# Расчет балки с использованием программного комплекса ANSYS WORKBENCH ЧАСТЬ 1

Разработчик М.А. Власов, гр. С-06м-24

Москва 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

0	главление	
1.	введение	3
2.	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	4
3.	СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ	5
	3.1. Создание геометрической модели балки	5
	3.2. Создание КЭ-сетки модели	
4.	ПОСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ	
	4.1. Условия закрепления	
	4.2. Внешние нагрузки	14
5.	РАСЧЕТ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	
6.	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКАЕМОЙ НАГРУЗКИ	
7.	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	22
8.	СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ	23
	8.1. Создание геометрической модели балки	23
	8.2. Создание КЭ-сетки модели	
9.	ПОСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ	
	9.1. Условия закрепления	
	9.2. Внешнее нагружение	
10	). РАСЧЕТ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	
11	. НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ	
12	2. ЛИТЕРАТУРА	41

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В пособии представлен учебный пример расчета балки с использованием программного комплекса (ПК) ANSYS WORKBENCH (версия не старше 2021.R2). Балка моделируется балочными элементами (часть 1) и элементами оболочки (часть 2), проводится статический расчет на предельную нагрузку.

#### Основные обозначения и сокращения:

ПКМ – нажатие правой клавишей мыши

ЛКМ – нажатие левой клавишей мыши

КЭМ – конечно-элементная модель

DV - Details View

### Основы управления интерфейсом ПК ANSYS WORKBENCH.

Зажав колесико мыши, вращается тело вокруг зафиксированной точки.

Зажав клавишу *ctrl* и колесико мыши, тело перемещается поступательно.

Вращением колесика мыши производится приближение/удаление тела. Также тело можно приблизить, выделив его в рамку ПКМ.

*Ctrl* + *A* – выделение всей геометрии (всех тел).

*Esc* – отменить выделение геометрии.

Ctrl + Z – вернуться на шаг назад.

*Ctrl* + *S* – сохранить файл.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Неразрезная многопролетная балка двутаврового сечения испытывает нагрузку от собственного веса и внешнюю эксплуатационную нагрузку, равномерно-распределенную по части общей длины.

В качестве примера возьмем балку со следующими характеристиками:

Таблица 2.1. Исходные данные

a	5
b	5
c	10
Марка стали	ВСт3кп2
№ двутавра	18



Рис. 2.1.

Расчет будет проведен в балочной постановке.

# 3. СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

#### 3.1. Создание геометрической модели балки

Открыв приложение ANSYS WORKBENCH, пользователь увидит основное окно программы. Перенесем мышью модуль **Mechanical Modul** в основное окно программы (рис.3.1.1.). Кликаем правой кнопкой мыши (ПКМ) на модуль **Geometry** и выбираем **New Design Modeler** (рис.3.1.2.).



Рис.3.1.1.



Рис.3.1.2.

Когда откроется окно Design Modeler, выберем единицами измерения миллиметры: ЛКМ Units→Millimeter (рис.3.1.3.). Выберем одну из

плоскостей декартовой системы координат, например, XY; нажимаем кнопку **Sketch** 27–теперь у нас выбран эскиз для рисования;



нажимаем на Look At Face/Plane/Sketch 🧖, чтобы смотреть перпендикулярно на плоскость выбранного эскиза (рис.3.1.4.).





Правой кнопкой мыши (ЛКМ) кликаем на Sketching  $\rightarrow$  Draw  $\rightarrow$  Line. Теперь мы можем в окне Model View рисовать линии. Рисуем вдоль оси X столько

линий, сколько у нас, согласно условию, задано участков. В данном случае – три (рис.2.1.). Чтобы линии строились строго вдоль оси Х, ждите появления уведомления в виде буквы Н (рис. 3.1.5.).



Рис.3.1.5.

Теперь ЛКМ **Dimensions**  $\rightarrow$  **Horizontal**. Выделяем две крайние точки каждого отрезка и отводим мышь вверх или вниз – должна появиться размерная выноска со своим номером. В окне Details View (DV) напротив этого номера указываем длину отрезка (рис.3.1.6.). Следите за принятыми единицами измерения!



Рис.3.1.6.

Построив все отрезки и указав их длины, переходим к следующему пункту. ЛКМ **Concept** → **Lines From Points** (рис.3.1.7.) – объединение отдельных отрезков в общую расчетную модель балки.



В окне DV, щелкнув на строку Point Segments, выделяем все точки и нажимаем Apply, потом - Generate (рис.3.1.8.).



Рис.3.1.8.

ЛКМ Concept  $\rightarrow$  Cross Section  $\rightarrow$  I Section (рис.3.1.9.). На экране появится двутавровое сечение; в окне DV задаем размеры сечения (рис.3.1.10.).



Рис.3.1.9.



Рис.3.1.10.

Геометрическая модель построена. Сохраняем (ctrl + S). Закрываем окно Design Modeler.

Следующим шагом будет построение конечно-элементной модели (КЭМ).

#### 3.2. Создание КЭ-сетки модели

Открываем модуль Model  $\rightarrow$  Edit (рис.3.2.1.). Появится окно Static Structural Mechanical.



Рис.3.2.1.

В окне Outline в дереве проекта Project  $\rightarrow$  Model  $\rightarrow$  Geometry  $\rightarrow$  Line Body. В пункте Geometry стоит знак вопроса. Значит, проведены не все настройки. ЛКМ Project  $\rightarrow$  Model  $\rightarrow$  Geometry  $\rightarrow$  Line Body  $\rightarrow$  Cross Section (отмечено желтой заливкой). Выбираем наше двутавровое сечение (на рис.3.2.2. оно названо I1).

File Home	Context Geometry Display Sele	ction Autom	A : Определени ation	те опасных се	чений - М	lechanical (Ar	nsys Mechar	nical Ente	erprise Prep	Post]			Quick Launc	1	- 8 ×
Duplicate Q Solver	Analysis	Commands m Comment	Images * </td <td>Replace Geometry* Geometry</td> <td>Point</td> <td>Distributed Mass</td> <td>Transform</td> <td>Delete Part(s) M</td> <td>Surface Coating C lodify</td> <td>Element prientation</td> <td>Virtual Body Virtual</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>	Replace Geometry* Geometry	Point	Distributed Mass	Transform	Delete Part(s) M	Surface Coating C lodify	Element prientation	Virtual Body Virtual				
Outline	•	₽□× (			÷ Q (	2 0 0	Select 🔩	Mode+		1		h 🐺 🖤 📾	Clipboard -	[Empty]	🗑 Extend 🔹 🍹
Name 👻 Se	arch Outline 🛛 🛩 🖕														
Project* → Model (A4) → 2 <sup>®</sup> Geometry → 2 <sup>®</sup> Geometry → 2 <sup>®</sup> Cross Secti → 2 <sup>®</sup> Cross Secti → 2 <sup>®</sup> Cross Secti → 2 <sup>®</sup> Cross Secti	ady ans Systems	↑ 29. ↓	e Body 04.2025 15:50											ł	<b>Ansys</b> 2021 R2
Details of "Line Body"	•	₽ □ ×													
Graphics Properties															
Definition															
Suppressed	No														
Model Type	Beam														
Stiffness Behavior	Flexible														
Coordinate System	Default Coordinate System														
Reference Temperature	By Environment														
Cross Section	.,	-													
Offset Mode	11														
Offset Type	Centroid														
Treatment	None														Y
Material															+ · · · ·
Assignment	Structural Steel														
Nonlinear Effects	Yes						0		254+02		7.	+ 02 (mana)			$\sim$
Thermal Strain Effects	Vac								5.58+05		7	-+us (mm)		Z	► X
+ Bounding Box	1.000						1.7	5e+03		5.25e+	03				
Properties															
		Mess	ages												▼ ₽ □ ×
III Juurious			Text							Asso	ciation			]	Timestamp
Details Section Planes		Selec	tion Information	Graphics Ann	otations	Messages									
								Me	ssages pan	e No Sel	ection	A Metric (m	n, kg. N. s. mV, m	A) Degree	s rad/s Celsius

Рис.3.2.2.

ЛКМ **Mesh**  $\rightarrow$  **Element Size**. Вводим размер конечного элемента – 100 мм (рис.3.2.3.). Можете попробовать ввести другие значения, если, например, вычислительные мощности Вашего ПК недостаточны.



Рис. 3.2.3.

Генерация сетки ПКМ Mesh  $\rightarrow$  Generate.

Для контроля количества узлов (Nodes) и элементов (Element) в КЭмодели см. окно Details of «Mesh»  $\rightarrow$  Statistics.

Для визуализации (вкладка сверху): ЛКМ Display  $\rightarrow$  Show Mesh, Thick Shells and Beams (рис.3.2.4.).



Рис.3.2.4.

Если Вы проделали все вышеописанные действия, после чего напротив ветки **Mesh** появится зеленая галочка, тогда построение КЭ-модели успешно завершено и можно идти дальше.

## 4. ПОСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

#### 4.1. Условия закрепления

ПКМ Static Structural  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Fixed Support (рис.4.1.1.). При помощи данной команды ставится жесткая заделка. Сочетанием клавиш Ctrl+P (или нажав соответствующую кнопку ()) включаем фокусирование курсора на вершинах (Vertex); далее, предварительно нажав на строку Geometry в окне Details of "Fixed Support", выделяем те вершины, в которых балка жестко защемлена, и нажимаем Apply (рис.4.1.2.).



Рис.4.1.1.



Рис.4.1.2.

Теперь установим шарнирные опоры. ПКМ Static Structural  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Remote Displacement (рис.4.1.3.).



Рис.4.1.3.

Выделяем, как и в случае с жесткой заделкой (Fixed Support), точки, в которых есть шарнирные опоры, нажимаем после этого Apply. Настройки данной функции представлены на рис.4.1.4. Внимательно следите за направлением осей координат!

<b>8</b>	Context	A : Определение опасных сечений - Mechanical [Ansys Mechanical Enterprise PrepPost] — 🗗 🗙
File Home	Environment Display Selection	n Automation Quick Launch 🔨 😡 💽
● Isometric × ④ F #@ Look At   ④ F 1 Views Ang	Previous $\bigoplus$ Rotate + Sx $\bigoplus$ Rotate - Sx $\Uparrow$ Next $\bigoplus$ Rotate + Sy $\bigoplus$ Rotate - Sy $\bigstar$ le 10 $\bigcirc$ Rotate + Sz $\bigcirc$ Rotate - Sz $\bigcirc$ Orient	2an Up ↓ Pan Down Pan Lett → Pan Right Coom In Q Zoom Out Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Arrontation Diplay Preferences Diplay Preferences D
Outline	↓ 1 □ ×	🔍 🔍 🔍 🕼 🗣 🕼 🕞 🗸 🔌 🔍 🔍 🔍 🔍 Select 🍡 Moder 📰 🏗 🖫 🖫 🖫 🎆 🐘 🐨 🐃 🍟 🖤 😁 🗖 Clipboard - [Empty] 🚱 Extend - 🍏
Name	🕶 Search Outline 🛛 🛩 🖕	
i ↓ S Cross Mesh Static Q If P Q If P	Sections  anate Systems  c Structural (AS)  Analysis Settings  Fixed Support  Semote Displacement  Solution (AG)  Solution Information  V	A: Ongenetative onacitatic ceremit Remote Diplecement Time: 1: 5: 2021 R2 2021 R2 2021 R2 2021 R2 2021 R2 2021 R2 2021 R2
Details of "Remote D	lisplacement" 👻 🖡 🗖 🗙	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	2 Vertices	
Coordinate System	Global Coordinate System	
X Coordinate	7500. mm	
Y Coordinate	0. mm	
Z Coordinate	0. mm	
Location	Click to Change	Y
E Definition		
ID (Beta)	31	T
Туре	Remote Displacement	10 I I I I I I I I I I I I I I I I I I I
X Component	Free	
Y Component	0. mm (ramped)	56+03 16+04 (mm)
Z Component	0. mm (ramped)	2.5e+03 7.5e+03
Rotation X	0. * (ramped)	
Rotation Y	0. ° (ramped)	Graph 👻 🕈 🗖 🗙
Rotation Z	Free	
Suppressed	No	
Advanced		1
Details Section Plan	nes	Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph
Ready		Messages pane No Selection 🔺 Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius,

Рис.4.1.4.

## 4.2. Внешние нагрузки

Согласно условию задачи, на балку действует два типа распределенной нагрузки: от собственного веса (будем называть её весовой нагрузкой  $q_{weight}$ ) и эксплуатационная нагрузка ( $q_{
m экc}$ ).

Определим *q<sub>weight</sub>*:

 $q_{weight} = \frac{F_{\rm T}}{l} = \frac{mg}{l} = 150.92 \frac{{\rm H}}{{}_{\rm M}}$ , где *l*- длина распределения нагрузки, *m*, *g* – масса тела и ускорение свободного падения соответственно.

Теперь, зная значение весовой нагрузки, вернемся к КЭ-расчету.

ПКМ Static Structural  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Line Pressure. Так как сейчас мы моделируем нагрузку от сил собственного веса, то прикладываем мы ее ко всей балке (выделяем всю балку). Будьте внимательны: единицы измерения в окне настроек -  $\frac{H}{MM}$  (рис.4.2.1.). Вместо Line Pressure можно использовать Force. Решение от этого не изменится, но не забудьте перевести нагрузку из  $\frac{H}{MM}$  в H.

Напротив **Define By** ЛКМ кликаем на **Components**, чтобы появилась возможность направить нагрузку вдоль координатной оси. В данном случае – вдоль оси Y(puc.4.2.1.).

![](_page_13_Figure_7.jpeg)

Рис.4.2.1.

Постановка граничных условий окончена.

## 5. РАСЧЕТ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настроим эпюру, которая нам нужна для дальнейшего решения – изгибающего момента (Bending Moment): ПКМ Solution  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Beam Results  $\rightarrow$  Bending Moment (puc.5.1.).

File Home Solution	Display Selectio	n	Automa	tion						Quick Launch	~ 2
Isometric * Q Previous 🕂 F 3 Look At Q Next 🕁 F 3 Views Angle 10 📿 F	totate +Sx ⊕ Rotate -Sx totate +Sy ⊕ Rotate -Sy totate +Sz ⊙ Rotate -Sz Orient	1 Pan Pan Q Zoo	Up Left = m In C	Pan Down Rann Pan Right Reso Zoom Out Prefe Annot	dom ale erence tation	s Display Show Thick Sh Mesh and Ber	ells Cross Section Style	ダ Show Vertice 増 Close Vertice 20 (Auto Scale) Vertex	s 🗡	Explode Viewports	Show Display
tline	<del>▼</del> ‡⊡≯	×	0		0 -	∻ 🔍 🔍 🌒 🔘 Selec	- Mode - 🖉 🕅 🕅 🕅		🤋 🕞 📁	Clipboard * [Emp	ty] 🔐 Extend -
Name · Search Ou	tline 🖌 🗸				-						
Model (A4)     Geometry     Materials     Second and Systems     Mesh     Static Structural     Makerials     Static Structural     May Read Systems     Static Report Private Systems     Geometry	(A5) ge		iolution fime: 1. 19.04.20	25 17:08					_		<b>Ansy</b> 2021 F
D Line Pressure	-						_				
Solution	Insert	1	•	Deformation	+						
¥	Solve			Contact Tool		_					
tails of "Solution (A6)"	Clear Generated Data			Bolt Tool							
iolution	Rename	F2		Probe		-					
Number Of Cores to Use (Be	Conver All Circles Childs				-						
Adaptive Mesh Refinement	Group All Similar Childre	en		Coordinate Systems	,						Y
/lax Refinement Loops 🛛 🗂	Open Solver Files Direct	ory		Beam Results		💋 Axial Force					
efinement Depth	2.			Beam Tool		💋 Bending Moment					T .
nformation			10	Mala and		Torsional Moment					
tatus	Solve Required		AB'	Volume			Rending Moment		04 (		
MAPDL Elapsed Time			1518	User Defined Result		T Shear Porce	Bending Moment		04 (mm)		
IAPDL Memory Used				User Defined Criteria		Shear-Moment Diagra	moment in the plane	nemendicular (V			
APDL Result File Size			-	and beined sittend			and Z components) to	the beam axis.			
		Gr	ap EC	Commands							<b>→</b> ‡
ost Processing	a) Program Controlled			Python Code			Press F1 for help.				
ost Processing istributed Post Processing (Bet			1				1				
ost Processing istributed Post Processing (Bet iesh Source (Beta)	Program Controlled										
ost Processing istributed Post Processing (Bet lesh Source (Beta) am Section Results	Program Controlled No										

Рис.5.1.

Запускаем расчет. Для этого на вкладках **Home** или **Solution** нажать кнопку **Solve** (рис.5.2.).

<b>8</b> 🔛 =	Context		A : C	пределение	опасных се	чений - Mechanic	al (Ansys Mechani	cal Enterp	orise PrepP	ost]						- @ ×
File Home	Solution Display Se	lection	Automation											Quick	Launch	~ 🖸 🕜 -
Duplicate	Delete My Computer Find ♥ Distributed Tree ♥ Cores 2 S	Solve	Resource Prediction	Name X Coor Iysis Remo	ed Selection dinate Syste ote Point	Commands Comment Chart Insert	Images ▼ Images ▼ Images ▼ Images ▼ Images ▼ Images ■ </td <td>Tools</td> <td>Layout</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>	Tools	Layout							
Outline		Solve	(F5)	-	0 - *	0000	Select 🛰 Mode	· m .	1			112 100		Clipboard	* [Empty]	😜 Extend *
Name 👻 S	earch Outline 🛛 🗸 🖕	4	Z Solve the sime	lation												
Project*     Model (A4)     √% Geometry     √% Geometry     √% Cross Sect     ∀     √% Cross Sect     ∀     √% Cross Sect     ∀     √% Cross     ∀     ∀% Cross     ∀      ∀% Cross     ∀     ∀% Cross     ∀     ∀% Cross     ∀      ∀% Cross     ∀% Cross	lons Systems <b>ructural (AS)</b> sis Settings I Support to Explacement Pressure Total Bending Moment Total Bending Moment	7 () Pi	ress F1 for help.	int	ечении		_	_	_	_	_	_	•			<b>Ansys</b> 2021 R2
	i woment				-											
Scoping Method	Geometry Selection															
Geometry	3 Edges															v
Definition		_														
Туре	Total Bending Moment															f
By	Time															
Display Time	Last															<.
Calculate Time History	Yes	_				0	1	5	e+03			1e+04	(mm)			• Z
Identifier		_					2.5e+03	1		7.5e+	03	_				
Suppressed	No									20.000	080					
- Integration Point Resu	lts		Graph													- # 🗆 X
Display Option	Unaveraged		otopii													1011
- Results		_														
Minimum																
Maximum Details Section Planes		~	Selection Informat	ion Graphic	s Annotatio	ons Messages	Tabular Data Gra	ph								
Solve the simulation usi	ng the selected solve handler							Mess	ages pane	No S	election	▲ M	etric (mr	n, kg, N, s,	mV, mA) De	grees rad/s Celsius

15

Рис.5.2.

Когда расчет будет успешно завершен, включите соответствующие настройки, как это показано на рис.5.3.

![](_page_15_Figure_1.jpeg)

Рис.5.3.

Как видно на рис.5.3, опасное сечение (Max) будет в правой заделке. Теперь, зная максимальный изгибающий момент от сил собственного веса балки, определим допустимую эксплуатационную нагрузку.

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКАЕМОЙ НАГРУЗКИ

Согласно [1], имеем допускаемый суммарный изгибающий момент (сумма весового и эксплуатационного моментов):

$$\frac{M}{W_n R_y \gamma_c} \le 1.$$

Значение момента сопротивления  $W_n$  возьмем из ГОСТ 57837-2017;  $R_y$  и  $\gamma_c$  – из [1]. Тогда допускаемый момент будет равен:

$$M \le W_n R_y \gamma_c \le 120.1 \cdot 10^{-6} \text{м}^3 \cdot 225 \text{МПа} \cdot 0.9;$$
  
 $M \le 24.32 \text{кHm}$ 

Это суммарный момент от моментов от собственного веса и эксплуатационного:

$$M_{sum} = M_{weight} + M_{exp}.$$

Найдем второе слагаемое. Для этого качественно построим эпюру изгибающего момента от единичной распределенной нагрузки *q* = 1.

Для этого создадим новый модуль Static Structural, подсоединив его к первому модулю (рис.6.1.). Расчет проводится так же, как и для весовой нагрузки, за двумя исключениями: а) эксплуатационная нагрузка может быть приложена не ко всей длине балки (внимательно смотрите на условие задачи); б) в это раз рекомендуется вместо функции Line Pressure выбрать Force (рис.6.2.).

![](_page_16_Picture_10.jpeg)

Рис.6.1.

File Home	Context Environment Display	Multiple Systems - Mechanical (Ansys Mechanical Enterprise PrepPost)	– 라 × Quick Launch    정 양
●Isometric * Q P #@Look At Q N Wiews Angl	revious ⊕ Rotate +Sx ⊕ Rotate lext ↓ Rotate +Sy ↓ Rotate e 10 ⑦ Rotate +Sz ⑦ Rotate Orient	sx ↑ Pan Lpt → Pan Right Sy ← Pan Lett → Pan Right Sz @ Zoom In @ Zoom Out Annotation	J <sup>O</sup> Show Vertices     #       Her Close Vertices     #       y 200 Auto State) *     Edge       Vertex     Edge       Explode     Viewports       Display
Outline		🗆 🗙 🛛 🍳 🕼 📦 🍪 暗 🔿 = 💠 🍳 🍳 🍭 🝭 Select 🍡 Mode = 🛒 🗈 🛅 🖻 I	🛅 🛅 🛅 🐩 🚏 🔤 📋 Clipboard 🐐 [Empty] 🛛 Extend 🐐 🌷
Name	Sench Outline Wed Support emole Dipplacement ne Pressure obution (AG) Subtion Information Total Bending Moment Structural 2 (BS) naylas Settings ned Support emole Dipplacement org Subtion (B6) Subtion Information Total Bending Moment V	B: Episonemaa narpyska Force Time: 0.5012 ; 29.04.2025 19:18 ■ Force: 1.e-003 N Components: 0,-1.e-003;0. N	Ansys 2021 R2
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Edge		
Definition			
ID (Beta)	57		Y
Туре	Force		
Define By	Components		
Applied By	Surface Effect		
Coordinate System	Global Coordinate System		
X Component	0. N (ramped)	0 5e+03	1e+04 (mm)
Y Component	-1.e-003 N (ramped)	2.5e+03 7.5	5e + 03
Z Component	0, N (ramped)		
Suppressed	No	Granh	- 1 m x
h		1	
Details Section Plan	nes	Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph	
Ready		💭 No Messages	No Selection 🔷 Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius

Рис.6.2.

Обратите внимание! На рис.6.2. единичная нагрузка равна  $q_{3\kappa c} = \frac{1}{1000} = 0.001$  М. Сделано так потому, что эпюра изгибающего момента (рис.6.3.) строится размерностью Нмм. Для самопроверки контролируйте значение единичного момента (рис.6.3.) – он не должен превышать единицу.

Эпюра единичного изгибающего момента:

Isanctic Orrelous Precises P	File Home	Context Result Display Se	Multiple Systems - Mechanical [Ansys Mechanical Enterprise PrepPost] Election Automation Cuick Launch	- 8 ×
Outline Sauch Outline              Pared Support              Pared Support <td>●Isometric ▼ @ F #@Look At @ I @Views Ang</td> <td>revious ⊕ Rotate +Sx ⊕ Rot lext ⊕ Rotate +Sy ⊕ Rot le 10 ⓒ Rotate +Sz ⓒ Rot Orient</td> <td>ktate-Sz Ŷ Pan Up ↓ Pan Down tate-Sy ◆ Pan Lett ◆ Pan Right ktate-Sz Q.Zoom In Q.Zoom Out</td> <td>, W</td>	●Isometric ▼ @ F #@Look At @ I @Views Ang	revious ⊕ Rotate +Sx ⊕ Rot lext ⊕ Rotate +Sy ⊕ Rot le 10 ⓒ Rotate +Sz ⓒ Rot Orient	ktate-Sz Ŷ Pan Up ↓ Pan Down tate-Sy ◆ Pan Lett ◆ Pan Right ktate-Sz Q.Zoom In Q.Zoom Out	, W
Name       Such Outline       Provid Support       Anssys         Provid Support       Type Total Bending Moment       2021 R2         Provid Support       Such Information       20021 R2         Provid Support       Support       20021 R2         Provid Support       Support       Support         Support       No       Support <td>Outline</td> <td>-</td> <td>- 부 🗆 × 👘 🝳 Q, Q, 📦 📦 🚱 🖙 🕞 🕞 🔸 Q, Q, Q, Q, Select 🍡 Mode× 📰 ਇ 🔞 🔞 🔞 🐻 🐻 🖉 🖓 😁 📑 Clipboard* [Empty] 🔮</td> <td>Extend + 🚆</td>	Outline	-	- 부 🗆 × 👘 🝳 Q, Q, 📦 📦 🚱 🖙 🕞 🕞 🔸 Q, Q, Q, Q, Select 🍡 Mode× 📰 ਇ 🔞 🔞 🔞 🐻 🐻 🖉 🖓 😁 📑 Clipboard* [Empty] 🔮	Extend + 🚆
P. Fred Support Table Braining Noment   P. Fred Support Table Braining Noment   P. Expense Toplay Content Table Braining Noment   P. Expense Toplay Content Table Braining Noment   P. Statts: Structural 2 (S) 9.91028 Max   P. Fred Support 9.91028 Max   P. Fred Support 9.91028 Max   P. Fred Support 9.90026 Max   P. Fred Support 9.91028 Max   P. Fred Support 0.0005   P. Statts: Structural 2 (S)   P. Fred Support   P. Fred Support   Support   Sopen Statts: Structural 2 (S)   P. Fred Support   P. Ford Support   Support   Sopen Statts: Structural 2 (S)   P. True Ending Moment	Name	🔹 Search Outline 🛛 🖌 🖕		
Detail of "Intal Bending Moment"       Image: Sope Generative Selection         Scoping Method       Generative Selection         Scoping Method       Generative Selection         B       Definition         Type       Total Bending Moment         B       Definition         Display Option       Unaveraged         B       Definition         Minimum       Spope-013 Himm		hved support territor Dipplacement me Pressare Solution (AS) Solution (AS) Solution Information ∰ Total Bendrg Moment Sectory territor 2005 Solution (AS) Solution Information G Solution Information G Solution Information	Pt Experientes are proved           Total Berlings Moment (Universaged)           Unit I: Norm           Unit I: Norm           Total Berlings Moment (Universaged)           Unit I: Norm           0.9028 Max           0.90391           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005           0.0005	<b>Ansys</b> 2021 R2
Openition       Geometry Selection         Geometry Method       Geometry Selection         Geometry Mail live Bodies       Definition         Type       Total Bending Moment         System       Calculate Time History Yts         Identifier       No         Subgrossed       No         Diciplay Option       Unaveraged         Beadels       Graph         Animation       States Clause Time History         Minimum       Optically Optical         Minimum       Optically Optical         Minimum       Optically Optical         Minimum       States Clause Time History         Animation       Total Bending Moment         Animation       Total Bending Moment         Animation       States Clause Time History         Details       Section Information       Graph         Animation       States Clause Time History       States Clause Time History         Details       Section Planes       Selection Information       Graph	Details of "lotal Beni	ing Moment"	8.5299e-13 Min	
Geometry       All Line Bodits         © Definition       Time         Type       Total Bending Moment         y       Time         Suppressed       No         Exclusion       Output time Last         Catculate Time History Yes       Output time Last         Suppressed       No         Exclusion       Output time Last         Suppressed       No         Exclusion       Output time Last         Minimum 0.01002 Namm       Animation   ↓ ■   ■   ■   ■   ■   ■   ■   ■   ■	Scoping Method	Geometry Selection		
B Definition Type Tatal Bending Moment Type	Geometry	All Line Bodies		
Type       Total Bending Moment         by       Time         by       Time         by       Time         calculate Time History (Vs.         identifier       1         Supportsed       No         ibiglag Ontime       2.5e+03         Total Section Point Results       0         Displag Ontime       2.5e+03         Total Section Point Results       0         Carlot Results       0         Bestlit       Carlot Results         Minimum 0.01028 Namm       Animation   → ● > ● > ● > ● > ● > ● > ● > ● > ● > ●	Definition			
by       Time         by       Time         Display Time       Last         Calculate Time History Yes       Identifier         Last Time History Yes       Identifier         Uspaperssed       No         E Integration Point Results       2,5e+63         Totalph Time       Identifier         Bealth	Туре	Total Bending Moment		Y
□ biphy Time       Last         Calculate Time History       Last         Calculate Time History       Last         Suppressed       No         Display Coption       Unaveraged         Results       Calculate Time History         Minimum       R52596-013 Hr/mm         Minimum       0.01028 Nrmm         Minimum       0.01028 Nrmm         Minimum       0.01028 Nrmm         Details       Selection Information         Selection Information       Graphics Annotations         Messages       Tabular Data         Graph       Calculate	By	Time		A
Calculate Time History Yes       Identifier         Suppressed       No         Entergration Point Results       2.3e+03         Totpisky Option       Unservaged         Estable       Animation   + > > > > > > > > > > > > > > > > > >	Display Time	Last		
lderthler Suppressed No Elthegration Point Results Ditrajby Option Unaveraged Results Results Minimum 0.90028 Nmm Minimum 0.90028 Nmm Minimum 0.90028 Nmm Minimum 0.90028 Nmm Minimum 0.90028 Nmm Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph Petails Section Planes Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph	Calculate Time Hist	ory Yes		
Suppressed       No         Integration Point Results       0         Dirplay Option       Unaveraged         Corplay Option       Unaveraged         Execution       0         Minimum       0.5299-013 N:mm         Animation       Image: The Day of the Body         Details       Section Information         Graph       Selection Information         Graph       Selection Information         Selection Information       Graphics Annotations         Minimum       Selection Information         Selection Information       Selection Messages         Total Section Planes       Selection Information	Identifier			
E Integration Point Results 2.52+03 7.52+03 Display Option Unaveraged Execute Minimum 8.52592-013 Hmm Minimum Control Line Body Details Section Planes Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph	Suppressed	No	0 5e+03 1e+04 (mm)	
Display Option       Unaveraged         © Result       Graph         Minimum       05299-013 Nrmm         Mainimum       050028 Nrmm         Minimum       001028 Nrmm         Minimum       001028 Nrmm         Minimum       001028 Nrmm         Section Planes       Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph	- Integration Point F	Results	2.5e+03 7.5e+03	
Beedis     Graph     Image: Control of the second s	Display Option	Unaveraged		
Minimum     85299-013 №mm       Mainimum     05028 №mm       Minimum     05028 №mm       Minimum     05028 №mm       Details     Section Information Graphics Annotations       Mesages     Tabular Data       Graph	- Results		Grank	- 1
Maximum       091028 Nmm         Minimum Occurs On Infinimum Occurs On Details Section Planes       Une Body	Minimum	8.5299e-013 N-mm	vien	- 4 L A
Mimmum Occur On Line Body V Details Section Planes Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph	Maximum	0.91028 N.mm	Animation 🚺 🕨 🛄 🔛 🛄 🛄 20 Frames 👻 2 Sec (Auto) 👻 🎇 🍭 🎆 🐲 🚟 🦉 🖟 3 Cycles 🛛 SA 🖕	
Deally Section Planes Selection Information Graphics Annotations Messages Tabular Data Graph	Minimum Occurs C	In Line Body		
Section memory section memory includes meaged industry to the section of the section means and the section mea	Details Section Play	nes	Selection Information Granhics Annotations Messages Tabular Data Granh	
	Section Section Fid.		Selection monitorios organics microages mooner on the dispire	and the second second

Рис.6.3.

Опасная точка располагается в левой заделке, единичный момент в ней равен  $\overline{M} = 0.91$ ; Тогда из равенства  $\overline{M}q_{exp} = M_{exp}$  выразим  $q_{exp}$ :

$$q_{exp} = \frac{M_{exp}}{\overline{M}}$$

Момент  $M_{exp}$  найдем как разницу допустимого момента и максимального момента от силы тяжести.

$$M_{exp} = M - M_{weight}^{max} = 24.33 - 1.454 = 22.876$$
 кНм

Тогда допустимая эксплуатационная нагрузка  $q_{exp}$  будет равна:

$$q_{exp} = \frac{M_{exp}}{\overline{M}} \approx 25$$
кН

Округлили значение  $q_{exp}$  в меньшую сторону в целях увеличения запаса прочности.

Теперь мы можем приложить допустимую эксплуатационную нагрузку и построить эпюру изгибающего момента. Для этого строим третий модуль Static Structural. Подсоединяем его аналогично второму (рис.6.1.). Условия закрепления не изменились. Эксплуатационную нагрузку прикладываем согласно рис.6.4. На рис.6.5. видно, что максимальный момент равен

File Home	Context Environment Display Selecti	on Automation	Multiple Systems -	Mechanical (Ans)	ys Mechanical Ent	erprise PrepPost)			Quick Launch	- & ×
●Isometric ▼ Q P 4 G Look At Q N	revious ⊕Rotate +Sx ⊕Rotate -Sx ↑ ext ⊕Rotate +Sy ⊕Rotate -Sy ← e 10 ⊙Rotate +Sz ⊙Rotate -Sz @ Orient	Pan Up ↓ Pan Down Pan Left ➡ Pan Right Zoom In Q Zoom Out	Random Rescale Preferences Annotation	Display Show Mesh	Thick Shells Cro and Beams Sect Style	ss Remote Point	Display Style*	Vertices Vertices Scale) + tex	Explode Viewports	Show Display
Outline	• ‡ □ ×	QQ 🗑 📦	🕅 🕒 🖓 📲	0000	Select 🐂 Mo	de* 🕅 🖬		1 🐨 👻 🖻 📘	Clipboard + [Empt	ty ] 🛛 🔐 Extend 🔹 🚆
Name Q R Q R Q R Static Q R Q R Q R Static Q R Q R Static Q R Static Q R Static Q R Static S	Search Dutline V Nexed Support A	C: 3xcn.ny.araquonnik Force Time: 1. s 29.04.2025 19.28 Force: 25000 N Components: 0;	л нагрузка 25000;0. N						-	Ansys 2021 R2
Details of "Force"	+ ¶ □ ×									
Scope Scope	Geometry Selection									
Geometry	1 Edge									
Definition										
ID (Beta)	77									V
Туре	Force									
Define By	Components									
Applied By	Surface Effect									×
Coordinate System	Global Coordinate System									
X Component	0. N (ramped)				0	4.5e+03		9e+03 (mm)		Z
Y Component	-25000 N (ramped)				2.25	+03	6.75e+03	1		
Z Component	0. N (ramped)									
Suppressed	No	Graph								<b>▼</b> <sup>‡</sup> □ X
							1			
Details Section Plan	es	Selection Information	Graphics Annotat	ions Messages	Tabular Data	Graph				
						🟓 No Messi	ages No Selection	i 🔺 Metric (mi	m, kg, N, s, mV, mA)	Degrees rad/s Celsius

 $M_{exp}^{max} = 22.75 \kappa H M.$ 

Рис.6.4.

<mark>6<sup>2</sup> ⊞</mark> <del>=</del> File Home	Context Result Display	Selection	Automation	Multiple Sy	stems - Mechanic	al (Ansys Mechanical E	nterprise PrepPost	1		Quick Launch	- & ×
Sometric ▼ Q Prev     GLook At Q Next     Wiews Angle	ious 🕂 Rotate +Sx	⊕ Rotate -Sx     ↑     Rotate -Sy     ◆     Rotate -Sy     ♥     Rotate -Sz     ♥     nt	Pan Up ↓ Par Pan Left → Par Zoom In  Q Zoo	n Down Nando n Right Sescal om Out Prefer Annota	e ences tion	Show Mesh Thick Shells and Beams Style	Fross Remote Poir etion Connection	が Display S Style*	Show Vertices Close Vertices (Auto Scale) * Vertex	Edge Explode Viewports	Show Display
Outline		<b>→</b> ‡ □ ×	QQI	e e 😵 😘 🔇	) - ∻ Q Q	🔍 🍭 Select 🔩 N	Aoder 📰 🕞 🛙		💼 🐑 🐺 🖷 🗃	🖗 🛅 Clipboard + 🛛 [ Emp	ty] 🛞 Extend * 🎽
Name 💌 S	earch Outline 🛛 😪 .										
THE And Fixe Fixe Fixe For For For For For For For For	ysis Settings 3 Support ote Displacement e tion (86) Solution Information Total Bending Momen Total Bending Moment tion (C6) Solution Information Total Bending Moment	t t	Total Bendin Type: Total Bendin Type: Total Bendin Type: Total Bendin Time: 1 s 29,04.2025 1: 2,02206 1,7767 1,5171e 1,2643e 1,0114e 7,5857e 5,0571e 2,20691e	g Moment lending Moment (U 3:46 <b>:7 Max</b> 7 7 5 5 5 5 5 Min Max	naveraged)				4.3228e +00	D	<b>Ansys</b> 2021 R2
- Scope	planting of the second s										
Scoping Method	Geometry Selection										
Geometry	All Line Bodies										
Definition											Y
Туре	Total Bending Mom	ent									4
By	Time										•
Display Time	Last										× ×
Calculate Time History	Yes					0	5	2	1 04 (		
Identifier							56+0	/3	Te+o4 (mm)		
Suppressed	No						2.5e+03	7.5e+03			
- Integration Point Resu	ilts										
Display Option	Unaveraged		Graphics Anno	tations							- 4 🗆 X
E Results	1		Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z	Association	^
Minimum	2.0691e-005 N-mm		Result	4.3228e+006		N-mm	20000.000000	2.150000	0.000000	Model>Static Strue	tural 3>Solution>Total E 🗸
Maximum Details Section Planes	2.2757e+007 N·mm	~	< Selection Info	mation Graphics	Annotations Me	ssages Tabular Data	Graph	seages No Se	Jection Atta	ic (mm ka N c m)t*	>

Рис.6.5.

Тогда суммарный момент будет равен

$$M_{sum} = M_{weight} + M_{exp} = 1.454$$
к  
Нм + 22.75к  
Нм = 24.204к  
Нм  $M_{sum} < M$ ; 24.204к  
Нм < 24.32к  
Нм

Условие прочности соблюдено.

Проверим также потенциальное опасное сечение в правой заделке, где в весовой эпюре был максимум (рис.5.3.), а в эксплуатационной эпюре момент равен 4.323кНм (рис.6.5.). Сложим изгибающие моменты весовой и эксплуатационной эпюр в крайнем правом сечении:

$$M_{weight}^{max} + M_{exp}^{max} = 4.323$$
кНм + 1.454кНм = 5.777кНм

Как видно, момент в правой заделке меньше, чем в левой. Значит опасное сечение располагается в правой заделке.

# Расчет балки с использованием программного комплекса ANSYS WORKBENCH ЧАСТЬ 2

## 7. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Неразрезная многопролетная балка двутаврового сечения испытывает нагрузку от собственного веса и внешнюю эксплуатационную нагрузку, равномерно-распределенную по части общей длины.

В качестве примера возьмем балку со следующими характеристиками:

Особенность расчетной модели заключается в том, что стенки и полка двутавровой балки будут представлены в виде оболочек.

Таблица 7.1. Исходные данные

5
5
10
ВСт3кп2
18

![](_page_21_Figure_6.jpeg)

Рис. 7.1.

# 8. СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

## 8.1. Создание геометрической модели балки

Открыв программу, пользователь увидит основное окно программы. Сперва нужно перетащить модуль **Mechanical Model** в основное окно программы (рис.8.1.1.). Кликаем правой кнопкой мыши (ПКМ) на модуль **Geometry** и выбираем **New DesignModeler Geometry** (рис.8.1.2.).

![](_page_22_Figure_3.jpeg)

Рис.8.1.2.

Когда откроется окно **Design Modeler**, выберем за единицы измерения миллиметры: Units →Millimeter (рис.8.1.3.).

A: Mechanical Model - Design!	Modeler		- 0 ×
File Create Concept Tools	Units View Help		
2 A. A. A.	✓ Meter Centimeter	ⓑⓑⓑⓑ√│ಐ≍│ऽ∻QQQQQX≭♯ ★�•│⋈	
XYPlane   XYPlane   Non  XYPlane   Non  Seconversion  Tree Outline  A Machine India	Millimeter Micrometer Foot Inch	Share Topology 🕎 Parameters    🖏 Extrude 🏟 Revolve 🐁 Sweep 🔌 Skin/Loft    🔤 Thin/Surface 🦠 Blend 🛩 💊 Chamfe	r 🌑 Slice
XYPlane	Large Model Support		Amouro
XPlane XZPlane	✓ Degree Radian		2021 R2
	Model Tolerance		
Sketching Modeling Details View			
		0.000 15.000 30.000 (m)	, Č
		7.500 22.500	2 X
Ready	_Model VI	No Selection Meter D	egree 0 0

Рис.8.1.3.

Выберем одну из плоскостей декартовой системы координат, например, XY; нажимаем кнопку Sketch 📁 – теперь у нас выбран эскиз для рисования; нажимаем на Look At Face/Plane/Sketch, чтобы смотреть перпендикулярно на плоскость выбранного эскиза (рис.8.1.4).

![](_page_23_Picture_3.jpeg)

Рис.8.1.4.

Важно! Оболочечная двутавровая балка строится из трех двумерных тел, для каждого из которых создается свой эскиз (Sketch).

Переходим в Sketching  $\rightarrow$  Line. Рисуем линию вертикально вдоль оси Y (рис.8.1.5). Укажем размер линии: Dimensions  $\rightarrow$  Vertical. Кликаем на две крайние точки и отводим в сторону выноску. В окошке DV вводим значение размера, в данном случае – 177 мм (рис.8.1.6).

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

Рис.8.1.6.

Вдоль этой линии построим стенку. Теперь нужно построить еще две линии, соответствующие полкам двутавра.

ЛКМ: **Modeling** → **XYPlane** → **New Sketch** <sup>™</sup> (рис.8.1.7). В новом эскизе строим горизонтальную линию. Для этого от верхней точки уже построенной

линии строим влево и вправо горизонтальные линии длиной 22.75 мм (при построении должна всплыть подсказка – буква **H**, что означает горизонталь) (рис.8.1.8). Далее указываем размер линий (рис.8.1.9.).

![](_page_25_Figure_1.jpeg)

Рис.8.1.8.

File Create Con	ncept Tools Units View He	elp									
2	DUndo @Redo S	elect: *D	1 m 🖬 🖻 📄	S-IXXI	S + @ + @	Q Q 0 👯 🎁	*	1			
	1 - h - h - h - +			~ 1.6.7.5 ].							
VVPlane	Skatch?	Genera	te 💼 Share Topologi	2P Parameters	Extrude de R	evolve 🏝 Sween 🙈	Skin/Loft	nin/Surface Seler	d 💌 🏠 Chamfer 🛛 💼 Slice		
Annunc .	Je Sketenz	J y ochere	( ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) (	P4 diameters		crone Concep V		ninoundee 🖷 erer	a yonanna yona		
Point = 200	nversion		-								
sketching looiboxe	5	+ Graphic	5								_
	Draw									_	
	Modify	-								Ans	VS
	Dimensions	<b>^</b>								2021	D2
General										2021	-112
I Vertical	constraints Settings			T	H3H3						
Sketching Model	ing										
Details view	2	*									
Skatch	Ckatch?	_								γ	
Sketch Visibility	Show Sketch	-									
Show Constraints	s? No	-									
Dimensions: 2	201002.0	-								L .	- 1
H3	22.75	_			0.00	25.00		70.00 (		-	
1 HA	22.75 mm				0.00	35.00		70.00 (mm)			
114					-	17.50	52.50				
Edges: 2						1					
Edges: 2	Ln11					1					

Рис.8.1.9.

Тот же порядок действий, начиная от создания эскиза и заканчивая указанием размеров, делаем и для второй горизонтальной линии.

Теперь, построив все три эскиза, создадим оболочечные тела с помощью инструмента выдавливания: **Sketch** → **Extrude**. Настройки в окне **DV** устанавливаем, как на рис.8.1.10 (значение в строке **Depth** – это длина балки). Толщина должна быть нулевой, иначе будет построено объемное тело! После нажимаем на **Generate**. Для остальных двух эскизов делаем то же.

![](_page_26_Picture_4.jpeg)

Рис.8.1.10.

Теперь в местах будущих шарнирных закреплений рассечем модель балки плоскостями. Кликаем Create  $\rightarrow$  Body Transformation  $\rightarrow$  Translate (puc.8.1.11).

![](_page_27_Figure_1.jpeg)

Рис.8.1.11.

Выделяем всю модель балки (ctrl + A) и в открывшемся окне DV в строке Bodies кликаем Apply. Кликаем на желтую строку Directional Selection, нажимаем на плоскость XY в окне Tree Outline и в потом нажимаем на Apply. В строке Distance указываем расстояние, на которое мы хотим сместить балку. Кликаем Generate (рис.8.1.12).

![](_page_27_Picture_4.jpeg)

Рис.8.1.12.

**Важно!** Смещаем модель таким образом, чтобы плоскость **ХУ** пересекала балку в месте шарнирного крепления.

Далее кликаем Slice (рис.8.1.11). Нажав на строку **Base Plane**, кликаем на плоскость **XY** и потом – на **Apply**, потом – на **Generate** (рис.8.1.13). Если, есть еще места шарнирных соединений, проводим аналогичные действия и там.

![](_page_28_Figure_2.jpeg)

Рис.8.1.13.

Когда модель балки разделена на несколько тел (**Body**), соединим все тела в одну часть (**Part**). Для этого выделяем все элементы (**ctrl+ЛКМ**) в **Tree Outline**, кликаем ПКМ и выбираем функцию **From New Part** (puc.8.1.14).

![](_page_28_Figure_5.jpeg)

Рис.8.1.14.

Теперь, когда геометрическая модель балки готова, сохраняем файл и закрываем окно Design Modeler.

#### 8.2. Создание КЭ-сетки модели

Построим сетку для нашей модели. **ПКМ**  $\rightarrow$  **Model**  $\rightarrow$  **Edit** (рис.8.2.1).

![](_page_30_Picture_2.jpeg)

Рис.8.2.1.

Введем толщину оболочечных тел (рис.8.2.2). Толщины определяются согласно ГОСТ Р 57837-2017.

![](_page_30_Figure_5.jpeg)

Рис.8.2.2.

Кликаем на **Mesh**. В строке **Element Size** вводим размер конечных элементов – 25мм, затем кликаем на **Generate** (рис.8.2.3.). Закрываем модуль **Model**.

	Name	Search Outline	× .							
ė	Model (A4 B→√® Geom B→√® Geom B→√% Goord B→√% Coord →√® Conne Mesh	etry Jaks Inate Systems Scions								
De	tails of "Mesh"		≠ # □ ×							
ł	Display Display Chile	Line Commeter Cat	10 m							
ł	Display style	Use Geometry set	ung							
1	Delaulis Division Drafarance	Machanical								
f	Flement Order	Program Controlle	ed.							
f	Element Size	25								
ł	Sizing									
1	Quality									
a la	Inflation									
	Batch Connections									
	Advanced									
	Advanced									
	Advanced Statistics									

Рис.8.2.3.

## 9. ПОСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

### 9.1. Условия закрепления

Удерживая ЛКМ, перенесем в окошко Model модуль Static Structural, он подсоединится к модулю Mechanical Model (рис.9.1.1.). Открываем модуль Setup (двойным щелчком/нажав edit) (рис.9.1.2.).

Обратите внимание! При переносе модуля Static Structural у Вас должны появиться красные рамки вокруг всех трех слотов модуля Mechanical Model.

Обратите внимание еще раз! Вы можете удалить любую из связей (синие "провода" – рис. 9.1.2.), нажав по ней **ПКМ** и выбрав **Delete**.

![](_page_32_Picture_5.jpeg)

Рис.9.1.1.

![](_page_32_Figure_7.jpeg)

Рис.9.1.2.

Зададим граничные условия. Установим жесткую заделку: ПКМ кликаем на Static Structural  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Fixed Support. Чтобы появилась возможность выбирать ребра у нашей модели, используйте сочетание клавиш Ctrl+E или нажмите кнопку Edge (рис.9.1.3.). Выделив ребра, нажмите Apply.

<b>6</b> ° ⊞ =	Context		В: Линейный расчет	- Mechanical (Ansys M	echanical Enterprise]			- 8 ×
File	Home Environment Display	Selection Automation					Quick Launch	· 🛛 🖉 🕜 •
● Isometric ∮G Look At Views	▼ Q Previous         ⊕ Rotate +Sx         ⊕ Ro           Q Next         ⊕ Rotate +Sy         ⊕ Ro           Angle         10         ⊙ Rotate +Sz         ⊙ Ro           Orient         Orient         Orient         Orient	tate -Sx	Random Rescale Preferences Annotation	lay Show Thick Shell Mesh and Beam	s Cross Remote Point s Section Connections	「「Show Vertices 近 Display Style" 20 (Auto Scale) Vertex	Edge Explode Viewpor	rts Show Display
Outline	<b>→</b> ậ 🗆 X	00000	<u></u>	Select Select		📾 📾 🗤 💷 📖 📑	Clinhoard = [Empty]	Fytend * 9 Select Rv *
Name	▼ Search Outline >			, select 4 mode			Cuboona (cubb)	, entend veneer by -
Project*	Iel (AA, B4) Geometry Materials Corrections Meth Static Structural (B5) Mill Analysis Statistics Static Structural (B5) Statistic (B6) Solution Information	B: / Muneimusii pacuer Fixed Suppot Time: 1. s 28.04.2025 14.49 Fixed Support						Ansys 2021 R2
Details of "Fix	ed Sunnort" - I 🗆 X							
- Scope								
Scoping Me	thod Geometry Selection							Y
Geometry	6 Edges	1						
Definition								•1
ID (Beta)	52							X Z
Туре	Fixed Support	-			50.00	100.00 (		
Suppressed	No			0.00	25.00 75	.00		
		Graph						• # □ × 1.
Details Secti	on Planes	Selection Information Graphic	Annotations Tabular Da	ata Graph				
Ready					💭 No Mes	sages No Selection 🔺	Metric (mm, kg, N, s, mV, m/	A) Degrees rad/s Celsius

Рис.9.1.3.

Шарнирные опоры: Static Structural  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Remote Displacement. Геометрия для шарниров – ребра. Настройки в окне Details of "Remote Displacement" должно быть таким, как на рис.9.1.4. Обратите внимание на направления осей системы координат! Выделив ребра, нажмите на Apply.

8 🔛 ≂	Context	В: Линейный расчет - Mechanical [Ansys Mechanical Enterprise] — 🗗	×
File Home	Environment Display	Selection Automation Quick Launch 🔨 😡	0
●Isometric * Q IGLook At Q Views Ang	Previous $\bigoplus$ Rotate + Sx $\bigoplus$ Rotate Next $\bigoplus$ Rotate + Sy $\bigoplus$ Rotate gle 10 $\bigcirc$ Rotate + Sz $\bigcirc$ Rotate Orient	-Sx î Pan Up i Pan Down -Sy Pan Lett Pan Right -Sx @ Zoom In @ Zoom Out -Sx @ Zoom Out -	
Outline	<del>~</del> ↓ □ ×	- 🔍 Q, Q, 📦 💽 🗳 🙄 🙄 🗘 Q, Q, Q, Q, Q, Q, Select 🍡 Mode~ 群 団 🛅 🛅 🛅 🛅 📆 📆 🐨 🏹 🐨 📄 🗮 Clipboard * [Empty] 🔗 Extend *	×
Name	Search Outline Systems ections CSTructural (B5) Analysis Settings Fixed Support Remote Displacement Solution (B6)	B: /beeciliusia pacver Remote Displacement Time: 1.3 28.04.2025 15:03 Remote Displacement Component: 0,0,57ce mm Rotation: Free, 0, 0.* Location: 0, 2,2500 mm	<b>S</b> 22
Details of *Remote I	Solution Information		
Details of Remote t			
- scope	1		
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	2 Edges		
Coordinate System	m Global Coordinate System		
X Coordinate	0. mm		
Y Coordinate	0. mm		
2 Coordinate	-2500. mm	Y	
Definition	Click to change	•	
- Definition	10		1
Tuno	Remote Dicplacement	1	
X Component	0 mm (ramped)	0 25au02 7au02 (mm)	
X Component	0 mm (ramped)	2 3.32*03 72*03 ((((i)))	
7 Component	Free	1.75e+03 5.25e+03	
Potation X	Free		
Rotation V	0 ° (rampad)	Graph 👻 🕂	X
Rotation 7	0 ° (ramped)		1.
Suppressed	No	8	
Behavior	Deformable		1.
+ Advanced		1	
Details Section Pla	anes	Selection Information Graphics Annotations Tabular Data Graph	
		😫 No Messages No Selection 🔷 Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Ce	lsius

Рис.9.1.4.

### 9.2. Внешнее нагружение

Внешние силовое воздействие: Static Structural  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Force/Pressure. Помните, что у силы (Force) и давления (Pressure) разные единицы измерения. Сила представляется в виде вектора с компонентой. (Component).

Настройка параметров силовой функции (в данном примере - Force) представлена на рис.9.2.1.

![](_page_34_Picture_3.jpeg)

Рис.9.2.1.

## 10. РАСЧЕТ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настроим эпюру, которая нам нужна для дальнейшего решения – нормальных напряжений вдоль продольной оси. ПКМ кликаем на Solution  $\rightarrow$  Insert  $\rightarrow$  Stress  $\rightarrow$  Normal. В окне Details of "Normal Stress" в строке Orientation выбираем продольную балке ось. В данном случае – ось Z (рис.10.1.).

File Hone Solution Dutate Landth   Ottomation Outroation   Outroation Previous   Outroation Previous <t< th=""><th>🔗 🔛 =</th><th>Context</th><th>В : Линейный расчет - Mechanical [Ansys Mechanical Enterprise]</th><th>- 8 ×</th></t<>	🔗 🔛 =	Context	В : Линейный расчет - Mechanical [Ansys Mechanical Enterprise]	- 8 ×
Itemetric Previous Pratute -ss. Pratute -ss. Pratute -ss. Pratute -ss.   Itemetric Previous Pratute -ss. Pratute -ss. Pratute -ss.   Itemetric Previous Pratute -ss. Pratute -ss. Pratute -ss.   Itemetric Previous Pratute -ss. Previous Pratute -ss.   Itemetric Previous Previous Pratute -ss. Previous   Itemetric Previous Previous Previous Previous   Itemetric Previous	File Home	Solution Display Selection	Automation Quick Launch	<ul> <li>A</li> <li>A</li> <li>B</li> <li>B</li></ul>
Outline • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	●Isometric ▼	ious ⊕ Rotate +Sx ⊕ Rotate -Sx ↑ t ⊕ Rotate +Sy ⊕ Rotate -Sy ♦ 10 ⊙ Rotate +Sz ⊙ Rotate -Sz ⓒ Orient	Pan Duy       Image: Construction of the second of the seco	
Name       Sarch Outline       Image: Sarch Outline </td <td>Outline</td> <td>- ↓ □ ×</td> <td>💶 🔍 Q, Q, 📦 📦 😵 😘 🔿 - 🚸 Q, Q, Q, Q, Select 🥄 Mode- 解: 臣 臣 臣 医 医 医 医 医 Clipboard- [Empty] 😜</td> <td>Extend *</td>	Outline	- ↓ □ ×	💶 🔍 Q, Q, 📦 📦 😵 😘 🔿 - 🚸 Q, Q, Q, Q, Select 🥄 Mode- 解: 臣 臣 臣 医 医 医 医 医 Clipboard- [Empty] 😜	Extend *
B: / Meedinging parket B: / Meedinging parket D: / D: /	Name 💌 S	Search Outline 😽 🖕		
Details of Normal Stress* Scoping Method Geometry Selection Geometry All Bodies Lyrer Entire Section Position Top/Bottom Displex Time Display Time Display Time Contraite System Global Coordinate System Global Coordin	Model (A4, B4     Geometry     // Materials     // Materials     // Coordinate     // Coordinate     // Coordinate     // Coordinate     // Coordinate     // Connectio     // Materials     // Connectio     // Materials     // Connectio     // Materials     // Connectio     // Materials     // Connectio     // Connectio	e) e Systems ns tructural (85) lysis Settings d Support biote Displacement 2 ution (86) ) Solution Information [Control Streed]	Normal Stress 28.04.2025 15:22	2021 R2
Scope          Scoping Method       Geometry Selection         Geometry       All Bodies         Layer       Entire Section         Position       Top/Bottom         Definition       Top/Bottom         Orientation       Z Axis         By       Time         Display Time       Lass         Graph       Cordinate System         Colculuate Time History Pee       Graph         Graph       0         Method       Condinate System         Global Coordinate System       Graph         Momentativer       0         Momentativer       0         Output       Condinate System         Identifier       Suppressed         No       0         Integration Point Results       V	Details of "Normal Stres	s" → ┦ 🗆 ×	C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	
Stoping Method       Geometry Selection         Geometry       All Bodies         Layer       Entire Section         Position       Top/Bottom         Definition       Control Stress         Orientation       Z.Se+03         Obsplay Time       Last         Coordinate System       Global Coordinate System         Calculate Time Kintory       Graph         Uspipersed       No         Integration Point Results       V	Scope	-	A	
Generatry     All Bodies       Layer     Entrie Section       Position     Top/Bottom       Definition     Top/Bottom       Orientation     Z.5e + 03       10:play Time     Last       0     5e + 03       0     Signer       0:play Time     Last       Graph     It is a stress       Coordinate System     Global Coordinate System       Calculate Time is stressed     0       Udentifier     0       Suppressed     No	Scoping Method	Geometry Selection		v
Layer     Entire Section       Position     Top/Bottom       Optimition     Contral Stress       Other Laion     Z Avis       By     Time       Oslepty Time     Last       Coordinate System     Global Coordinate System       Calculate Time History Nes     Graph       Usuppressed     No       Integration Point Results     v	Geometry	All Bodies		
Position     Top/Bottom       Definition     Tope       Normal Stress     0       Orientation     Z.5e + 03       1     Orientation Stress       0     See+03       1     Orientation Stress       0     See+03       1     Orientation Stress       0     See+03       1     Orientate System       0     Coordinate System       Calculate Time History Res       1     Gentifier       Suppressed     No       0     Orientesuits	Layer	Entire Section		Ť
Definition         Time         Definition         Z Adis         Z         Z         X         Z         Z         X         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z         Z <thz< th=""> <thz< t<="" td=""><td>Position</td><td>Top/Bottom</td><td></td><td>4</td></thz<></thz<>	Position	Top/Bottom		4
Type     Normal Stress       Orientation     Z Axis       By     Time       Ospipy Time     Last       Coordinate System     Global Coordinate System       Calculate Time Kindow Pre- Udentifier     Graph       Uspippresed     No       Integration Point Results     v	Definition		7	
Orientation     2 Avis       By     Time       Display Time     Last       Coordinate System     Global Coordinate System       Calculate Time Filtistory Net     Graph       Identifier     0.       Suppressed     No       Integration Point Results     V	Туре	Normal Stress	0 5e+03 1e+04 (mm)	
By     Time       Display Time     Last       Gordinate System     Global Coordinate System       Calculate Time History Yes     Graph       Suppressed     No       Integration Point Results     v	Orientation	Z Axis	2.5e+03 7.5e+03	
□ Display Time     Last     Graph     ✓ Ӆ [       Coordinate System     Global Coordinate System     Global Coordinate System     Global Coordinate System       Gaculate Time History Res      0.     0.       Identifier     0.     0.	By	Time		
Coordinate System Global Coordinate System Calculate Time History Ves 0. 0. 0.	Display Time	Last	Grank	- I - X
Calculate Time History     Yes       Identifier     0.       Suppressed     No       Integration Point Results     V	Coordinate System	Global Coordinate System	sight	* L *
Identifier	Calculate Time History	Ves		
Suppressed No 0.	Identifier			
Integration Point Results v	Suppressed	No	0.	1.
Integration Found Results	Integration Point Per	ulte .		
	integration Point Kest	uits V		

Рис.10.1.

Инициализируем расчет. Кликаем ПКМ Static Structural  $\rightarrow$  Solve.

![](_page_35_Figure_5.jpeg)

Рис.10.2. Обведи в рамочку

После успешного окончания расчета настроим эпюру. Чтобы сделать сетку на эпюре невидимой нажмем ЛКМ Result  $\rightarrow$  Edges  $\rightarrow$  No WareFrame. В том же

окне ЛКМ **Result** → **Maximum/Minimum**, чтобы выделить максимум и минимум напряжений. Слева от окна геометрии дан разброс напряжений, распределенных в объеме балки (рис.10.2.).

Линейный расчет завершен. Закрываем окно Mechanical.

# 11. НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ

Теперь настроим геометрически и физически нелинейные расчеты. Для этого закроем окно с линейным расчетом. Создадим два модуля для новых расчетов, как это показано на рис.11.1.

Обратите внимание на связи!

Важно! Геометрически нелинейный расчет связан с КЭ-моделью (Mesh) линейного расчета, а физически нелинейный – только с геометрией (Geometry) линейного расчета.

![](_page_37_Figure_4.jpeg)

Рис.11.1.

Для **геометрически нелинейного** расчета настройка модуля **Setup** проводится точно так же, как и для линейного расчета, но за одним исключением: в окне **Analysis Settings** напротив строки **Large Deflection** ставим галочку **On** (рис.11.2.).

![](_page_37_Picture_7.jpeg)

Рис.11.2

Для физически нелинейного расчета необходимо задать модель материала.

Для этого в модуле Static Structural (на рис. 11.1. «Физически нелинейный расчет») открываем Engineering Data. ЛКМ перетаскиваем Multilinear Isotropic Hardening в окно Property (рис.11.3.).

The Many Trade Mathe Enterstand	taka ti	a da											 
rile view roois Units Extensions .	JODS H	ep											
🗋 📴 🛃 🔣 📑 Project 🦪 D2:Er	ngineerin	g Data 🗙											
🍸 Filter Engineering Data 🏙 Engineering Data	Sources												
Toolbox 🗸 🗸 🗙	Outline	of Schematic D2: Engineering Data	-					¥	ņ	x	Table: No data		- <b>q</b> :
Plasticity		A	в	с	D								
Bilinear Isotropic Hardening	1	Contents of Engineering Data		63	Source	Desc	intion						
Multilinear Isotropic Hardening	2	Material	-		Jource	Desc	ip don						
Monlinear Isotropic Hardening Power Law					Ea	tique Data a	tzero	me	20				
🔁 Nonlinear Isotropic Hardening Voce Law	3	Structural Steel		-	ce c st	stress comes from 1998				- 1			
Bilinear Kinematic Hardening	1	V Continuo citto	-	-	AS DI	ME BPV Cod v 2. Table 5-	e, Sec 110.1	ction	8,				
Multilinear Kinematic Hardening	1	Click here to add a new											
Custom Material Models	. /	material											
Coston Material Model	-		_	_				_	-				
	Properti	es of Outline Row 3: Structural Steel					- 1	•	4	×			
	_	A			В	C	1	D	E	<u></u>			
	1	Property			Value	Unit		X	52				
	2	Material Field Variables			Table						<	<u> </u>	 
	3	🔁 Density		78	350	kg m^-3	-				Chart: No data		- <b>Ļ</b>
	4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion					0	2					
	5	Coefficient of Thermal Expansion		1.	2E-05	C^-1	-	[	۵				
	6	😑 🚰 Isotropic Elasticity					1						
	7	Derive from		Yo	ung 💌		1						
	8	Young's Modulus		25	+11	Pa	-	1					
	9	Poisson's Ratio		0.	3			[					
	10	Bulk Modulus		1.	6667E+11	Pa		1					
	11	Shear Modulus		7.	6923E+10	Pa		[					
	12	😑 🔀 Strain-Life Parameters					1						
	13	Display Curve Type		St	rain 💌	1							
	14	Strength Coefficient		9.	2E+08	Pa	-	[					
	15	Strength Exponent		-0	.106			[					
7	16	Ductility Coefficient		0.	213			[					
View All / Customize	17	Ductility Exponent		-0	.47			[		¥			

Рис.11.3.

Далее нужно будет задать в табличном виде билинейную модель кривой деформирования. Пример настройки показан на рис.11.4.

![](_page_38_Figure_5.jpeg)

Рис.11.4.

Остальные настройки решателя те же, как и в линейном расчете.

Теперь остался последний вид расчета – решение одновременно и в физически, и в геометрически нелинейной постановке задачи. Делается это просто. К модулю уже имеющейся физически нелинейной задачи подсоединяем новый модуль Static Structural (на рис. 11.5. «Физическая и геометрическая нелинейность»). Обратите внимание на связи между модулями (рис.11.5.); заходим в новом модуле («Физическая и геометрическая нелинейность») в Setup и в окне Analysis Settings напротив сроки Large Deflections устанавливаем флажок в положение On – это активирует геометрическая нелинейность» и «Физическая и геометрическая нелинейность» а связь между Engineering Data модулей «Физическая нелинейность» и «Физическая и геометрическая нелинейность» активирует учет физической нелинейности.

![](_page_39_Figure_1.jpeg)

Рис.11.5.

После проведения всех вышеперечисленных настроек можно запускать расчет. Визуализация полученного решения проводится так же, как и в линейном расчете.

## 12. ЛИТЕРАТУРА

- 1. СНиП II-23-81\*СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ.
- 2. Мандриков А.П. Примеры расчета металлических конструкций. М.:Стройиздат, 1991. 431 с.