

## Лабораторная работа №2

### Расчет элементов конструкции колесных машин на устойчивость

#### 1. Введение

Устойчивость упругих систем – это свойство упругих систем возвращаться к состоянию равновесия после малых отклонений их из этого состояния. Устойчивость является необходимым условием для любой инженерной конструкции. Потеря устойчивости может явиться причиной разрушения конструкции. Потеря устойчивости при определённых видах нагружения характерна для таких элементов, входящих в состав конструкции, как стержни (продольный изгиб), пластинки и оболочки (выпучивание).

Наиболее типичными примерами элементов конструкции КМ, для которых необходим расчет на устойчивость, являются: тяги рулевого управления, тяги различных приводов (переключения коробки передач, переключения раздаточной коробки), штоки гидроцилиндров и пневмокамер, кузовные элементы. Следует отметить, что чаще всего стремятся избежать потери устойчивости, однако есть случаи, когда это явление намеренно используется. Например, для улучшения пассивной безопасности автомобиля в силовую схему кузова вводятся конструктивные элементы, которые при столкновении теряют устойчивость, пластически деформируются и поглощают значительную энергию удара (рис. 1).



Рис. 1. Потеря устойчивости лонжерона кузова автомобиля: *а* – лонжерон до столкновения; *б* – лонжерон после столкновения

В программном комплексе ANSYS для решения задач устойчивости существует два метода определения критических нагрузок, при воздействии которых конструкция становится нестабильной: линейный и нелинейный.

Линейный анализ устойчивости (*Eigenvalue Buckling Analysis*), основанный на вычислении собственных значений, предсказывает значение критических нагрузок для идеальных линейных моделей. Однако наличие погрешностей формы и нелинейностей препятствуют для большинства реальных конструкций осуществлению теоретической потери устойчивости. Поэтому исследование устойчивости при помощи собственных значений в общем случае не должно использоваться для проверочных расчетов элементов конструкции колесных машин.

Нелинейный анализ устойчивости (*Nonlinear buckling analysis*) обычно обеспечивает более точное решение и поэтому может быть рекомендован при проектировании и исследовании элементов конструкции КМ. Данный метод использует нелинейный статический расчет с постепенным увеличением нагрузок для определения такого их уровня, при котором модель становится нестабильной. Использование нелинейного расчета устойчивости позволяет включать в модель такие особенности, как начальные отклонения формы, пластические свойства материала, зазоры и т.д.

Основной подход при нелинейном анализе устойчивости состоит в выполнении статического нелинейного анализа с последовательно возрастающей нагрузкой. При этом фиксируется критическая нагрузка, при которой конструкция теряет устойчивость.

В данной лабораторной работе проводится линейный и нелинейный анализ устойчивости стержня и оболочки на примере рулевой тяги и крыши грузового автомобиля.

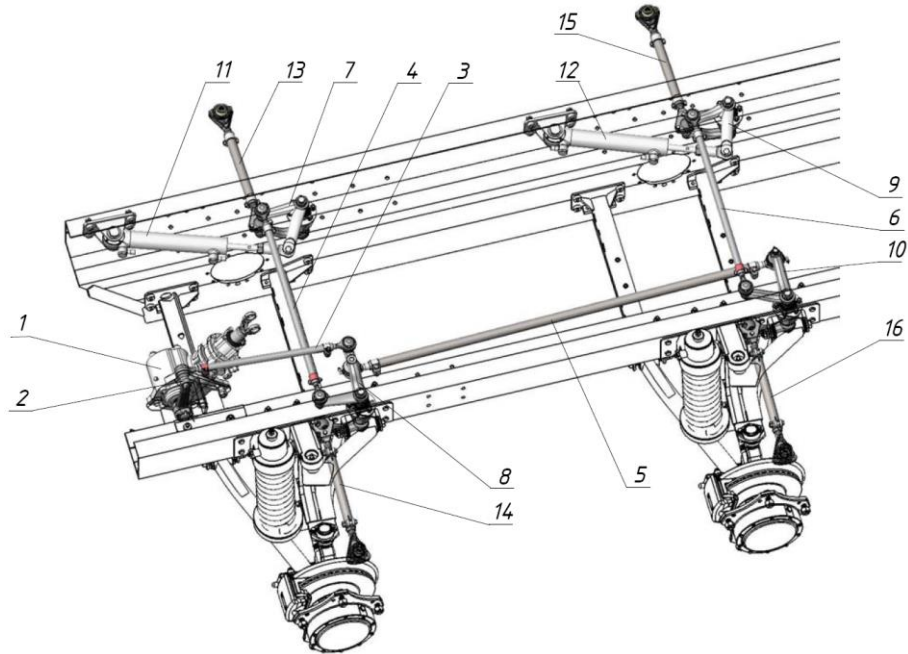


Рис. 2. Схема рулевого управления колесного вездеходного транспортного средства:  
 1 – рулевой механизм; 2 – сошка; 3, 5 – продольные тяги; 4, 6 – поперечные тяги;  
 7, 8, 9, 10 – опоры с рычагами; 11, 12 – гидроцилиндры усилителя руля;  
 13, 14, 15, 16 – колесные тяги

## 2. Линейный анализ устойчивости рулевой тяги

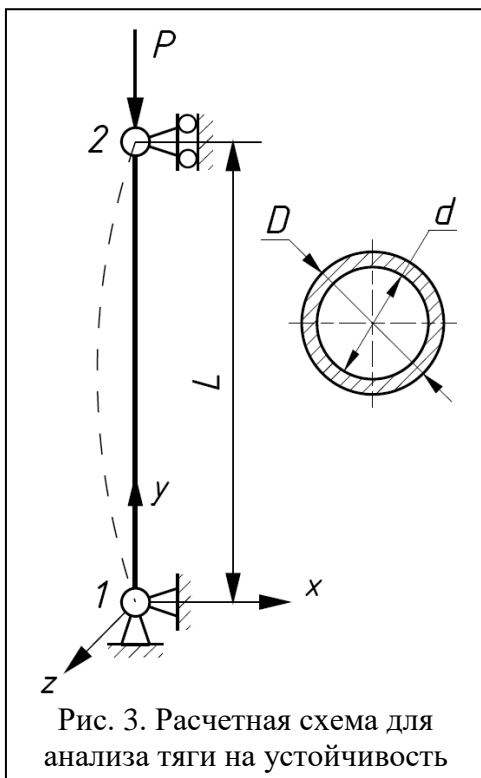


Рис. 3. Расчетная схема для анализа тяги на устойчивость

На рис. 2 приведена компоновочная схема рулевого управления вездеходного транспортного средства. Проведем линейный анализ устойчивости для передней поперечной тяги (4 на рис. 2). Тяга имеет длину по центрам шарниров  $L = 0,78$  м; ее центральная часть выполнена из стальной трубы наружным диаметром  $D = 0,030$  м и внутренним диаметром  $d = 0,02$  м (рис. 3). Максимальная продольная сила, действующая на тягу, может быть определена исходя из максимального усилия на руле при неработающем гидро-

усилителе, которое согласно ГОСТ 21398 составляет 490 Н. Зная диаметр рулевого колеса, передаточное отношение рулевого механизма и привода, можно определить продольную силу, которая в данном случае составляет  $P = 28950$  Н.

Площадь поперечного сечения тяги равна:

$$F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(0,030^2 - 0,02^2)}{4} = 3,927 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Момент инерции поперечного сечения тяги определяется по формуле:

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi(0,030^4 - 0,02^4)}{64} = 3,191 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Определим критическую силу аналитическим методом с использованием формулы Эйлера:

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu L)^2},$$

где  $E$  – модуль упругости материала тяги (для стали  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па),  $\mu$  – коэффициент длины, зависящий от способа закрепления (в случае двух шарниров  $\mu = 1$ ).

Для рассматриваемой тяги значение критической силы, вызывающей потерю устойчивости, составляет:

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 3,191 \cdot 10^{-8}}{0,78^2} = 103,52 \text{ кН}.$$

Таким образом, запас по устойчивости, который, согласно [1], должен быть больше 1,5, для рассматриваемой тяги составляет:

$$n = \frac{P_{\text{кр}}}{P} = 3,576.$$

Анализ устойчивости тяги в ANSYS проводится в следующем порядке. Сначала проводится статический анализ конструкции с приложением внешней нагрузки (обычно единичной) и с включенной опцией учета эффектов предварительных напряжений (prestress effects), необходимой для даль-

нейшего анализа устойчивости. Затем проводится собственно анализ устойчивости, в ходе которого определяется значение критической силы и форма потери устойчивости.

1. Запуск ANSYS и задание имени файла для нового анализа: **Utility Menu>File>Change Jobname**. Задашь имя файла: link1.db.

2. Вход в модуль препроцессора: **Main Menu>Preprocessor**.

3. Построение вертикального отрезка с точкой в начале координат.

3.1. Создание конечных точек отрезка: **Modeling>Create>Keypoints>**

**In Active CS...**

Keypoint number	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0	0.78	0

3.2. Создание отрезка: **Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line...**

и с помощью мышки указать ранее созданные конечные точки отрезка.

4. Выбор типа элемента и задание свойств материала и характеристик сечения тяги. Поскольку задача плоская, то для анализа применяем двухмерный балочный элемент BEAM3.

**Element Type>Add / Edit / Delete... Add...**, в появившемся диалоговом окне выбрать тип конечного элемента **Beam / 2D elastic (BEAM3)**, ОК, закрыть диалоговое окно.

**Material Props>Material Model...**, в появившемся диалоговом окне Define Material Model Behavior выбрать **Structural/Linear/Elastic/Isotropic...** EX=2e11 (Модуль Юнга), PRXY=0.3 (коэффициент Пуассона для стали), ОК, закрыть диалоговое окно.

**Real Constants> Add / Edit / Delete... Add...**, ОК, в появившемся диалоговом окне Real Constants for BEAM3 задать характеристики сечения тяги:

AREA = 3.927e-4 – площадь поперечного сечения,

IZZ = 3.191e-8 – момент инерции поперечного сечения,

HEIGHT = 0.03 – высота поперечного сечения (диаметр), ОК, закрыть диалоговое окно.

## 5. Разбиение на конечные элементы.

5.1. Задать число конечных элементов (100) на отрезке: **Meshing>MeshTool... Size Controls: Global Set ... NDIV=100**, ОК.

5.2 Разбить отрезок на конечные элементы: нажать в диалоговом окне MeshTool кнопку **Mesh**, нажать кнопку **Pick All** в диалоговом окне Mesh Lines.

## 6. Вход в модуль решателя: **Main Menu>Solution**.

### 7. Задание граничных условий.

7.1. В первой точке отрезка задать ограничение на перемещения вдоль осей  $x$  и  $y$ : **Define Loads>Apply>Structural> Displacement>On Keypoints ...**, выбрать первую точку отрезка, ОК, указать в диалоговом окне значение перемещения VALUE = 0 вдоль степеней свободы UX, UY.

7.2. Во второй точке отрезка задать ограничение на перемещение вдоль оси  $x$ : **Define Loads>Apply>Structural> Displacement>On Keypoints ...**, выбрать вторую точку отрезка, ОК, указать в диалоговом окне значение перемещения VALUE = 0 вдоль степени свободы UX.

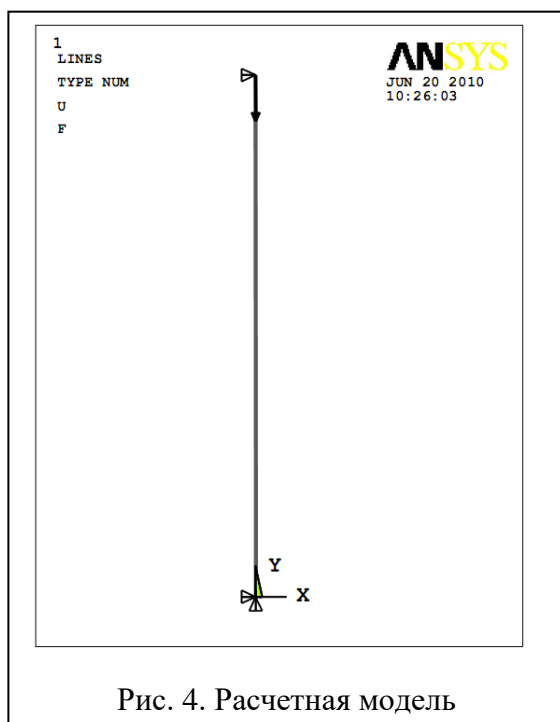


Рис. 4. Расчетная модель

7.3. Во второй точке задать сжимающую единичную силу: **Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment > On Keypoints ...**, выбрать вторую точку отрезка, ОК, указать в диалоговом окне значение VALUE = -1 для силы FY.

В результате проведенных операций была сформирована расчетная модель (рис. 4), готовая для проведения статического анализа и затем анализа устойчивости.

8. Задание типа анализа: **Analysis Type>New Analysis>Static**, ОК. Как отмечалось выше, статический расчет необходимо проводить с включенной опцией учета эффектов предварительных напряжений (prestress effects). Для этого следует выполнить следующую команду: **Analysis Type>Sol'n Controls** и в появившемся диалоговом окне отметить опцию Calculate prestress effects.

9. Проведение статического анализа: **Solve>Current LS...**, ОК. Закрыть окно с сообщением. По окончании расчета ANSYS выдаст сообщение Solution is done!

10. Проведение линейного анализа устойчивости.

10.1. Выбрать тип анализа: **Analysis Type>New Analysis>Eigen Buckling**, ОК. Закрыть окно с предупреждением.

10.2. Задать число форм потери устойчивости для анализа: **Analysis Type>Analysis Option...**, NMODE = 1, ОК.

10.3. Провести анализ: **Solve>Current LS...**, ОК. Закрыть окно с сообщением. По окончании расчета ANSYS выдаст сообщение Solution is done!

11. Просмотр результатов. Значение критической силы определяется как произведение заданной в статическом анализе нагрузки и множителя LOAD MULTIPLIER, который вычисляется в результате анализа устойчивости.

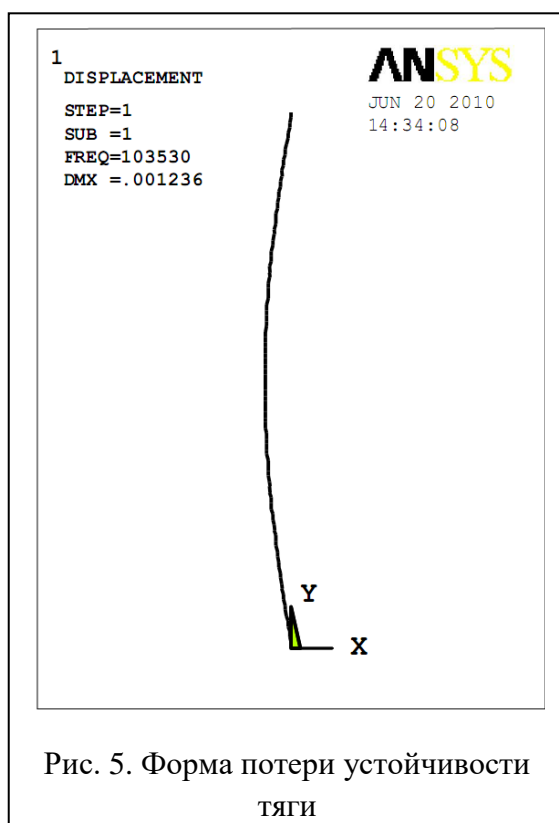


Рис. 5. Форма потери устойчивости тяги

Значение множителя LOAD MULTIPLIER выводится в окне ANSYS Output Window в конце анализа на устойчивость. Для рассчитываемой тяги этот множитель составляет 103530,27. А поскольку значение сжимающей силы при статическом анализе было задано равным 1, то значение этого множителя равно значению критической силы, вызывающей потерю устойчивости тяги. Сравнение с аналитическим решением, полученным ранее, да-

ет ошибку численного расчета менее 0,01%.

Форму потери устойчивости (рис. 5) можно посмотреть, используя команды постпроцессора: **Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, Main Menu>General Postproc>Plot Results> Deformed Shape.**

### **3. Нелинейный анализ устойчивости рулевой тяги**

Для той же рулевой тяги проведем нелинейный анализ устойчивости, воспользовавшись полученной ранее расчетной моделью. Как отмечалось выше, в ходе нелинейного анализа нагрузка постепенно увеличивается. При этом должна быть включена опция учета больших перемещений. В данном виде анализа могут быть учтены пластические свойства материала, контактные взаимодействия и другие виды нелинейностей. При анализе результатов определяется критическая сила, при которой перемещения участков конструкции начинают очень быстро расти, то есть конструкция переходит в неустойчивое состояние.

Поскольку задача нелинейная ANSYS ищет решение с помощью итераций по методу Ньютона-Рафсона. Настоятельно рекомендуется при нелинейном анализе устойчивости включать опцию автоматического выбора шага для этого метода, что гарантирует наиболее точное определение критической силы.

Для того чтобы используемая расчетная модель (см. рис. 4) смогла потерять устойчивость при действии сжимающей силы, необходимо в середине тяги приложить небольшое возмущение в направлении  $x$ .

Таким образом, нелинейный анализ устойчивости тяги в ANSYS проводится в следующем порядке.

1. Вход в модуль решателя: **Main Menu>Solution.**
2. Задание типа анализа: **Analysis Type>New Analysis>Static, OK.**
3. Задание опций нелинейного анализа: **Analysis Type>Sol'n Control...** В открывшемся диалоговом окне необходимо отметить следующие опции (рис. 6):

Large Displacement Static – включить учет больших перемещений;

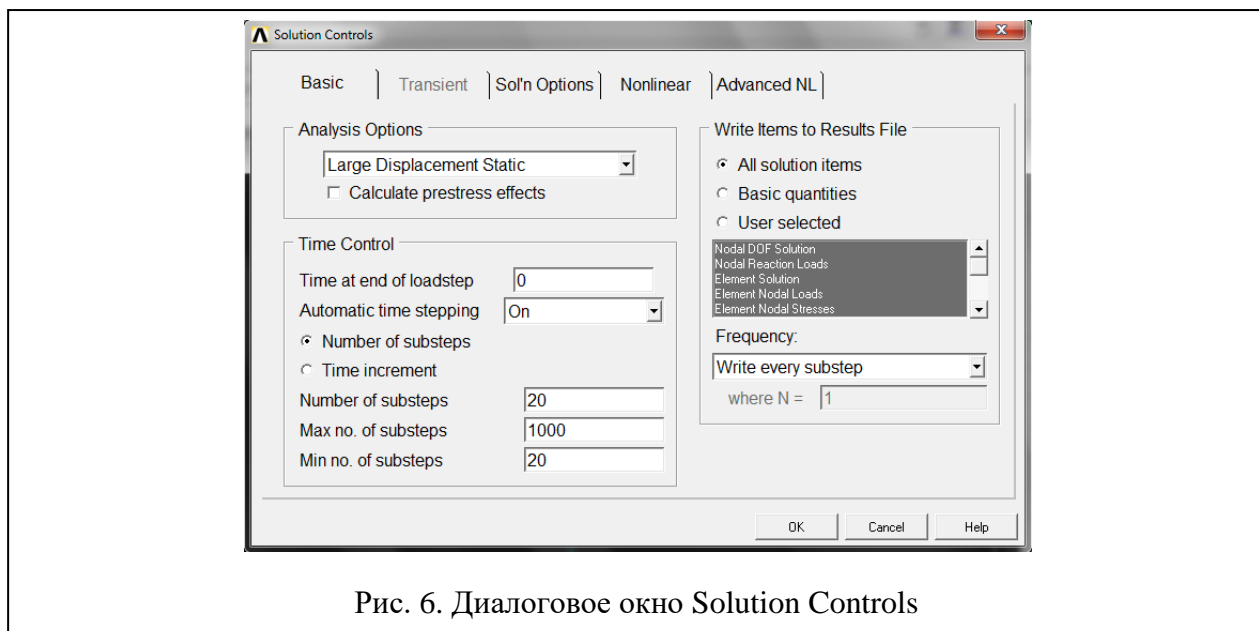


Рис. 6. Диалоговое окно Solution Controls

Automatic time stepping, On – включить автоматический выбор шага;

Number of substeps, 20 – заданное число итераций (в данном случае определяет величину начального шага);

Max no. of substeps, 1000 – максимальное число итераций, при достижении которого фиксируется отсутствие сходимости решения;

Min no. of substeps 20 – минимальное число итераций (ограничивает величину максимального шага);

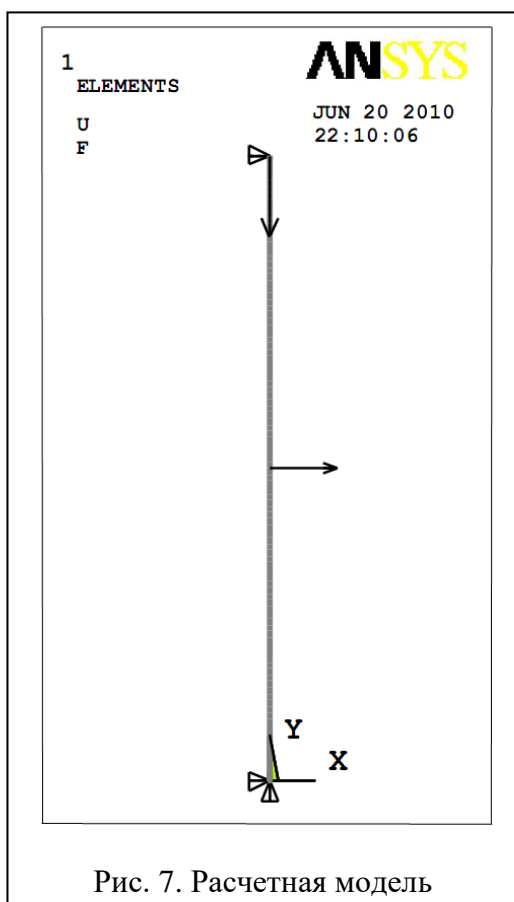
Write every substeps – записывать результаты расчета для каждой итерации.

4. Задание сжимающей нагрузки 105 кН: **Define Loads>Apply>Structural> Force/Moment> On Keypoints ...**, выбрать вторую точку отрезка, ОК, указать в диалоговом окне значение VALUE = -105000 для силы FY.

5. Задание возмущающей нагрузки 50 Н, приложенной в середине тяги (узел 52): **Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes ...**, указать в диалоговом окне номер узла 52, ОК, указать в диалоговом окне значение VALUE = 50 для силы FX.

В результате проведенных операций была сформирована расчетная модель (рис. 7), готовая для проведения нелинейного анализа устойчивости.

6. Проведение нелинейного анализа: **Solve>Current LS...**, ОК. Закрыть окно с сообщением. По окончании расчета ANSYS выдаст сообщение **Solution is done!**



7. Просмотр и анализ результатов. Для определения критической силы необходимо построить график зависимости перемещения узла 52 в середине тяги (прогиб) от сжимающей силы, которая по абсолютному значению равна силе реакции в вертикальном направлении в узле 2 (нижняя точка тяги).

7.1. Вход в модуль построителя POST26: **Main Menu>TimeHist Postpro...**

7.2. В верхней части открывшегося окна нажать на кнопку «+» (Add Data), далее последовательно: **Nodal Solution>DOF Solution>X-Component of displacement**, в поле **Variable Name** ввести имя переменной **Dis-**

**placement**, ОК, 52, ОК.

7.3. Нажать на кнопку «+» (Add Data), далее последовательно: **Nodal Solution>Reaction Forces>Structural Forces>Y-Component of force**, в поле **Variable Name** ввести имя переменной **Force**, ОК, 2, ОК. В результате этих действий в диалоговом окне в списке доступных переменных появятся две новые переменные **Displacement** и **Force** (рис. 8).

7.4. Установить метку **X-Axis** напротив переменной **Force**, выделить мышкой переменную **Displacement**, нажать кнопку «Graph Data». В результате в главном окне ANSYS будет построен график (рис. 9, а) зависимости прогиба в центральной части тяги от сжимающей силы.

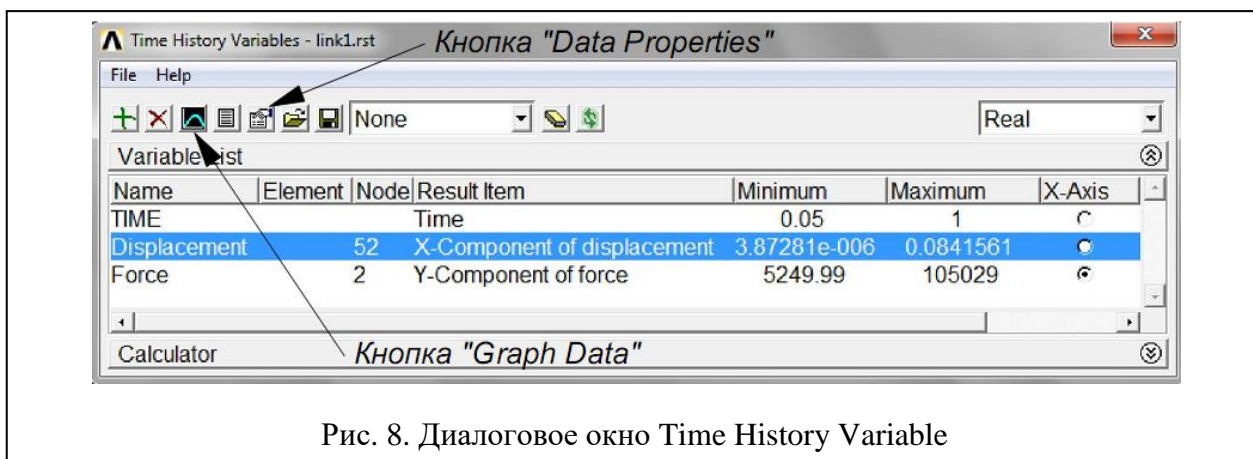
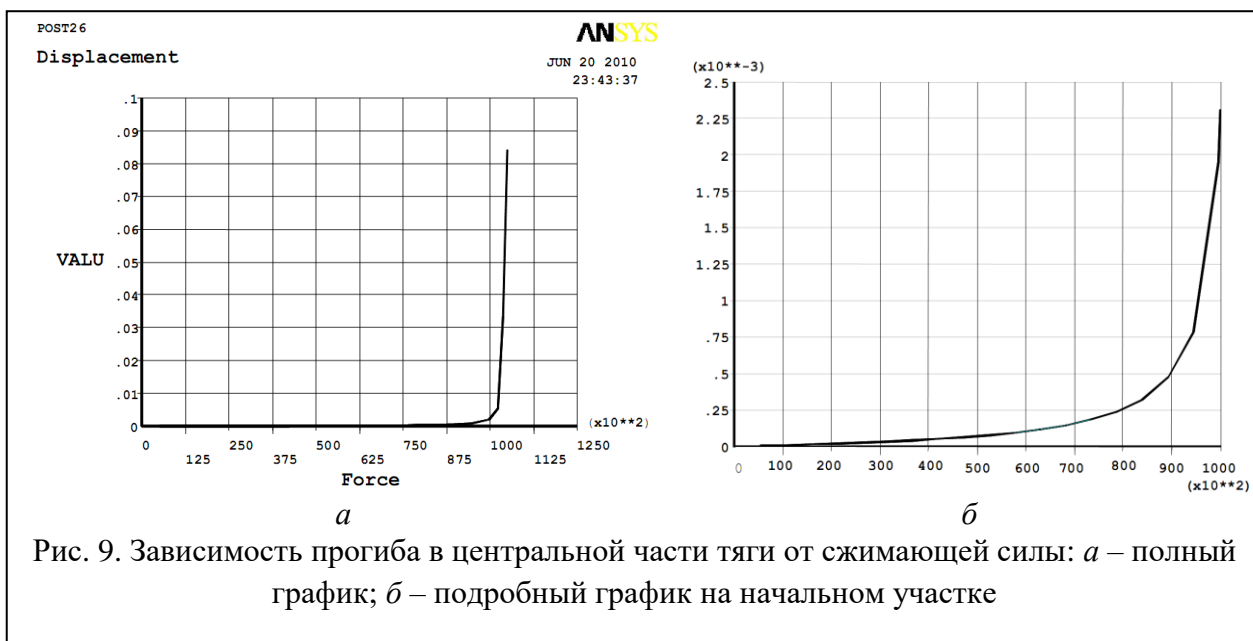


Рис. 8. Диалоговое окно Time History Variable

Используя кнопку «Data Properties», можно построить этот график в диапазоне изменения сжимающей нагрузки от 0 до 100 кН (рис. 9, б). Анализируя график, можно отметить, что в диапазоне от 80 кН до 90 кН при увеличении сжимающей силы на 10 кН прогиб тяги увеличивается с 0,25 мм до 0,5 мм, т.е. в два раза. Следовательно, можно принять, что значение критической силы, вызывающей потерю устойчивости, лежит в диапазоне 80...90 кН.



#### 4. Анализ устойчивости крыши кабины грузового автомобиля

Для выпуклых оболочек часто характерна потеря устойчивости, сопровождающаяся, так называемым, «перескоком», когда оболочка из одного устойчивого состояния равновесия «перескакивает» в другое устойчивое состояние. В ряде случаев это явление может быть полезно, если «перескок»

происходит в упругой зоне. Однако часто «перескок» в другое устойчивое состояние характеризуется появлением зон пластических деформаций в оболочке и поэтому крайне нежелателен, так как обратный переход в исходное состояние становится невозможным. Поэтому анализ устойчивости тонкостенных оболочек, входящих в состав автомобильного кузова или кабины является необходимым при проектировании автомобиля.

Проведем анализ устойчивости крыша кабины грузового автомобиля Урал-4320 (рис. 10), которая представляет собой штампованную тонкостенную деталь (толщина листа – 1 мм), имеющую кривизну в двух направлениях, отбортовку по периметру, несколько продольных зигов (выштамповок) и отверстия для креплений фонарей.



Одним из воздействий на крышу автомобиля, приводящим к потере устойчивости при нормальной эксплуатации, является давление от снега, скапливающегося на крыше при безгаражном хранении. Для определения этого давления можно воспользоваться данными, приведенными в СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздей-

ствия» [2] для снеговой нагрузки на крыши здания на территории России. Согласно этому документу, на территории России выделяется 6 снеговых районов, в которых значение давления снегового покрова на крышу меняется от 0,5 кПа до 2,5 кПа. Поскольку автомобиль Урал-4320 предназначен для эксплуатации в различных климатических и географических районах, целесообразно для расчетов принять максимальное значение снеговой нагрузки, т.е. 2,5 кПа.

При анализе устойчивости оценим необходимость введения в конструкцию крыши зигов. Для этого проведем последовательно линейный ана-

лиз устойчивости крыши без зигов (файл геометрии Ural\_roof\_smooth.IGS) и с зигами (файл геометрии Ural\_roof.IGS) в программном комплексе ANSYS Workbench 12.1.

#### 4.1 Линейный анализ устойчивости крыши без зигов

Для экономии вычислительных ресурсов в первом приближении можно принять допущение о симметричности крыши. Тогда в расчетной схеме можно ограничиться рассмотрением ее половинной геометрической моделью (рис. 11), которая хранится в файле Ural\_roof\_smooth.IGS. Геометрическая модель, созданная в пакете SolidWorks, включает в себя одну составную поверхность.



Как и в случае с рулевой тягой, при линейном анализе крыши на устойчивость сначала проводится ее статический анализ с приложением единичной внешней нагрузки (давления). Затем, с использованием результатов этого расчета,

проводится собственно анализ устойчивости, в ходе которого определяется значение критического давления и форма потери устойчивости крышей.

1. Запуск ANSYS Workbench 12.1 и импортирование геометрии из внешнего файла.

1.1. Создать в поле схемы проекта новый расчет – статический расчет: **Analysis Systems > Static Structural (ANSYS)**; перетащить мышкой выбранный компонент в поле схемы проекта; задать имя компонента: «Статический анализ».

1.2. В новом компоненте из контекстного меню для ячейки **Geometry** (вызывается щелчком правой кнопки мышки) выбрать пункт **Import Geometry > Browse...** и указать расположение файла Ural\_roof\_smooth.IGS.

2. Войти в режим редактирования модели: из контекстного меню для ячейки **Model** выбрать пункт **Edit...** В открывшемся окне (рис. 12) с левой стороны вверху располагается панель дерева проекта (Outline), содержащая ключевые компоненты расчета. Под нею располагается панель параметров (Details of ...), в которой задаются параметры и опции для выбранного компонента. Справа располагается графическое окно с моделью.

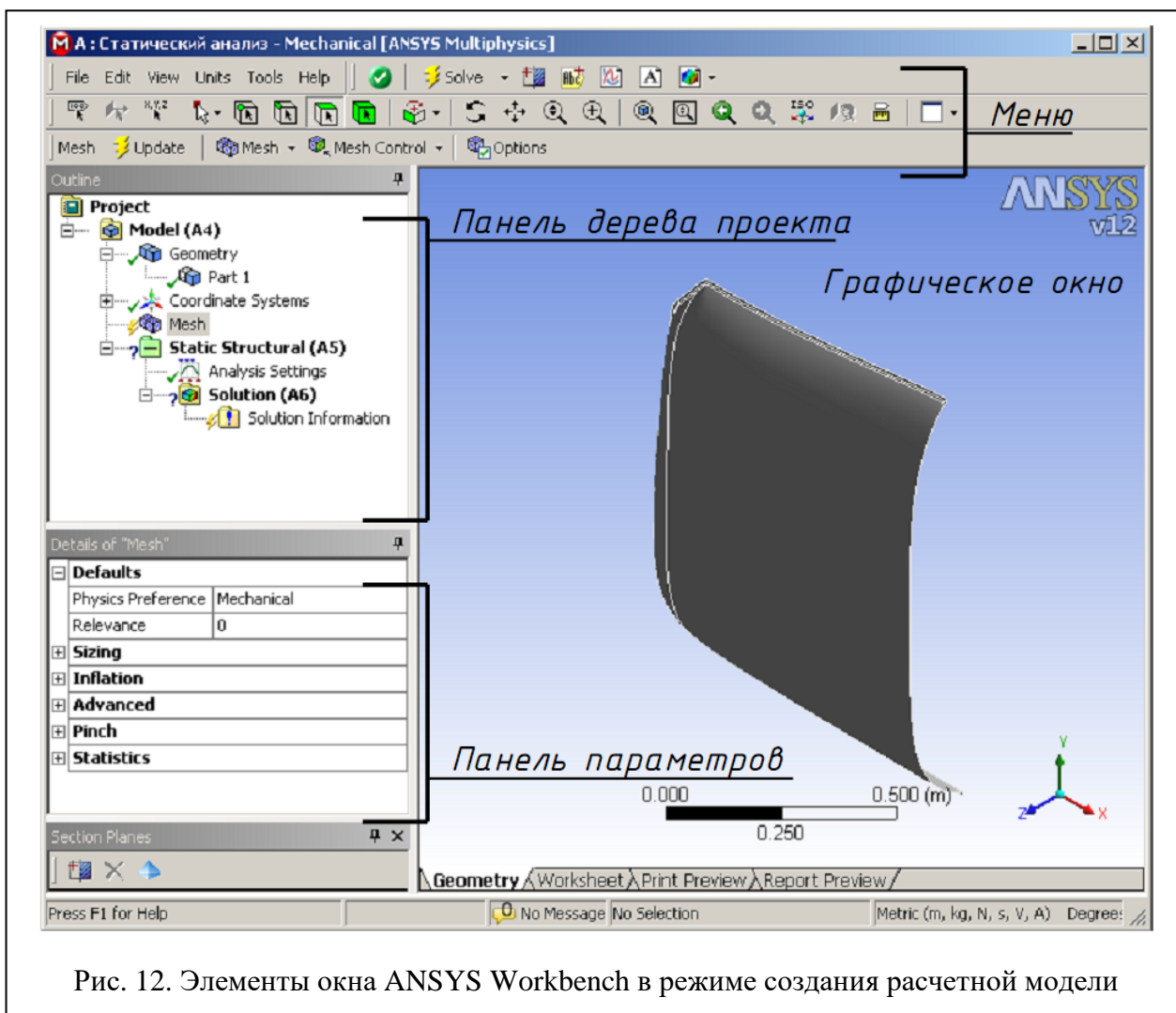


Рис. 12. Элементы окна ANSYS Workbench в режиме создания расчетной модели

3. Сохранить проект: **File > Save Project...** Задать имя файла: **Ural\_roof\_smooth.wbpj**. В ходе работы рекомендуется сохранять проект после каждой трудоемкой операции.

4. Задать толщину оболочки крыши: **Outline > Model (A4) > Geometry > Part 1; Details of "Part 1" > Thickness > 0,001**.

5. Создание конечно-элементной сетки.

5.1. Задать метод разбиения на конечные элементы (равномерная прямоугольная сетка): из контекстного меню для элемента **Mesh** выбрать **Insert > Method ...**, указать в графическом окне любую поверхность крыши; **Details of “Automatic Method” > Geometry > Apply; Details of “Automatic Method” > Method > Uniform Quad.**

5.2. Задать характерный размер элемента (0,02 м): **Details of “Uniform Quad Method ” > Element Size > 0,02.**

5.3. Провести разбиение поверхности на конечные элементы: из контекстного меню для элемента **Mesh** выбрать **Generate Mesh**. Результат разбиения поверхности крыши на конечные элементы отобразится в графическом окне. Данные о количестве созданных узлов и элементов можно посмотреть в панели параметров: **Details of «Mesh» > Statistics.**

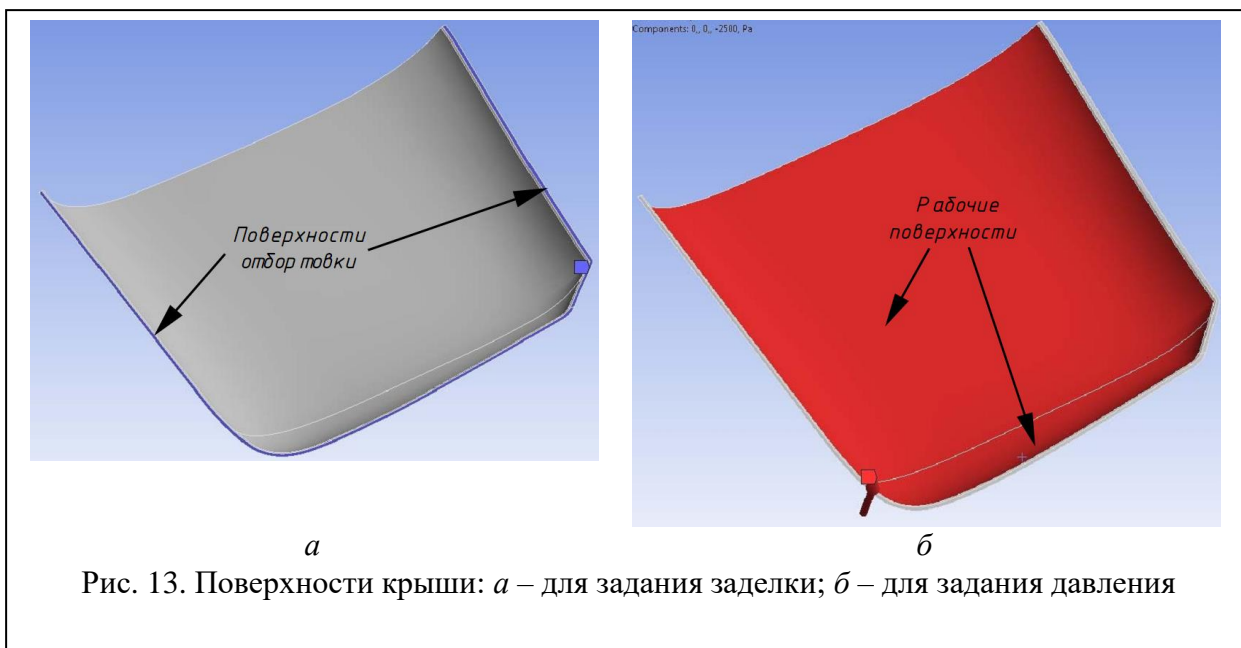
6. Задание граничных условий и нагрузок.

6.1. Задать заделку по поверхностям отбортовки (рис. 13, а): из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Insert > Fixed Support**; выбрать две поверхности отбортовки, удерживая клавишу CTRL; **Details of «Fixed Support» > Geometry > Apply.**

6.2. Задать условие симметричности: из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Insert > Displacement**; выбрать 5 ребер поверхности, лежащих в плоскости симметрии, удерживая клавишу CTRL; **Details of «Displacement» > Geometry > Apply; Details of «Displacement» > X Component > 0.**

6.3. Задать единичное давление на рабочие поверхности крыши (рис. 13, б): из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Insert > Pressure**; выбрать две рабочие поверхности крыши, удерживая клавишу CTRL; **Details of «Pressure» > Geometry > Apply; Details of «Pressure» > Define By > Components; Details of «Pressure» > Z Component > -1.**

7. Задать перечень необходимых для просмотра результатов расчета (в данном случае ограничимся просмотром эквивалентных напряжений): из



контекстного меню для элемента **Solution (A6)** выбрать **Insert > Stress > Equivalent (von-Mises)**.

8. Выполнить статический анализ: из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Solve**. После успешного завершения расчета в дереве проекта около элемента **Solution (A6)** появится зеленая «галочка». Просмотреть эквивалентные напряжения, возникающие при действии единичной нагрузки, можно в графическом окне при выделении в дереве проекта элемента **Equivalent Stress**.

9. Проведение линейного анализа устойчивости.

9.1. Перейти в окно со схемой проекта. Создать в поле схемы проекта новый расчет – расчет на устойчивость с наследованием результатов проведенного статического расчета: **Analysis Systems > Linear Buckling (ANSYS)**; перетащить мышкой (удерживая нажатой левую кнопку) выбранный компонент в поле схемы проекта, отпустить левую кнопку мышки над ячейкой **Solution** компонента «Статический анализ». В результате этих действий поле схемы проекта будет выглядеть аналогично рис. 14.

9.2. Перейти в окно редактирования модели, в котором появилась новая ветка **Linear Buckling (B5)**. Добавить перемещения элементов крыши для просмотра формы потери устойчивости в конце расчета: из контекстного меню для элемента **Solution (B6)** выбрать **Insert > Deformation > Total**.

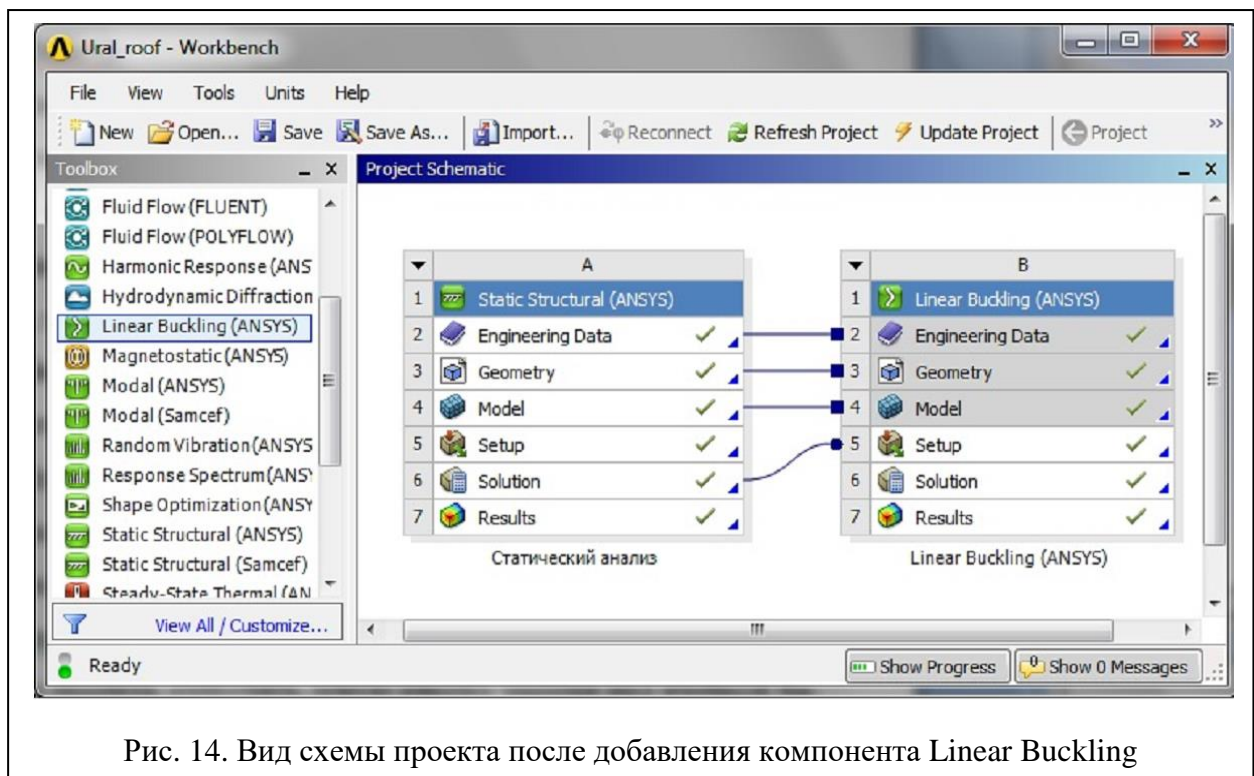


Рис. 14. Вид схемы проекта после добавления компонента Linear Buckling

9.3. Выполнить линейный анализ устойчивости: из контекстного меню для элемента **Linear Buckling (B5)** выбрать **Solve**. После успешного завершения расчета в дереве проекта около элемента **Solution (B6)** появится зеленая «галочка».

10. Проанализировать результаты расчета и определить критическое значение давления, при котором возникает потеря устойчивости крыши: выделить элемент в дереве проекта **Linear Buckling (B5) > Solution (B6) > Total Deformation**. При этом в графическом окне отобразится форма потери устойчивости крыши, а в панели параметров **Details of “Total Deformation”** в ячейке **Results > Load Multiplier** отобразиться значение **1169**, которое представляет собой критическое значение давления, выраженное в Па.

Поскольку это значение меньше, чем максимальное давление от снеговой нагрузки (2,5 кПа), то данная конструкция крыши не проходит по устойчивости, и поэтому требуется введение зигов для увеличения жесткости крыши.

## 4.2 Линейный анализ устойчивости крыши с зигами

Половинная геометрическая модель крыши (рис. 15), хранится в файле Ural\_roof.IGS. Процесс анализа на устойчивость крыши с зигами аналогичен процессу анализа на устойчивость крыши без зигов.

1. Создание нового проекта и импортирование геометрии из внешнего файла.



Рис. 15. Геометрическая модель крыши с зигами

1.1. В окне со схемой проекта создать новый проект: **File > New**. Создать в поле схемы проекта новый расчет – статический расчет: **Analysis Systems > Static Structural (ANSYS)**; перетащить мышкой выбранный компонент в поле схемы проекта; задать имя

компонента: «Статический анализ».

1.2. В новом компоненте из контекстного меню для ячейки **Geometry** (вызывается щелчком правой кнопки мышки) выбрать пункт **Import Geometry > Browse...** и указать расположение файла Ural\_roof.IGS.

2. Войти в режим редактирования модели: из контекстного меню для ячейки **Model** выбрать пункт **Edit....**

3. Сохранить проект: **File > Save Project...** Задать имя файла: Ural\_roof.wbpj.

4. Задать толщину оболочки крыши: **Outline > Model (A4) > Geometry > Part 1; Details of “Part 1” > Thickness > 0,001**.

5. Создание конечно-элементной сетки.

5.1. Задать метод разбиения на конечные элементы (равномерная прямоугольная сетка): из контекстного меню для элемента **Mesh** выбрать **Insert > Method ...**, указать в графическом окне любую поверхность крыши; **Details**

of “Automatic Method” > Geometry > Apply; Details of “Automatic Method” > Method > Uniform Quad.

5.2. Задать характерный размер элемента (0,02 м): **Details of “Uniform Quad Method ” > Element Size > 0,02.**

5.3. Провести разбиение поверхности на конечные элементы: из контекстного меню для элемента **Mesh** выбрать **Generate Mesh**. Результат разбиения поверхности крыши на конечные элементы отобразиться в графическом окне.

6. Задание граничных условий и нагрузок.

6.1. Задать заделку по поверхностям отбортовки (см. рис. 13, а): из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Insert > Fixed Support**; выбрать две поверхности отбортовки, удерживая клавишу CTRL; **Details of «Fixed Support» > Geometry > Apply.**

6.2. Задать условие симметричности: из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Insert > Displacement**; выбрать 12 ребер поверхности, лежащих в плоскости симметрии, удерживая клавишу CTRL; **Details of «Displacement» > Geometry > Apply; Details of «Displacement» > X Component > 0.**

6.3. Задать единичное давление на рабочие поверхности крыши, включая поверхности зигов: из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Insert > Pressure**; выбрать 48 рабочих поверхностей крыши, удерживая клавишу CTRL; **Details of «Pressure» > Geometry > Apply; Details of «Pressure» > Define By > Components; Details of «Pressure» > Z Component > -1.**

7. Задать перечень необходимых для просмотра результатов расчета (в данном случае ограничимся просмотром эквивалентных напряжений): из контекстного меню для элемента **Solution (A6)** выбрать **Insert > Stress > Equivalent (von-Mises).**

8. Выполнить статический анализ: из контекстного меню для элемента **Static Structural (A5)** выбрать **Solve**. После успешного завершения расчета

в дереве проекта около элемента **Solution (A6)** появится зеленая «галочка». Просмотреть эквивалентные напряжения, возникающие при действии единичной нагрузки, можно в графическом окне при выделении в дереве проекта элемента **Equivalent Stress**.

9. Проведение линейного анализа устойчивости.

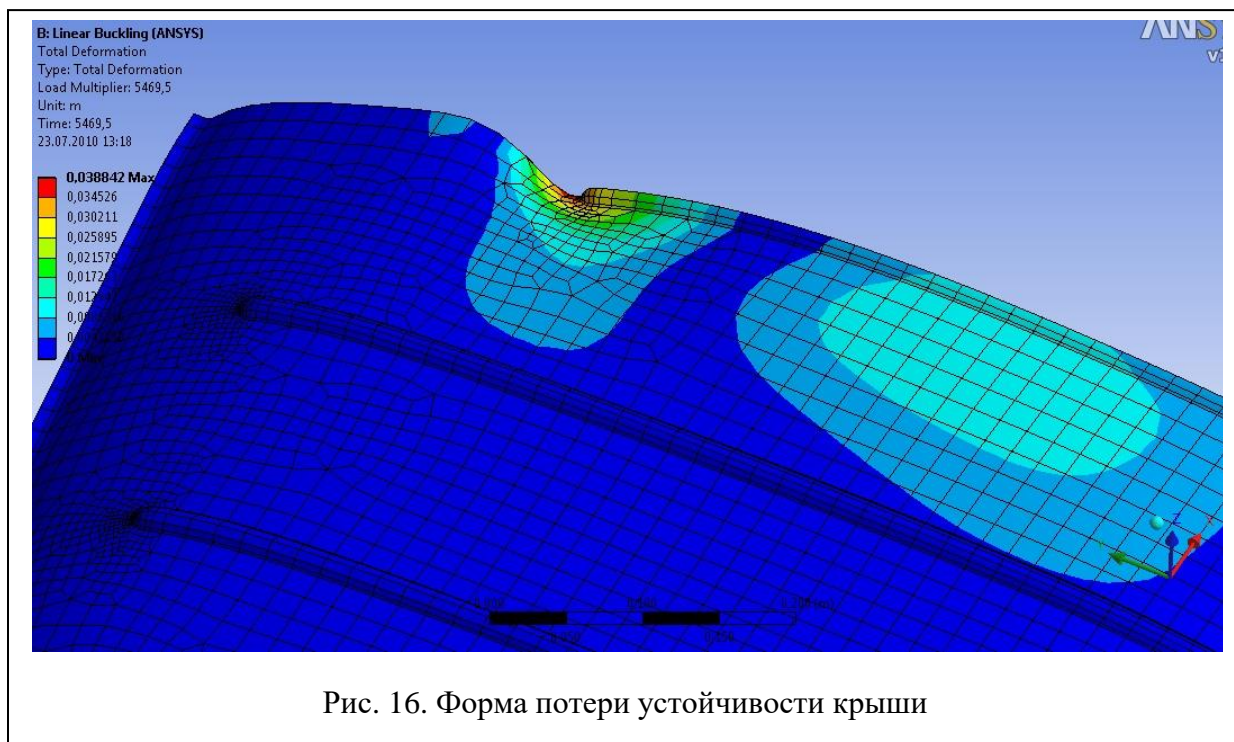
9.1. Перейти в окно со схемой проекта. Создать в поле схемы проекта новый расчет – расчет на устойчивость с наследованием результатов проведенного статического расчета: **Analysis Systems > Linear Buckling (ANSYS)**; перетащить мышкой (удерживая нажатой левую кнопку) выбранный компонент в поле схемы проекта, отпустить левую кнопку мышки над ячейкой **Solution** компонента «Статический анализ». В результате этих действий поле схемы проекта будет выглядеть аналогично рис. 14.

9.2. Перейти в окно редактирования модели, в котором появилась новая ветка **Linear Buckling (B5)**. Добавить перемещения элементов крыши для просмотра формы потери устойчивости в конце расчета: из контекстного меню для элемента **Solution (B6)** выбрать **Insert > Deformation > Total**.

9.3. Выполнить линейный анализ устойчивости: из контекстного меню для элемента **Linear Buckling (B5)** выбрать **Solve**. После успешного завершения расчета в дереве проекта около элемента **Solution (B6)** появится зеленая «галочка».

10. Проанализировать результаты расчета и определить критическое значение давления, при котором возникает потеря устойчивости крыши: выделить элемент в дереве проекта **Linear Buckling (B5) > Solution (B6) > Total Deformation**. При этом в графическом окне отобразится форма потери устойчивости крыши, а в панели параметров **Details of “Total Deformation”** в ячейке **Results > Load Multiplier** отобразится значение **5469,5**, которое представляет собой критическое значение давления, выраженное в Па. Потеря устойчивости наступает при продавливании срединного зига в передней части (рис. 16), которое сопровождается явлением «перескока». Так как значение критического давления в 2,19 раза больше максимального давления от

снеговой нагрузки, то можно сделать вывод, что данная конструкция крыши обладает достаточным запасом устойчивости.



## Литература

1. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: В 3 т. Т. 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов и др.; Под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 432 с.: ил.
2. СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».