требуются меры, чтобы использовать результаты термического анализа при выполнении структурного анализа конструкции?

### Лабораторная работа № 9

#### Анализ колебаний стержневой конструкции

**Цель работы:** получение практических умений и навыков построения КЭ моделей, освоение методики постановки и решения динамических задач.

#### Задачи работы

1. Дальнейшая отработка приемов создания КЭ моделей.
2. Освоение методики подготовки и выполнения модального анализа.

3. Освоение методики подготовки и выполнения гармонического анализа.
4. Постпроцессинг результатов.

### План проведения занятия

1. Построение геометрической модели объекта исследования.
2. Назначение механических свойств материала, формирование КЭ модели.
3. Задание краевых условий. Настройка параметров вычислительного процесса.
4. Выполнение модального анализа. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.
5. Подготовка и выполнение модального анализа предварительно напряженной конструкции.
6. Подготовка и выполнение гармонического анализа. Просмотр и сохранение результатов средствами Постпроцессора *POST1*.

### Порядок выполнения работы

1. Открыть задание с новым именем. Перейти в режим *Reverse Video*, включить нумерацию точек и линий *Colors&Numbers*. В ходе разработки модели использовать данные таблицы 1, где первый столбец – номер студента в списке группы. В отчет включить полностью строку таблицы со своим вариантом.

Таблица 1 – Исходные данные для построения модели

№	Sect	W1	W2	W3	t1	t2	t3	$E$	$\rho$
1	С	0.1	0.1	0.06	0.007	0.007	0.01	$2 \cdot 10^{11}$	7800
2	И	0.1	0.07	0.1	0.008	0.008	0.008	$1 \cdot 10^{11}$	8900
3	Л	0.1	0.08	–	0.01	0.014	–	$7 \cdot 10^{10}$	2700
4	С	0.1	0.1	0.1	0.01	0.01	0.008	$1 \cdot 10^{11}$	8900
5	И	0.12	0.06	0.1	0.014	0.014	0.02	$2 \cdot 10^{11}$	7800
6	Л	0.08	0.1	–	0.02	0.01	–	$1 \cdot 10^{11}$	8900
7	С	0.08	0.08	0.1	0.012	0.012	0.01	$7 \cdot 10^{10}$	2700
8	И	0.1	0.08	0.06	0.02	0.02	0.012	$7 \cdot 10^{10}$	2700
9	Л	0.1	0.06	–	0.01	0.01	–	$2 \cdot 10^{11}$	7800
10	С	0.06	0.06	0.1	0.006	0.006	0.012	$1 \cdot 10^{11}$	8900
11	И	0.1	0.08	0.06	0.008	0.008	0.01	$7 \cdot 10^{10}$	2700
12	Л	0.08	0.1	–	0.008	0.01	–	$2 \cdot 10^{11}$	7800
13	С	0.1	0.1	0.08	0.02	0.02	0.014	$7 \cdot 10^{10}$	2700
14	И	0.1	0.1	0.1	0.007	0.007	0.012	$1 \cdot 10^{11}$	8900
15	Л	0.1	0.12	–	0.012	0.02	–	$2 \cdot 10^{11}$	7800

### Построение геометрической модели балки

2. Включить изометрический режим отображения *Isometric View*. Создать 2 точки с *WP*-координатами (0,0) и (1,0) и соединить их прямой линией.

### Построение КЭ модели балки

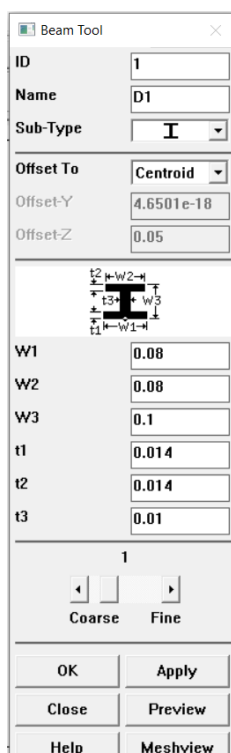
3. С использованием данных таблицы 1 назначить механические свойства линейного изотропного материала: модуль упругости  $E$  (Па); коэффициент Пуассона 0.3. Назначить плотность  $\rho$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ).

4. Добавить в задание трехузловой стержневой КЭ *BEAM189*.

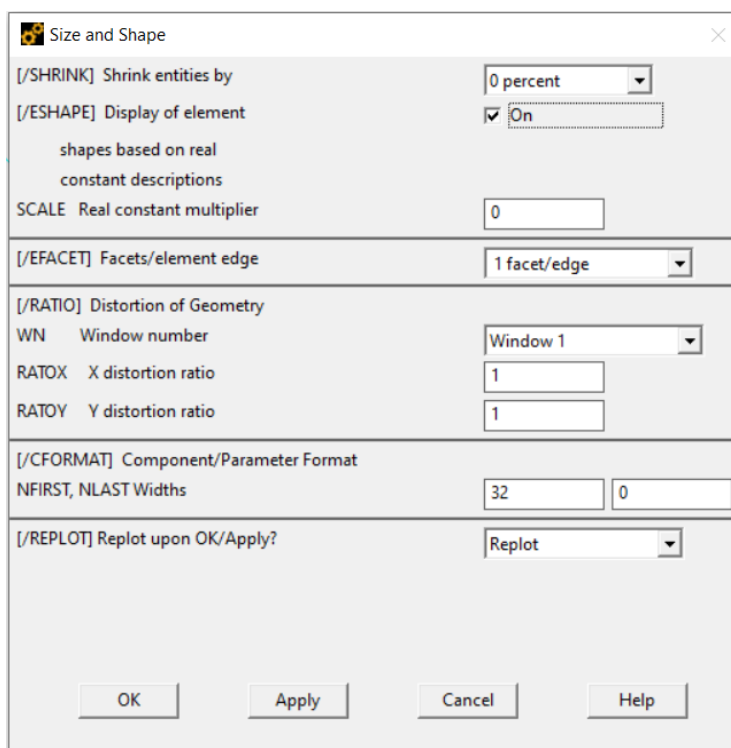
5. В разделе Препроцессора *Sections\Beam\Common sections* настроить размеры поперечного сечения (м) согласно данным таблицы 1. Выбрать бегунком 1-й уровень детальности разбиения сечения (рисунок 22, а). Отобразить сечение кнопкой *Meshview*, сохранить изображение комбинацией *PlotCtrls\Hard Copy\To File* и включить его в отчет.

6. Назначить для линии число делений 20 и выполнить упорядоченное разбиение на КЭ.

7. На панели *PlotCtrls\Style\Size and Shape* включить видимость КЭ (рисунок 22, б).



а)



б)

Рисунок 22 – Настройка сечения (а) и управление отображением (б) стержневых КЭ

8. Обеспечить вертикальную ориентацию профиля, как на рисунке 23, указав при необходимости точку ориентации.

9. Закрепить консольно торец (крайнюю точку) балки  $X=0$ : *All DOF* = 0. Сохранить БД.

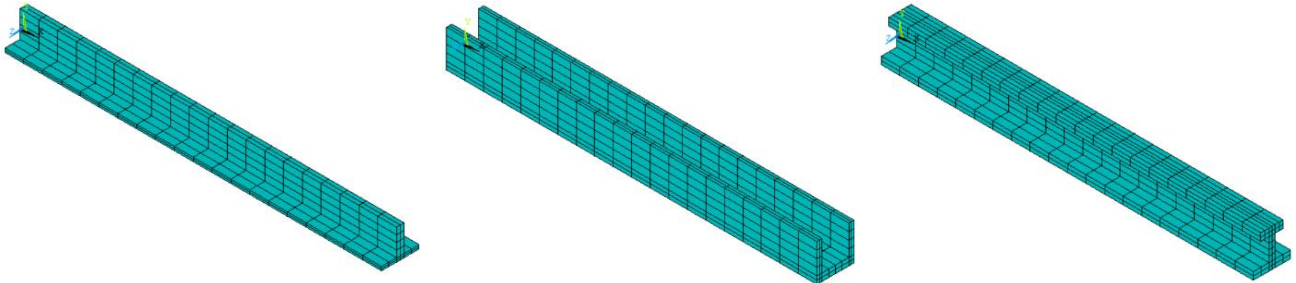


Рисунок 23 – КЭ модель балки

### Подготовка модального анализа

10. В разделе *Loads* Препроцессора выбрать тип анализа *Modal*. На панели *Loads\Analysis Type\Analysis Options* выбрать радиокнопкой метод *Subspace* и указать количество извлекаемых собственных форм; указать диапазон частот от 0 до 10000 (Гц) на всплывающей панели *Subspace Modal Analysis* (рисунок 24).

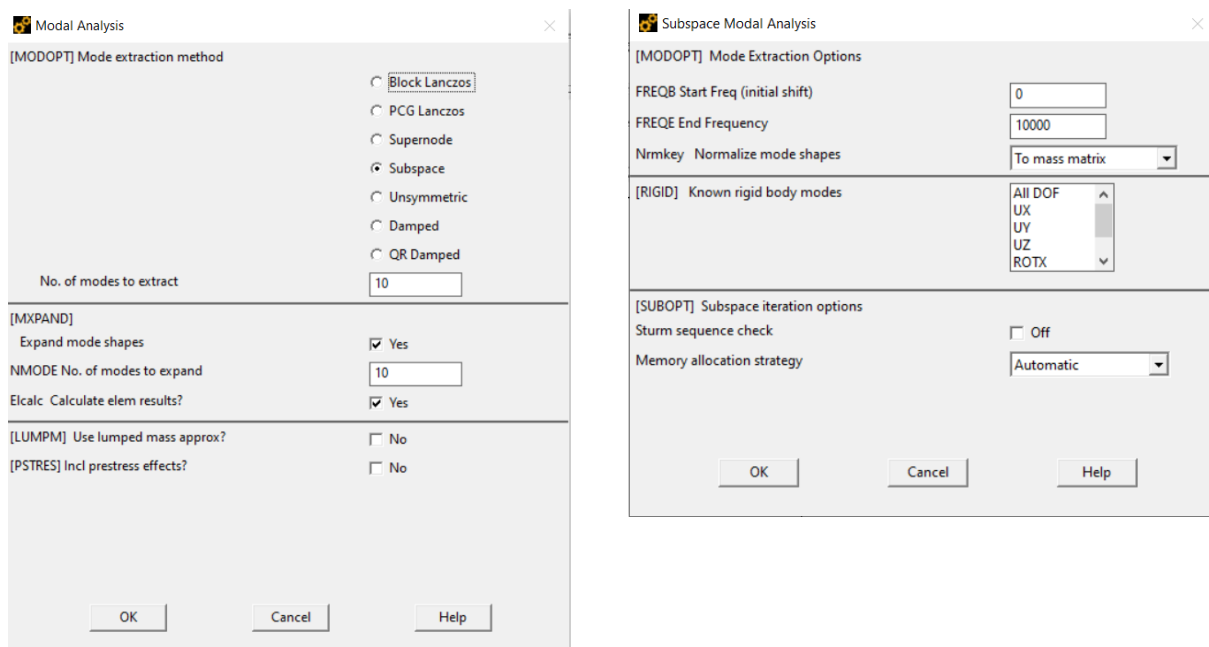


Рисунок 24 – Настройка опций модального анализа

### Выполнение модального анализа и просмотр результатов

11. Запустить анализ. По окончании перейти в Постпроцессор. Скопировать данные списка *Results Summary*. В отчете создать таблицу из двух столбцов и вставить скопированный фрагмент в левый столбец.

12. Средствами панели *Results Viewer* отобразить в аксонометрии и включить в отчет 3, 4, 8-ю и 10-ю формы колебаний (*Displacement vector sum*). Отобразить и включить в отчет 5-ю форму на трех стандартных видах – спереди, сверху, справа. Указать в отчете значения собственных частот, соответствующих изгибным формам колебаний в вертикальной плоскости.

13. Анимировать 6 и 9-ю формы колебаний с настройками по умолчанию. Сохранить файлы анимации.

### Модальный анализ предварительно нагруженной балки

14. В Препроцессоре добавить осевое растяжение, приложив силу  $F_x = 100000$  (Н) на свободном торце  $X=1$  балки\*).

\*) Для функционирующей в КГТУ версии 2021 R2 выполнить п. 14а

14а. Нагрузить крайний узел модели осевой силой посредством ввода в командную строку APDL-кода:

```
ALLSEL,ALL  
FLST,2,1,1,ORDE,1  
FITEM,2,2  
!*  
/GO  
F,P51X,FX,100000
```

15. Выполнить статический анализ балки.

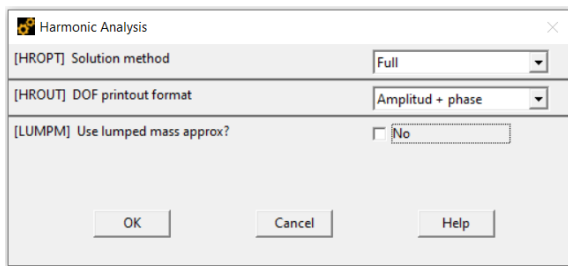
16. Находясь в Препроцессоре, назначить модальный анализ и настроить его опции подобно п. 10, включив при этом учет предварительного нагружения [*PSTRES*].

17. Запустить модальный анализ. По окончании перейти в Постпроцессор. Скопировать и включить в отчет (в правый столбец таблицы) данные списка *Results Summary*. Сравнить собственные частоты балки с полученными ранее в п. 11.

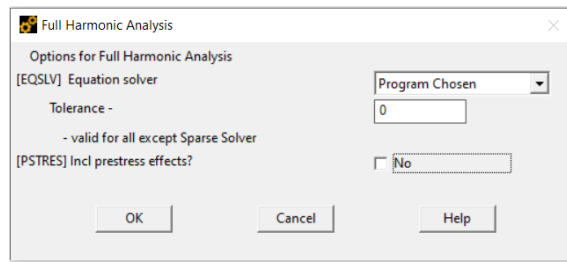
### Подготовка и выполнение гармонического анализа

18. Удалить осевое растяжение п. 14. Назначить гармонический анализ.

19. В разделе Препроцессора *Loads\Analysis Type\Analysis Options* выбрать полный метод решения и формат вывода перемещений на панели *Harmonic Analysis* (рисунок 25, а), затем подтвердить опции по умолчанию на всплывающей панели *Full Harmonic Analysis* (рисунок 25, б).



а)



б)

Рисунок 25 – Управление параметрами гармонического анализа

20. Задать гармоническую нагрузку  $F = F_0 \sin kt$ .

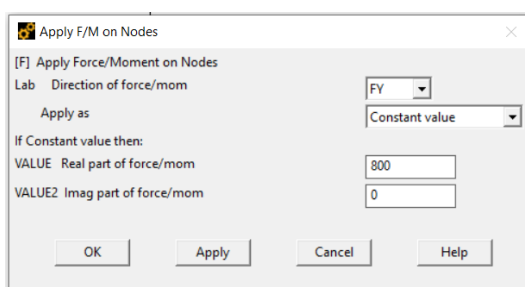
20.1. В разделе *Loads\Define Loads\Apply\Structural\Force/Moment* указать амплитуду  $F_0$  в виде вертикальной силы 800 (Н) в крайнем узле (либо в крайней точке) балки на торце  $X=1$ \*) (рисунок 26, а).

\*) Для функционирующей в КГТУ версии 2021 R2 выполнить п. 20.1а

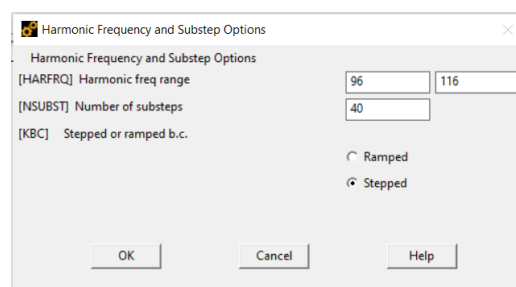
20.1а. Нагрузить крайний узел модели вертикальной силой посредством ввода в командную строку APDL-кода:

```
ALLSEL,ALL
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2
!*
/GO
F,P51X,FY,800
```

20.2. На панели *Loads\Load Step Opts\Time/Frequenc\Freq and Substeps* указать диапазон значений частоты  $k$  и число подшагов решения (рисунок 26, б). При этом значения частот ограничить интервалом  $\pm 10$  (Гц) относительно минимальной частоты из списка п. 12.



а)





б)

Рисунок 26 – Задание гармонической нагрузки


21. Запустить анализ. По окончании перейти в Постпроцессор.

22. Для крайнего узла балки, где приложена гармоническая нагрузка, построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), а также зависимости виброскорости и виброускорения от частоты возбуждения.

22.1. На панели *Results Viewer* кнопкой  вызвать панель *Time-History Variables*, где с помощью кнопки  добавить в список переменных вертикальное перемещение, указать крайний узел балки на торце  $X=1$ .

22.2. Создать вычисляемую переменную виброскорость = перемещение\*частота. Для этого в левом поле панели *Calculator* указать имя новой переменной; затем составить нужное выражение, выбирая переменные из правого списка ниже. После нажатия кнопки *Enter* созданная переменная окажется в списке *Variable List* и может быть выведена на график.

22.3. Подобным образом создать вычисляемую переменную виброускорение = перемещение\*частота<sup>2</sup> (рисунок 27).

23. Отобразить диаграммы п. 22 посредством кнопки  и включить изображения в отчет.

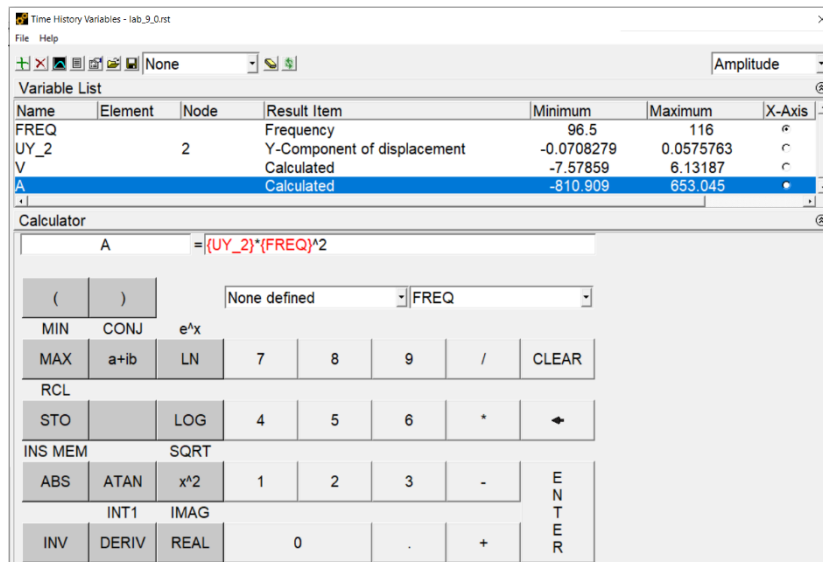


Рисунок 27 – Управление переменными для графического представления

### Гармонический анализ при наличии демпфирования

24. В Препроцессоре на панели *Loads\Load Step Opts\Time/Frequenc\Damping* назначить коэффициент демпфирования 0.2 (рисунок 28).

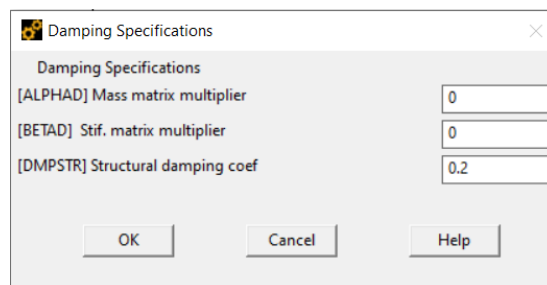


Рисунок 28 – Панель управления параметрами демпфирования

25. Выполнить действия пп. 21–23. Выйти без сохранения.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем принципиальное отличие динамического анализа от статического?
2. Что является предметом модального анализа?
3. Какие данные о материале необходимы для выполнения модального анализа?
4. Какие настройки расчетной модели предшествуют модальному анализу?
5. В чем заключается гармонический анализ?
6. Какие данные о внешней нагрузке требуются для гармонического анализа?
7. Какими средствами может быть построена амплитудно-частотная характеристика?

### ***Лабораторная работа № 10***

#### **Основы работы на платформе Ansys Workbench**

**Цель работы:** получение практических умений и навыков построения КЭ моделей, освоение методики подготовки и выполнения анализа в интегрированной среде Ansys Workbench.

#### **Задачи работы**

1. Освоение интерфейса Ansys Workbench.
2. Освоение методики подготовки расчетной модели.
3. Освоение технологии выполнения статического анализа, просмотра и сохранения результатов.

#### **План проведения занятия**

1. Создание проекта в среде Ansys Workbench.
2. Построение геометрической модели в графическом модуле Design Modeler.
3. Настройка механических свойств материалов.
4. Формирование КЭ модели.
5. Назначение нагрузок и условий закрепления.
6. Выполнение статического анализа и постпроцессинг результатов.



## Порядок выполнения работы

1. Запустить Ansys Workbench.


### Создание проекта структурного анализа

2. В разделе *Analysis Systems* панели *Toolbox* дважды кликнуть модуль *Static Structural*. В результате создается блок инженерного анализа *A* в рабочем окне проекта *Project Schematic*. Блок содержит набор пакетов, подлежащих последовательному выполнению.



3. В пункте *Units* главного меню проверить используемую систему единиц (метрическая либо СИ). Сохранить проект в виде файла *\*.wbpj* в своей рабочей директории.

### Построение геометрической модели


4. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Geometry* блока *A* и выбрать *New DesignModeler Geometry...*

5. В открывшемся модуле геометрического моделирования *Design Modeler* выбрать плоскость *ZX* в Дереве построения *Tree Outline* либо в раскрываемом списке Панели инструментов. Сориентировать плоскость перпендикулярно направлению обзора с помощью кнопки  Панели инструментов.

6. Перейти в режим разработки эскиза на вкладке *Sketching* и открыть меню *Settings*. Настроить отображение сетки и привязку к узлам; указать основной шаг 0.1 м и число вспомогательных шагов на основном – 1. Увеличить масштаб изображения примерно до уровня  $0 \div 1$  м.

7. Создать эскиз посредством пиктограммы  на Панели инструментов. В меню *Draw* выбрать инструмент *Прямоугольник*. Построить квадрат  $0.6 \times 0.6$  м с центром в начале координат; подтвердить кнопкой  *Generate*.

8. Вернуться в режим моделирования на вкладке *Modeling* и выбрать в Дереве построения созданный эскиз. Перейти в отображение изометрии, вызвав в графической области контекстное меню и выбрав *Restore Default*.

9. С помощью инструмента *Extrude* создать объемный элемент высотой 0.1 м, выбрав в окне свойств *Details View* направление вытяжки *Reversed* (вниз); подтвердить кнопкой  *Generate*.

10. На плоскости *ZX* создать новый эскиз в виде окружности диаметра 0.3 м с центром в начале координат. Для настройки использовать инструмент *Diameter* из меню *Dimensions*.

11. Эскиз п. 10 вытянуть вверх на 3 м в виде тонкостенного элемента толщиной 0.04 м; толщина внутрь. Для этого в окне *Details View* активировать

параметр *As Thin/Surface?* инструмента *Extrude* и назначить толщину *Inward Thickness*. Подтвердить кнопкой  *Generate*.

12. Убрать отображение сетки. Выделить в Дереве созданное тело *Solid* и скорректировать его имя в строке *Body*, например, *Solid\_a*. Изображение в изометрии сохранить посредством инструмента *Image Capture* и включить в отчет. Сохранить проект.

13. Вернуться к геометрическим построениям в *DesignModeler*. Из пункта *Tools* Главного меню добавить элемент *Freeze*. В результате тело п. 12 «заморозится», что исключит его слияние с другими телами при формировании сборки.





14. С помощью инструмента *Create\Primitives\Box* создать блок 4×2×0.4 м, симметричный относительно оси трубы п. 11. Выделить его в Дереве и настроить параметры в окне *Details View: Base Plane = ZXPlane* (выбрать плоскость в Дереве → *Apply*); *Box Type = From Two Points*; координаты крайних точек (м) – по таблице 2. Подтвердить кнопкой  *Generate*.



Таблица 2 – Координаты крайних точек блока

Точка	X	Y	Z
1	-0.2	-2	4
2	0.2	2	6

15. Включить фильтр выбора поверхностей . С помощью инструмента *Rotate*  развернуть модель удобным ракурсом и выделить нижнюю грань блока п.13.


16. Перейти на вкладку *Sketching* и создать окружность произвольного положения и диаметра. Используя инструменты *Horizontal*, *Vertical* и *Diameter* из меню *Dimensions*, скорректировать положение окружности в центре грани блока, а также диаметр = 0.3 м. Завершить эскиз кнопкой  *Generate*.

17. Вернуться на вкладку *Modeling* и в режим изометрии. На основе эскиза п. 15 создать отверстие (*Operation = Cut Material*) глубиной 1.6 м в блоке п. 13. Выделить в Дереве созданное тело *Solid* и скорректировать его имя в строке *Body*, например, *Solid\_b*.

18. С помощью пиктограммы  создать новую плоскость. Выбрать ее в Дереве и настроить параметры: *Type = From Face*; *Base Face* – верхний торец трубы (мышью на модели) → *Apply*. Подтвердить кнопкой  *Generate*.

19. Создать новую плоскость подобно п. 18, указав в качестве базовой торцевую поверхность отверстия п. 17. Дополнительно изменить на противоположное направление оси *Z* посредством пункта *Reverse Normal* и повернуть систему координат вокруг *Z* на -90°, раскрыв список в строке *Transform 1*. В гра-

фическом окне проконтролировать совпадение координатных направлений плоскостей пп. 18 и 19. Сохранить проект.

20. Из пункта *Create* Главного меню добавить элемент *Body Transformation\Move*. Активировать строку *Bodies* в окне *Details View* и выбрать в Дереве тело п. 17 → *Apply*. Подобным образом назначить управляющие плоскости для настройки перемещения тела – исходную *Source Plane* и целевую *Destination Plane*, указав плоскости пп. 19 и 18 соответственно. Подтвердить кнопкой  *Generate*.

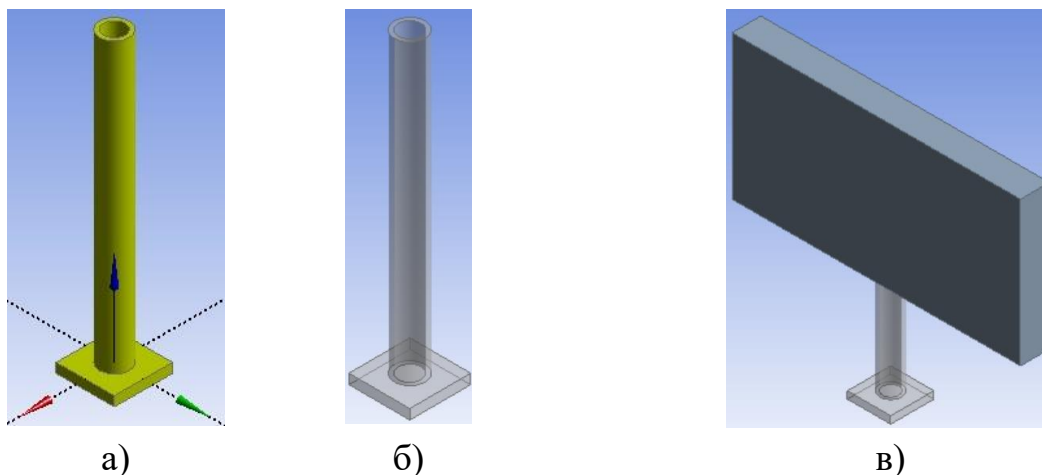


Рисунок 29 – Геометрические объекты в соответствии с пп. 12 (а), 13 (б) и 20 (в)

21. Изображение модели в аксонометрии включить в отчет. Сохранить проект. Закрывать *Design Modeler*.



#### Настройка свойств материалов

22. Обновить проект  *Update Project* в окне *Workbench*. Сохранить проект.

23. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Engineering Data* блока *A* и выбрать *Edit...*

24. В открывшейся вкладке *A2:Engineering Data* для предустановленного на панели *Outline of Schematic* материала *Structural Steel* выполнить дублирование с помощью пункта *Duplicate* контекстного меню.

25. На панели *Properties of Outline Row* скорректировать характеристики нового материала: модуль упругости  $2.1 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона 0.32.

26. Открыть вложенную вкладку *Engineering Data Sources*. В разделе  ANSYS GRANTA Materials Data for Simulation (Sample) выбрать бетон *Concrete* и включить его в проект кнопкой . Подобным образом добавить в проект пластик *PVC*.

27. Закрывать вкладку *A2:Engineering Data*.

## Подготовка расчетной модели

28. Обновить проект  в окне Workbench. Сохранить проект.


29. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Setup* блока *A* и выбрать *Edit...*

30. В Дереве проекта *Outline* развернуть секцию *Geometry* и выбрать объем опорной части модели – тело п. 12. На панели детализации раскрыть список *Material\Assignment* и выбрать материал п. 25.

31. Назначить материал верхней части модели (тело п. 17) – бетон. Сохранить проект.



33. Выполнить конечно-элементное разбиение модели.

33.1. В Дереве проекта перейти в секцию *Mesh*; в окне детализации выбрать из списка *Defaults\Element Order* квадратичный тип КЭ.

33.2. В главном меню раскрыть пункт *Mesh* и включить инструмент *Method*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и при включенном режиме выбора тел  указать в графическом окне верхний объем → *Apply*. В разделе *Definition* сделать выбор в списке *Method = Hex Dominant*, а затем еще в двух: *Element Order = Quadratic*; *Free Face Mesh Type = All Quad*.

33.3. Включить инструмент *Sizing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне оба тела; в пункте *Definition\Element Size* указать размер КЭ 0.1 м.

33.4. Включить инструмент *Face Meshing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне 10 плоских поверхностей, ограниченных наружным прямоугольным контуром, → *Apply*.

33.5. В контекстном меню раздела *Mesh* выбрать пункт *Generate Mesh* ; другой способ – кнопка  в пункте *Mesh* главного меню. Сохранить проект.

33.6. Параметры КЭ модели (число узлов и элементов) скопировать из раздела *Statistics* окна детализации и включить в отчет.

34. В главном меню раскрыть пункт *Home* и с помощью инструмента *Images\Image to File...* сохранить изображение КЭ модели и включить его в отчет.

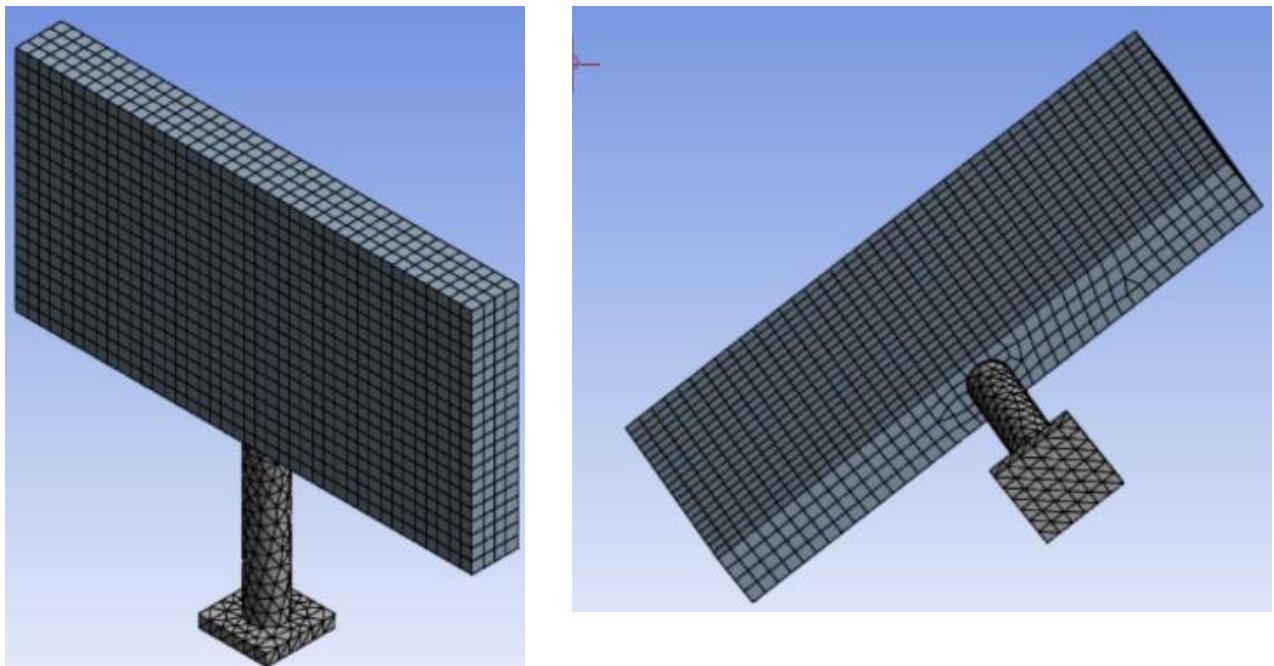


Рисунок 30 – Конечно-элементная модель билборда

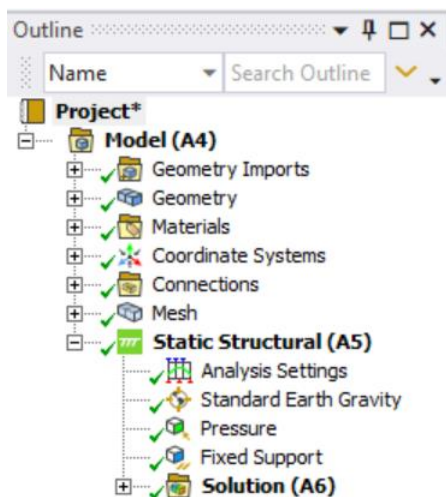
35. Задать нагрузки.

35.1. Находясь в секции *Static Structural*, открыть в главном меню пункт *Environment*.

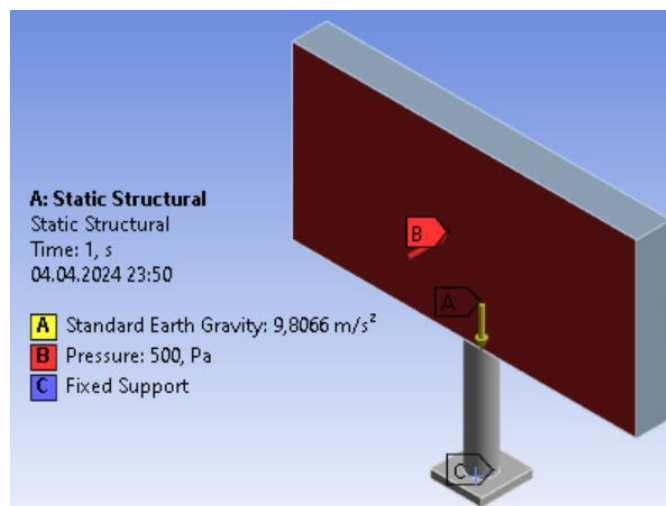
35.2. С помощью инструмента *Inertial\Standard Earth Gravity* включить гравитацию; в разделе *Scope\Geometry* окна детализации выбрать оба тела; в разделе *Definition* указать направление вниз вдоль оси *Y*.

35.3. Нагрузить билборд равномерным давлением посредством инструмента *Loads\Pressure*; в разделе *Scope\Geometry* окна детализации выбрать лицевую поверхность билборда; в разделе *Definition\Magnitude* указать величину давления 500 (Па).

35.4. С помощью инструмента *Supports\Fixed* жестко закрепить основание модели. Для этого в окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне нижнюю поверхность опоры.



а)



б)

Рисунок 31 – Сформированное дерево проекта (а) и нагрузки статического анализа (б)

36. Настроить вывод результатов анализа. Для этого, находясь в секции *Static Structural\ Solution*, открыть в главном меню пункт *Solution*. Раскрыть список *Results* и выбрать полные и координатные перемещения (*Total & Directional Deformation*), эквивалентные и нормальные напряжения (*Equivalent & Normal Stress*), а также 1 и 3-е главные напряжения (*Maximum & Minimum Principal Stress*). Включить в перечень результатов коэффициент запаса по пределу текучести: *Toolbox\Stress Tool*. Сохранить проект.

#### Выполнение анализа и визуализация результатов

37. Запустить решение *Solve* . По окончании расчета развернуть в секции *Static Structural* список *Solution*.

38. Вывести в аксонометрии и включить в отчет поля перемещений и напряжений (координатные перемещения и нормальные напряжения – вдоль Z).

39. Скрыть верхний объем в секции *Geometry* и отобразить эквивалентные и главные напряжения опорной части билборда. Включить изображения в отчет.

40. Высветить оба объема и анимировать картину полных перемещений, а также распределение коэффициента запаса.

41. Сменить материал верхней части билборда: пластик вместо бетона. Для этого в секции *Materials* включить последовательность *Material\Plastic* и в контекстном меню выбрать *Create Material Assignment*. У появившегося в Дереве объекта активировать в окне детализации пункт *General\Geometry*, выбрать в графическом окне тело верхней части билборда → *Apply*.

42. Выполнить пп. 37–40.

43. Закрывать окно модуля Mechanical. Сохранить проект. Выйти из Workbench.

### **Контрольные вопросы**

1. Как устроено стартовое окно Ansys Workbench?
2. Какова последовательность действий при работе в Ansys Workbench?
3. Каким образом возможно включение геометрической модели в проект?
4. Какие действия необходимы для создания объема в модуле Design Modeler?
5. Какие формообразующие операции могут быть применены для создания объема?
6. Каким требованиям должен удовлетворять эскиз для возможности построения объема?
7. Какие инструменты существуют для управления конечноэлементной дискретизацией геометрической модели?

### **Лабораторная работа № 11**

#### **Анализ течения потока жидкости в канале**

**Цель работы:** получение практических умений и навыков построения КЭ моделей, освоение методики постановки и решения задач гидрогазодинамики.

#### **Задачи работы**

1. Дальнейшая отработка приемов геометрического моделирования в среде Ansys Workbench.
2. Овладение основами формирования проекта гидродинамического анализа средствами Ansys CFX.
3. Знакомство с интерфейсом постпроцессора CFD-Post.

#### **План проведения занятия**

1. Создание проекта в среде Ansys Workbench.
2. Построение геометрической модели в графическом модуле Design Modeler.
3. Формирование КЭ модели.
4. Назначение внешних условий течения жидкости.
5. Выполнение гидродинамического анализа.
6. Постпроцессинг результатов.

## Порядок выполнения работы

1. Запустить Ansys Workbench.


### Создание проекта гидродинамического анализа

2. В разделе *Analysis Systems* панели *Toolbox* дважды кликнуть модуль *Fluid Flow (CFX)*. В результате создается блок инженерного анализа *A* в рабочем окне проекта *Project Schematic*. Блок содержит набор пакетов, подлежащих последовательному выполнению.


3. В пункте *Units* главного меню проверить используемую систему единиц (метрическая либо СИ). Сохранить проект в виде файла *\*.wbpj* в своей рабочей директории.

### Построение геометрической модели


4. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Geometry* блока *A* и выбрать *New DesignModeler Geometry...*



5. В открывшемся модуле геометрического моделирования *Design Modeler* выбрать плоскость *ZX* в Дереве построения *Tree Outline* либо в раскрываемом списке Панели инструментов. Сориентировать плоскость перпендикулярно направлению обзора с помощью кнопки  Панели инструментов.


6. Перейти в режим разработки эскиза на вкладке *Sketching* и открыть раздел *Settings*. Настроить отображение сетки и привязку к узлам; указать основной шаг 0.1 м и число вспомогательных шагов на основном – 2. Увеличить масштаб изображения примерно до уровня  $0 \div 0.4$  м.

7. Создать эскиз средствами разделов *Draw*, *Dimensions* и *Modify*, как показано на рисунке 32, а: длина – 0.6 м; ширина – 0.1 м; радиус дуги – 0.15 м с центром в начале координат. Подтвердить построение кнопкой .

8. Вернуться в режим моделирования на вкладке *Modeling* и выбрать в Дереве построения созданный эскиз. Перейти в отображение изометрии, вызвав в графической области контекстное меню и выбрав *Restore Default*.

9. С помощью инструмента *Revolve* создать объемный элемент в виде тела вращения; подтвердить кнопкой .

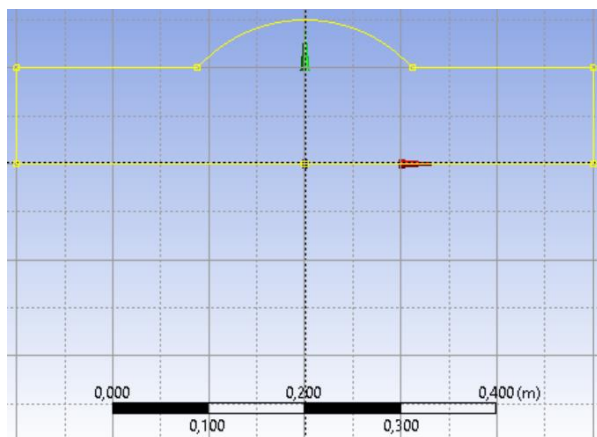
10. На плоскости *ZX* создать новый эскиз посредством пиктограммы  на Панели инструментов и построить окружность диаметра 0.16 м с центром в начале координат. Для настройки использовать инструмент *Diameter* из раздела *Dimensions*. Подтвердить кнопкой .

11. Эскиз п. 10 вытянуть вверх на 0.3 м. Подтвердить кнопкой .

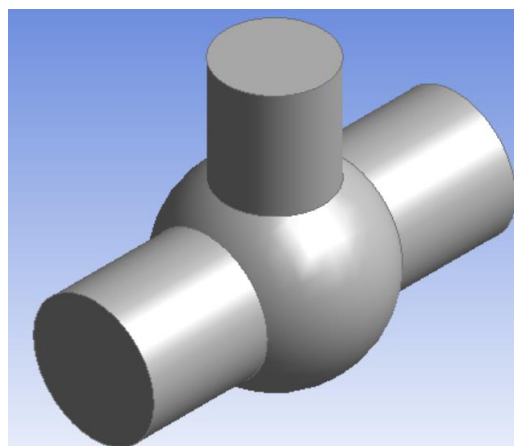


12. В Дереве построения выделить тело модели (рисунок 32, б); в окне детализации присвоить уникальное имя в строке *Body* и выбрать жидкую фазу в списке *Fluid/Solid*.

13. Изображение модели в аксонометрии включить в отчет. Сохранить проект. Закрывать *Design Modeler*.



а)



б)

Рисунок 32 – Эскиз п.7 (а) и объемная модель п.12 (б)

#### Создание конечноэлементной модели

14. Обновить проект  в окне *Workbench*. Сохранить проект.



15. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Mesh* блока *A* и выбрать *Edit...*

16. Выполнить конечно-элементное разбиение модели средствами модуля *Meshing*.

16.1. В Дереве проекта перейти в секцию *Mesh*; в окне детализации выбрать из списка *Defaults\Element Order* квадратичный тип КЭ.

16.2. В главном меню раскрыть пункт *Mesh* и включить инструмент *Method*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне тело модели → *Apply*. В списке *Definition\Method* выбрать *Hex Dominant*.

16.3. Включить инструмент *Sizing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне тело модели; в пункте *Definition\Element Size* указать размер КЭ 0.01 м.

16.4. В контекстном меню раздела *Mesh* выбрать пункт *Generate Mesh* ; другой способ – кнопка  в пункте *Mesh* главного меню. Сохранить проект.

16.5. Параметры КЭ модели (число узлов и элементов) скопировать из раздела *Statistics* окна детализации и включить в отчет.

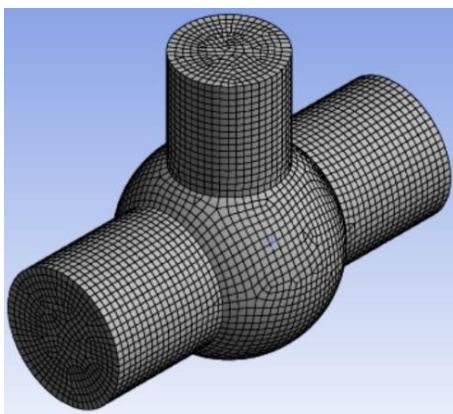
17. В главном меню раскрыть пункт *Home* и с помощью инструмента *Images\Image to File...* сохранить изображение КЭ модели (рисунок 33, а) и включить его в отчет. Закрыть окно *Meshing*.

### Подготовка расчетной модели

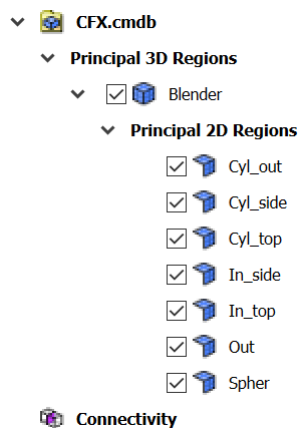
18. Обновить проект  в окне *Workbench*. Сохранить проект.

19. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Setup* блока *A* и выбрать *Edit...*

20. В открывшемся окне Препроцессора *CFX-Pre* раскрыть в Дереве список *CFX.cmdb* и поочередно присвоить содержательные имена объектам области течения (объему и поверхностям) подобно рисунку 33, б, пользуясь функцией *Rename*. Имена поверхностей соответствуют их форме и положению, в том числе две торцевые поверхности являются входными для потока, а передний торец является выходом. Сохранить проект.




а)




б)

Рисунок 33 – Результаты выполнения п.16 (а) и п.20 (б)

21. В пункте *Analysis Type* раздела *Simulation* Деревя открывать контекстное меню и выбрать *Edit*. Подтвердить выбранный по умолчанию стационарный анализ.

22. На панели инструментов выбрать *Domain* . После присвоения имени и подтверждения скорректировать информацию на двух вкладках: 1) *Basic Settings\Location* = тело модели, *Material* = *Water*; 2) *Fluid Models\Heat Transfer*

= *Thermal Energy*, *Turbulence* = *Shear Stress Transport*. Вкладку *Initialization* оставить по умолчанию. Подтвердить настройки кнопкой *OK*.

23. С помощью инструмента *Boundary*  создать и настроить три объекта: два входа и выход.

23.1. Вход *In\_top*. Скорректировать информацию на трех вкладках: 1) *Basic Settings*\Boundary Type = *Inlet*, Location = *In\_top* (из списка поверхностей); 2) *Boundary Details*\Normal Speed = 1.5 м/с, Static Temperature = 70 С (шкалу Цельсия выбрать из выпадающего списка); 3) *Plot Options*\Boundary Contour = *Normal Speed*. Подтвердить настройки кнопкой *OK*.

23.2. Вход *In\_side* – аналогично, при этом скорость потока = 1 м/с, температура = 20 °С.

23.3. Выход *Out*. Скорректировать информацию на трех вкладках: 1) *Basic Settings*\Boundary Type = *Outlet*, Location = *Out* (из списка поверхностей); 2) *Boundary Details*\Relative Pressure = 0; 3) *Plot Options*\Boundary Contour = *Relative Pressure*. Подтвердить настройки кнопкой *OK*.

23.4. Открыть список *Domain Default* посредством контекстного меню и убедиться, что на вкладке *Basic Settings* выбран тип границы *Boundary Type* = *Wall*, а в список *Location* вошли все поверхности, за исключением поверхностей пп. 23.1–23.3.

24. Сохранить проект. Включить в отчет изображение области течения со всеми настройками. Закрыть окно Препроцессора *CFX-Pre*.

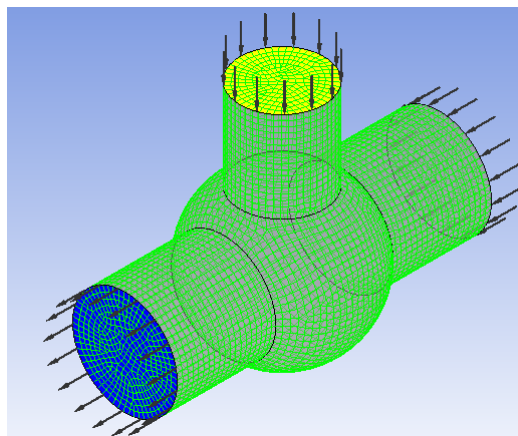
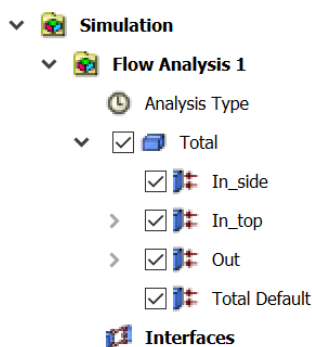


Рисунок 34 – Результаты выполнения пп. 22 и 23

#### Выполнение анализа и визуализация результатов


25. Сохранить проект в окне *Workbench*.


26. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Solution* блока *A* и выбрать *Edit*....


27. В окне *Define Run* запустить решение кнопкой *Start Run*. По окончании расчета, при появлении закрыть всплывающее окно *Solver Run Finished Normally*, затем окно *CFX-Solver Manager*.

28. В окне *Workbench* сохранить проект.


29. Открыть контекстное меню пакета *Results* блока *A* и выбрать *Edit...*

30. В окне Постпроцессора *CFD-Post* отобразить в изометрии распределение давления посредством инструмента *Contour* . На вкладке *Geometry* в списке *Domains* выбрать область течения п. 22; в списке *Variable* выбрать *Pressure*. Включить изображение в отчет.

31. Отобразить распределение температуры подобно п. 30, при этом сделать невидимой картину давлений. Добавить объект *Volume Rendering*  и в настройках указать отображение температуры. Включить изображения в отчет.

32. Вывести в изометрии линии тока посредством инструмента *Streamlines* . При этом следует указать стартовое сечение, от которого исходит поток. В проекте предусмотрены два входных сечения, поэтому потребуется создание двух объектов. Отобразить и включить в отчет обе картины одновременно, предварительно сняв указатели видимости с графических объектов пп. 30–31.

33. Отобразить и включить в отчет линии тока в профильной проекции (в плоскости *YZ*). Для смены ракурса выбрать в контекстном меню пункт *Predefined Camera*.

34. Анимировать линии тока п. 32. Для этого обратиться к пиктограмме  на инструментальной панели, либо выбрать анимацию в пункте *Tools* главного меню.

35. Закрыть окно Постпроцессора *CFD-Post*. Сохранить проект. Выйти из *Workbench*.

### Контрольные вопросы

1. Какие величины подлежат определению в задаче гидродинамики?
2. Как определяется область течения жидкости?
3. Какие типы КЭ используются в гидродинамическом анализе?
4. Какие подготовительные операции предшествуют гидродинамическому анализу?
5. Каким образом обеспечивается доступ к результатам гидродинамического анализа?
6. Какие средства визуализации предусмотрены для результатов гидродинамического анализа?

## **Лабораторная работа № 12**

### **Анализ обтекания билборда воздушным потоком**

**Цель работы:** получение практических умений и навыков построения КЭ моделей, освоение методики постановки и решения задач гидрогазодинамики, а также интеграции с задачами структурного анализа.

#### **Задачи работы**

1. Дальнейшая отработка методики геометрического моделирования в среде Ansys Workbench.
2. Освоение приемов подготовки и выполнения аэродинамического анализа средствами Ansys CFX.
3. Освоение приемов интеграции заданий в рамках многодисциплинарного проекта.

#### **План проведения занятия**

1. Создание проекта в среде Ansys Workbench. Импорт геометрической модели.
2. Редактирование геометрической модели в графическом модуле Design Modeler.
3. Формирование КЭ модели.
4. Назначение условий движения воздушного потока.
5. Выполнение аэродинамического анализа и постпроцессинг результатов.
6. Включение в проект и настройка структурного анализа.
7. Выполнение структурного анализа и постпроцессинг результатов.

#### **Порядок выполнения работы**

1. Открыть Ansys Workbench.

##### Создание проекта аэродинамического анализа

2. В разделе *Analysis Systems* панели *Toolbox* дважды кликнуть модуль *Fluid Flow (CFX)*. В результате создается блок инженерного анализа *A* в рабочем окне проекта *Project Schematic*. Блок содержит набор пакетов, подлежащих последовательному выполнению.
3. Переименовать задание, раскрыв в блоке *A* список операций и выбрав *Rename*.

4. В пункте *Units* главного меню проверить используемую систему единиц (метрическая либо СИ). Сохранить проект в своей рабочей директории.

#### Импорт геометрической модели билборда

5. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Geometry* блока *A* и выбрать *Import Geometry\Browse...*


6. Построить путь доступа к файлу геометрической модели LP10 (проект с именем \*): \*\_files\dp0\SYS\DM, выбрать этот файл и подтвердить кнопкой *Открыть*.

7. Сохранить проект в окне *Workbench*.

#### Редактирование геометрической модели

8. В контекстном меню пакета *Geometry* блока *A* выбрать *Edit Geometry in Design Modeler...*

9. В открывшемся модуле геометрического моделирования *Design Modeler* «заморозить» верхнюю часть билборда, выбрав операцию *Freeze* в пункте *Tools* главного меню.

10. Перейти в режим изометрии и уменьшить масштаб изображения до уровня примерно 0÷30 м. Построить расчетную область течения воздушного потока в виде симметричного относительно плоскости *YZ* прямоугольного блока, нижняя плоскость которого совпадает с плоскостью основания билборда. Для этого в окне детализации объекта *Box* выбрать *Base Plane = XYPlane*, *Box Type = From Two Points*; далее указать координаты двух крайних точек: (-10; -0.1; -30), (10; 14; 20). Подтвердить построение кнопкой  *Generate*.

11. Из пункта главного меню *View* перейти в режим отображения *Wireframe* и убедиться в правильном положении блока п. 10 посредством стандартных видов; вернуться в режим *Shaded Exterior and Edges*. В Дереве построения выделить тело блока; в окне детализации присвоить уникальное имя в строке *Body* и выбрать жидкую фазу в списке *Fluid/Solid*. Скопировать и включить в отчет данные об объеме и площади поверхности блока. Сохранить модель.

12. Вычесть объем основания билборда из объема блока п. 10.

12.1. Выбрать в главном меню *Create\Boolean*. В окне детализации созданного объекта выбрать *Operation = Subtract*.



12.2. Активировать строку *Target Bodies* и выбрать в Дереве тело блока → *Apply*.

12.3. Активировать строку *Tool Bodies* и выбрать в Дереве тело опорной части билборда → *Apply*. В строке *Preserve Tool Bodies?* выбрать *Yes*.

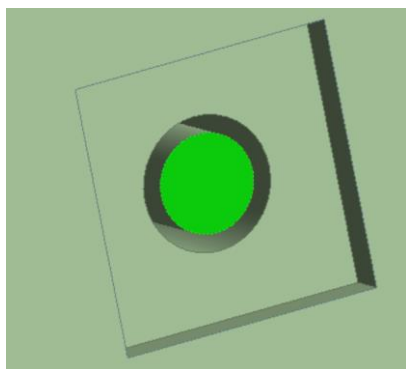
12.4. Подтвердить выполнение логической операции кнопкой  *Generate*.

13. В полученном теле п. 12 удалить цилиндрический фрагмент, оставшийся от полости трубы опорной части билборда.

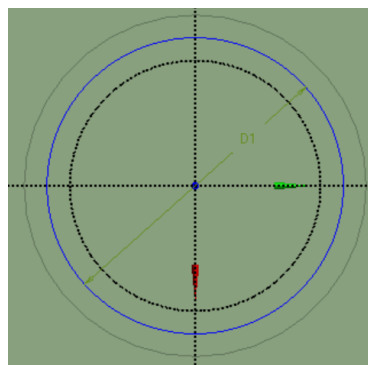
13.1. Отключить видимость основания билборда, выбрав *Hide Body* в контекстном меню. Выбрать торцевую поверхность цилиндрического фрагмента, как показано на рисунке 35, а.

13.2. Сориентировать изображение в плоскости экрана  и после увеличения масштаба создать окружность диаметра 0.26 м с центром в начале координат, как показано на рисунке 35, б. Для построений использовать инструменты вкладки *Sketching*, подтвердить кнопкой  *Generate*.

13.3. Вернувшись на вкладку *Modeling* и выбрав в Дереве построенный эскиз, создать вырез глубиной 3 м, подтвердить кнопкой  *Generate*.






а)



б)

Рисунок 35 – Этапы промежуточной коррекции области потока

14. Вычесть объем верхней части билборда из тела п. 13, алгоритм аналогичен п. 12.

15. Отключить видимость верхней части билборда. Отобразить модель сверху с видимой системой координат . Выбрать инструмент секущей плоскости  и построить след этой плоскости вдоль горизонтальной координатной оси через всю модель. Отобразить полученное сечение подобно рисунку 36, а и включить в отчет, пользуясь инструментом *Image Capture* . В окне *Section Planes* снять флажок отображения сечения. Отобразить модель спереди и, действуя аналогичным образом, построить и включить в отчет сечение плоскостью *YZ*, как показано на рисунке 36, б.

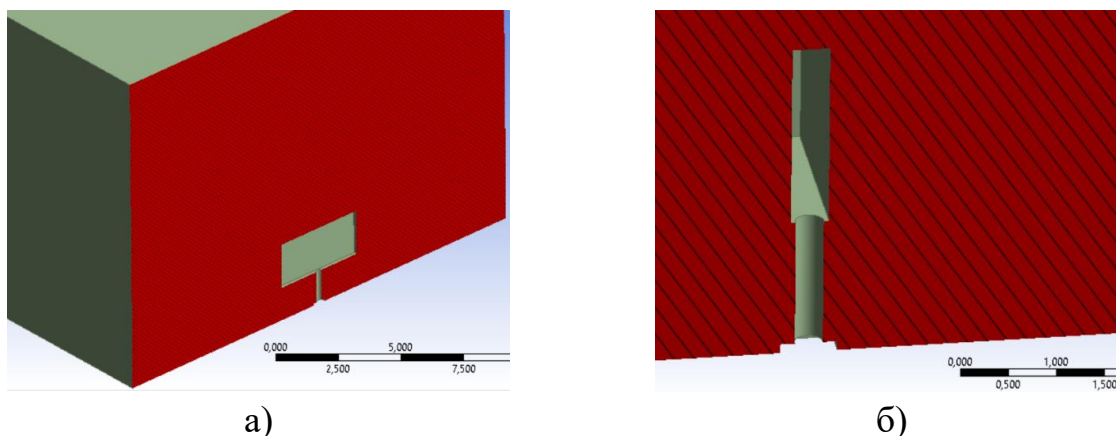


Рисунок 36 – Сечения области потока в зоне расположения билборда

16. Скопировать и включить в отчет сведения об объеме и площади поверхности построенной области течения воздушного потока. Сравнить эти величины с данными п. 11.

17. Включить видимость всех объемов. Сохранить модель. Закрыть *Design Modeler*. Сохранить проект в окне *Workbench*.

#### Создание конечноэлементной модели

18. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Mesh* блока *A* и выбрать *Edit...*

19. Скопировать и включить в отчет изображение модели. В Дереве раскрыть список *Connections\Contacts* и поочередно выделить каждую из трех контактных зон, обратив внимание в окне детализации на взаимодействующие тела, а также на визуальное представление в графической области.

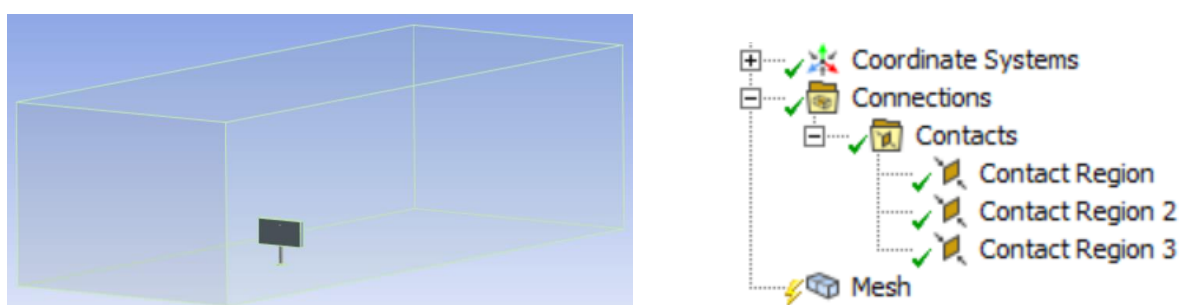



Рисунок 37 – Общий вид модели в пакете *Mesh* и перечень контактных зон

20. В Дереве проекта перейти в секцию *Mesh*; в окне детализации выбрать из списка *Defaults\Element Order* линейный тип КЭ.

21. В разделе *Geometry* отключить видимость области потока, включить режим *Zoom to Fit* , настроить и выполнить КЭ разбиение билборда.





21.1. В главном меню раскрыть пункт *Mesh* и включить инструмент *Method*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне тело верхней части билборда → *Apply*. В списке *Definition\Method* выбрать *Hex Dominant*.

21.2. Включить инструмент *Sizing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне оба тела билборда; в пункте *Definition\Element Size* указать размер КЭ 0.1 м → *Enter*.

21.3. Включить инструмент *Contact Sizing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope>Contact Region* и выбрать из списка зону контакта двух частей билборда (см. п. 19); в пункте *Definition\Element Size* указать размер КЭ 0.1 м.

21.4. Включить инструмент *Face Meshing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне 10 плоских поверхностей, ограниченных наружным прямоугольным контуром, → *Apply*.

21.5. В контекстном меню раздела *Mesh* выбрать пункт *Generate Mesh*  *Generate Mesh*; другой способ – кнопка  *Generate* в пункте *Mesh* главного меню. Сохранить модель.

21.6. Параметры КЭ модели (число узлов и элементов) скопировать из раздела *Statistics* окна детализации и включить в отчет. В главном меню раскрыть пункт *Home* и с помощью инструмента *Images\Image to Clipboard* сохранить изображение КЭ модели и включить его в отчет.

22. Вернуть видимость области потока, настроить и выполнить ее КЭ разбиение.

22.1. Включить инструмент *Method*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне тело области потока → *Apply*. В списке *Definition\Method* выбрать *Hex Dominant*.

22.2. Включить инструмент *Sizing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне области потока; в пункте *Definition\Element Size* указать размер КЭ 1 м → *Enter*.

22.3. Включить инструмент *Contact Sizing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope>Contact Region* и выбрать из списка одну из зон контакта области потока с билбордом (см. п. 19); в пункте *Definition\Element Size* указать размер КЭ 0.1 м. Подобным образом добавить еще один объект *Contact Sizing*, при этом выбрав оставшуюся зону контакта.

22.4. Включить инструмент *Face Meshing*; созданный элемент выделить в Дереве. В окне детализации активировать пункт *Scope\Geometry* и указать в графическом окне 5 наружных плоскостей расчетной области (за исключением нижней), ограниченных наружным прямоугольным контуром, → *Apply*.

22.5. Сгенерировать КЭ сетку. Сохранить модель.

22.6. Параметры КЭ модели скопировать из раздела *Statistics* окна детализации и включить в отчет. Сохранить изображение КЭ модели и включить его в отчет. Закрыть окно Meshing.

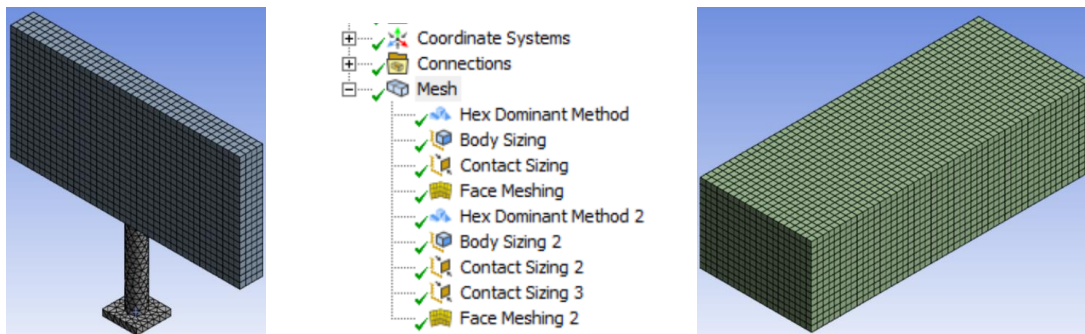


Рисунок 38 – Результаты выполнения пп.21 и 22

### Подготовка расчетной модели

23. Обновить проект  в окне Workbench. Сохранить проект.

24. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Setup* блока *A* и выбрать *Edit...*

25. В открывшемся окне Препроцессора CFX-Pre раскрыть в Дереве список *CFX.cmdb* и поочередно присвоить содержательные имена трем трехмерным объектам, а также всем двумерным объектам области течения подобно рисунку 39,





Рисунок 39 – Трехмерные тела и двумерные поверхности в Дереве модели

пользуясь функцией *Rename* и имея в виду горизонтальное движение воздушного потока противоположно оси *Z*. Данная операция имеет целью безошибочный выбор необходимых поверхностей в последующих настройках условий течения потока. Сохранить модель.

26. В пункте *Analysis Type* раздела *Simulation* Деревя открыть контекстное меню и выбрать *Edit*. Подтвердить выбранный по умолчанию стационарный анализ.

27. Удалить раздел *Default Domain*.

28. На панели инструментов выбрать *Domain* . После присвоения имени и подтверждения скорректировать информацию на двух вкладках: 1) *Basic Settings*\Location = тело области потока; 2) *Initialization*\Domain Initialization\Turbulence = High (10 %). Остальные настройки оставить по умолчанию; подтвердить кнопкой *OK*.

29. С помощью инструмента *Boundary*  создать и настроить объекты воздушного потока: вход, выход, внешние поверхности, грунт, поверхности с полным торможением, поверхности со свободным скольжением.

29.1. Вход *In*. Скорректировать информацию на трех вкладках: 1) *Basic Settings*\Boundary Type = *Inlet*, Location = /передняя плоскость из списка поверхностей, как на рисунке 40; 2) *Boundary Details*\Normal Speed = 20 м/с, *Static Turbulence* = High (10 %); 3) *Plot Options*\Boundary Contour = *Normal Speed*. Подтвердить настройки кнопкой *OK*.

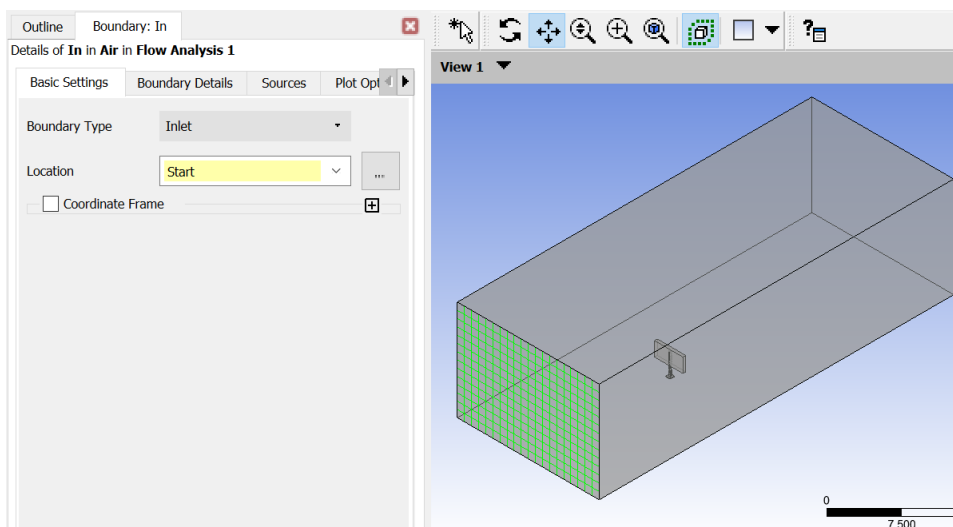


Рисунок 40 – Настройка входного сечения потока

29.2. Выход *Out*. Скорректировать информацию на трех вкладках: 1) *Basic Settings*\Boundary Type = *Outlet*, Location = /задняя плоскость из списка поверхностей, как на рисунке 41; 2) *Boundary Details*\Relative Pressure = 0; 3) *Plot*

*Options\Boundary Contour = Relative Pressure*. Подтвердить настройки кнопкой *OK*.

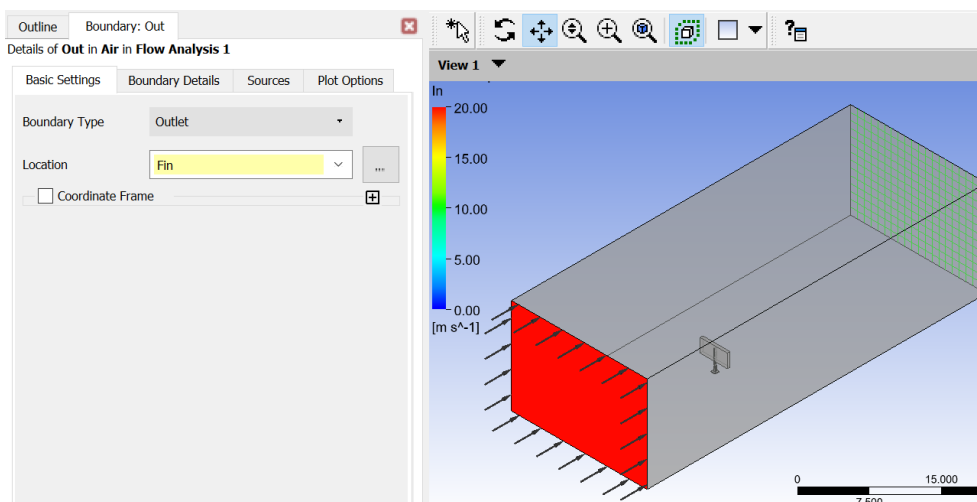


Рисунок 41 – Настройка выходного сечения потока

29.3. Внешние поверхности *Outsides*. Скорректировать информацию на вкладке *Basic Settings\Boundary Type = Symmetry*, *Location = /левая, правая и верхняя плоскости из списка поверхностей, как на рисунке 42*. Подтвердить кнопкой *OK*.

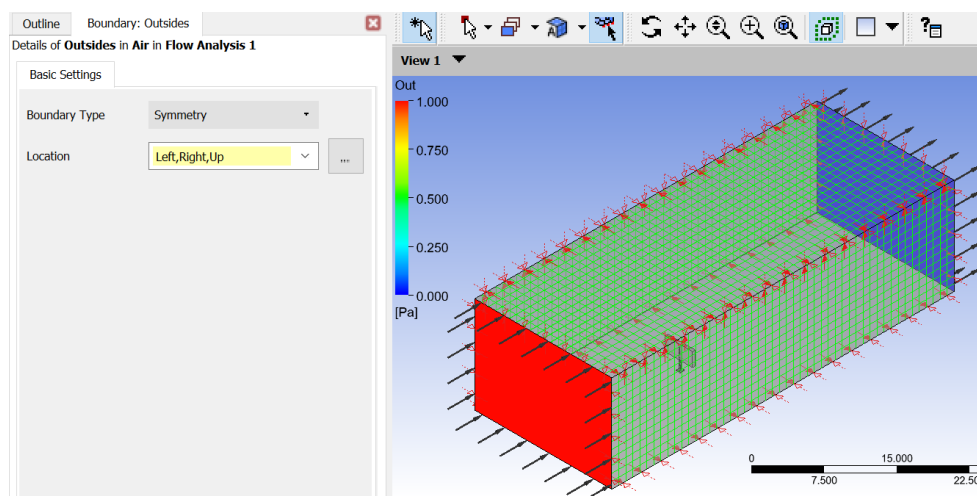


Рисунок 42 – Настройка внешних поверхностей потока

29.4. Грунт *Down*. Скорректировать информацию на вкладке *Basic Settings\Boundary Type = Wall*, *Location = /нижняя плоскость области потока/*. Подтвердить кнопкой *OK*.

29.5. Поверхности с полным торможением *Stop*. Скорректировать информацию на вкладке *Basic Settings\Boundary Type = Wall*, *Location = /4 вертикальные плоскости билборда поперек потока/*. Подтвердить кнопкой *OK*.

29.6. Объект *Domain Default* переименовать в *Sliding*, открыть его для редактирования посредством контекстного меню и убедиться, что на вкладке *Basic Settings* выбран тип границы *Boundary Type = Wall*, а в список *Location* вошли все поверхности, за исключением задействованных в пп. 29.1–29.5. На вкладке *Boundary Details* выбрать *Free Slip Wall*. Подтвердить кнопкой *OK*.

30. Сохранить модель. Включить в отчет изображение области течения со всеми настройками. Закрывать окно Препроцессора CFX-Pre.

#### Выполнение аэродинамического анализа и визуализация результатов

31. Сохранить проект в окне *Workbench*.


32. Открыть контекстное меню (ПКМ) в пакете *Solution* блока *A* и выбрать *Edit...*

33. В окне *Define Run* запустить решение кнопкой *Start Run*. По окончании расчета, при появлении закрыть всплывающее окно *Solver Run Finished Normally*, затем окно *CFX-Solver Manager*.

34. В окне *Workbench* сохранить проект.

35. Открыть контекстное меню пакета *Results* блока *A* и выбрать *Edit...*

36. В окне Постпроцессора *CFD-Post* с помощью инструмента *Location\Plane* создать 4 горизонтальных сечения, при этом в окне детализации на вкладке *Geometry* выбрать базовую плоскость *ZX* и указать расстояние от нее → *Apply*. Расстояния сечений от плоскости *ZX*: 1 м, 1.8 м, 2.4 м, 3 м.

37. Отобразить и включить в отчет распределения давления в каждом из созданных сечений, подобно рисунку 43, а. Для этой цели использовать инструменты *Contour* : на вкладке *Geometry* в списке *Variable* выбрать *Pressure*, а параметру *Location* поставить в соответствие одно из сечений п. 36. При выводе очередной эпюры все остальные следует сделать невидимыми.

38. Аналогичным образом отобразить и включить в отчет поля горизонтальной составляющей (*w*-компоненты) вектора скорости (подобно рисунку 43, б) в четырех горизонтальных сечениях потока.

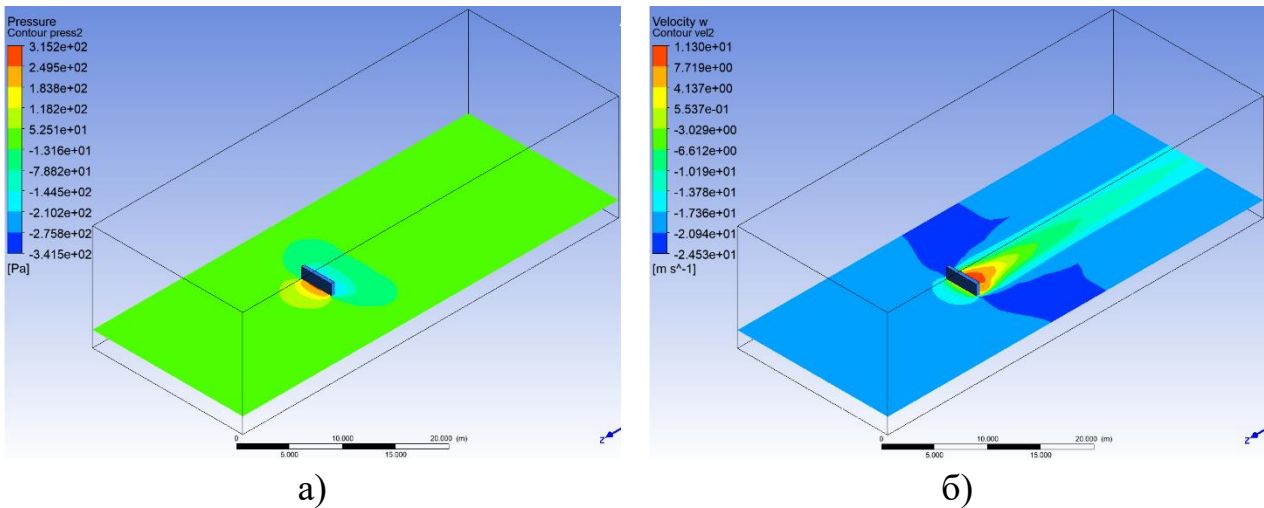




Рисунок 43 – Визуализация результатов аэродинамического анализа

39. Вывести в изометрии и включить в отчет линии тока посредством инструмента *Streamlines* .

40. Анимировать линии тока п. 39. Для этого обратиться к пиктограмме  на инструментальной панели, либо выбрать анимацию в пункте *Tools* главного меню.

41. Закрыть окно Постпроцессора CFD-Post. Сохранить проект в окне Workbench.

### Интеграция задач аэродинамики и структурного анализа

42. В рабочее окно проекта *Project Schematic* добавить блок *B* статического структурного анализа. Переименовать новое задание.

43. Объединить два задания в единый проект. Для этого перетащить мышью пакеты блока *A* в блок *B*, как показано на рисунке 44. Сохранить проект.

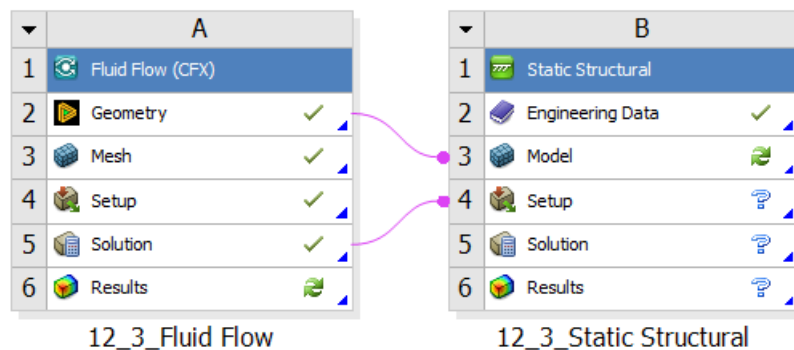


Рисунок 44 – Подключение 2-го задания к проекту

44. Открыть для редактирования пакет *Engineering Data* и включить в проект дополнительные материалы: сталь с обновленными характеристиками, бетон *Concrete* и пластик *PVC* (см. пп. 24–26 ЛР10).

45. Заккрыть вкладку *B2:Engineering Data*. Сохранить проект.

#### Подготовка расчетной модели структурного анализа

46. Открыть для редактирования пакет *Setup* блока *B*.

47. В секции *Geometry* назначить материал каждому из трех тел (список *Material\Assignment* в окне детализации): обновленная сталь для опоры, бетон для верхней части билборда, воздух для области потока. Сохранить модель.

48. В секции *Geometry* отключить видимость области потока и перейти в режим отображения *Zoom to Fit*.

49. Активировать в Дереве секцию *Mesh* и выбрать квадратичный тип КЭ в списке *Defaults\Element Order* окна детализации.


50. Настроить КЭ разбиение билборда, выполнив действия пп. 21.1 – 21.4.

51. Сгенерировать КЭ сетку. Параметры КЭ модели скопировать из раздела *Statistics* окна детализации и включить в отчет. Сохранить модель.

52. Активировать в Дереве секцию *Static Structural* для настройки нагрузок и параметров анализа.



53. Открыть в главном меню пункт *Environment* и с помощью инструмента *Supports\Fixed* жестко закрепить основание модели.

54. Включить гравитацию посредством инструмента *Inertial\Standard Earth Gravity*; в разделе *Scope\Geometry* окна детализации выбрать оба тела; в разделе *Definition* указать отрицательное направление вдоль оси *Y*.


55. Выделить в Дереве секцию *Static Structural\Imported Load* и с помощью контекстного меню включить давление. В графическом окне выбрать мышью все поверхности билборда, исключая плоскость основания (всего 12) и подтвердить *Apply* в строке *Scope\Geometry* окна детализации объекта *Imported Pressure*. В контекстном меню этого объекта выбрать  *Import Load*. Отобразить и включить в отчет картину импортированного давления. Сохранить модель.

56. Настроить вывод результатов анализа. Для этого, находясь в секции *Static Structural\Solution*, открыть в главном меню пункт *Solution*. Раскрыть список *Results* и выбрать полные и координатные перемещения (*Total & Directional Deformation*), эквивалентные и нормальные напряжения (*Equivalent & Normal Stress*), а также 1 и 3-е главные напряжения (*Maximum & Minimum Principal Stress*). Включить в перечень результатов коэффициент запаса по пределу текучести: *Toolbox\Stress Tool*. Сохранить модель.

### Выполнение анализа и визуализация результатов

57. В секции *Geometry* исключить из анализа тело области потока  *Suppress Body*. Запустить решение *Solve* . По окончании расчета развернуть в секции *Static Structural* список *Solution*.

58. Вывести в изометрии и включить в отчет поля перемещений и напряжений (координатные перемещения и нормальные напряжения – только вдоль Z).

59. На виде сверху создать след секущей плоскости вдоль вертикальной оси симметрии, используя инструмент  *Section Plane*. Отобразить в данном сечении эквивалентные напряжения. Включить изображение в отчет.

60. Закрыть окно модуля *Mechanical*. Сохранить проект. Выйти из *Ansys Workbench*.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие величины подлежат определению в ходе аэродинамического анализа?

2. Как определяются границы расчетной области течения при внешнем обтекании твердой преграды воздушным потоком?

3. Как обеспечивается согласование размеров КЭ взаимодействующих объектов?

4. Какие подготовительные операции предшествуют аэродинамическому анализу? В каком пакете они выполняются?

5. Как формулируются условия течения на внешних границах воздушного потока?

6. Каким образом обеспечивается доступ к результатам аэродинамического анализа?

7. Как обеспечивается связь между задачами газодинамики и структурного анализа в рамках единого проекта?

8. Какой вид нагрузки в задаче структурного анализа импортируется из аэродинамического анализа?



## 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. Инженерный анализ в ANSYS Worekbench: учеб. посо-бие / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271с.
3. Любимов, А. К. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство / А. К. Любимов – ред. – 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: учебник / А. А. Черепашков, Н. В. Носов. – Волгоград: ИН-ФОЛИО, 2009. – 591 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 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 -МС/м \_\_\_\_\_

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

Калининград 20\_\_

Локальный электронный методический материал

Владимир Георгиевич Сукиасов

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Редактор С. Кондрашова  
Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 3,8. Печ. л. 3,7.

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