

**Белорусский государственный университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе и  
образовательным инновациям

  
О.Н. Здрок

«02» июля 2021 г.

Регистрационный № УД – 10437/уч.

**Computer mechanics**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности**

**1-31 03 02 Механика и математическое моделирование**

Минск, 2021 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 1-31 03 02-2013 утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88, учебного плана № G31/СИБД-233/уч. от 20.06.2019.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

**Мармыш Денис Евгеньевич** – доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

**Лопатин Сергей Николаевич** – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета.

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

**Чигарев Виталий Анатольевич** – доцент кафедры «Теоретическая механика и механика материалов» машиностроительного факультета Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 10 от 19.05.2021)

Научно-методическим Советом БГУ  
(протокол № 7 от 30.06.2021)

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_

М.А. Журавков

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

В настоящее время средства вычислительной техники, компьютеры и программные комплексы (пакеты программ) стали неотъемлемой частью работы механика-исследователя и механика-прикладника. Решение прикладных задач всех разделов механики не представляется возможным без использования современных вычислительных инструментов.

Проблемы и задачи актуальных фундаментальных и прикладных исследований, а также инженерных расчетов, связанных с изучением поведения и состояния сложных механических систем и конструкций, невозможно эффективно решать без интенсивного использования компьютерных технологий. Причем, последние охватывают различные аспекты компьютерного моделирования: от формулировки и постановки модельных задач до вычислений, интерпретаций и анализа результатов расчетов, а также верификации данных экспериментальных исследований.

Сегодня практически все производственные предприятия, научно-исследовательские и проектные организации, конструкторские бюро и технологические компании имеют или разрабатывают автоматизированные компьютерные системы для эффективного решения задач организации. В наши дни компьютерное моделирование физических процессов активно применяется в машиностроении, судостроении, авиастроении, промышленном и гражданском строительстве, биоинженерии, геотехнике и других высокотехнологичных и наукоемких отраслях промышленности. Так, например, классические концепции механики сплошных и дискретных сред совместно с современными вычислительными программными комплексами используются для расчётов прочности, устойчивости и долговечности различных механических систем.

С развитием науки и техники узкоспециальные знания довольно быстро устаревают. В связи с этим, для решения возникающих принципиально новых актуальных прикладных задач научные работники и инженеры должны не только обладать хорошей подготовкой в области фундаментальных наук и иметь высокую способность к самообразованию, но и владеть современными вычислительными средствами и информационными технологиями. Это требует постоянного всестороннего совершенствования вузовского образования. В области прикладной механики наиболее популярными вычислительными средствами являются системы автоматизированного проектирования (САПР) и конечно-элементные программные комплексы, которые изучаются в данном курсе. Наиболее перспективный путь лежит именно в повышении значимости общенаучных и прикладных дисциплин в учебных планах подготовки будущих научных работников и инженеров, в совершенствовании преподавания таких фундаментальных дисциплин, как физика, математика и механика, их компьютерных приложений.

**Цель учебной дисциплины** – обучить студентов автоматизированному проектированию инженерных систем при помощи современных САПР типа САД и компьютерному моделированию и физических процессов при помощи

САПР типа CAE. Изучение данного предмета предусматривает также ознакомление с аналитическими и численными методами решения задач механики технических систем, положенными в основу прикладных систем автоматизированного инженерного анализа, а также обучение методам инженерного анализа механических систем.

**Образовательная цель:** изучение основ метода конечных элементов и его использование в теоретической механике, сопротивлении материалов и механике сплошных сред, а также изучение инструментов и методов компьютерного моделирования в механике.

Учебный план № G31/СИБД-233/уч. от 20.06.2019 предназначен для студентов Совместного института Белорусского государственного университета и Даляньского политехнического университета согласно которому, часть предметов преподается на английском языке.

**Развивающая цель:** освоение и апробация приемов компьютерного моделирования и численных методов применительно к исследованиям механических процессов в сплошных средах.

**Задачи учебной дисциплины:**

а) сформировать у студентов представление о методах численного решения задач теоретической механики, сопротивления материалов и механики сплошных сред;

б) выработать у студентов навыки расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов;

в) сформировать у студентов навыки анализа численных результатов решения задач теоретической механики, сопротивления материалов и механики сплошных сред;

г) научить студентов применять современные информационные технологии к решению прикладных и исследовательских задач теоретической механики, сопротивления материалов и механики сплошных сред.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к **циклу** специальных дисциплин компонента учреждения высшего образования и является дисциплиной по выбору студента.

Как прикладная дисциплина «Computer mechanics» является приложением таких дисциплин как «Теоретическая механика», «Сопротивление материалов и основы строительной механики», «Механика сплошной среды». Она также служит средством формирования у будущих специалистов необходимых творческих навыков к построению математических моделей происходящих в природе и технике процессов, а также помогает совершенствованию способностей к научным обобщениям и выводам.

В результате изучения дисциплины «Computer mechanics» обучаемый студент должен:

**знать:**

- аналитические и численные методы решения различных типов задач механики технических систем, положенные в основу прикладных систем автоматизированного инженерного анализа (CAE);
- основы метода конечных элементов (МКЭ) и особенности его программной реализации;
- основные принципы компьютерного моделирования механических систем и физических процессов, а также этапы решения соответствующих задач;
- основные математические модели, описывающие механическое поведение сплошных сред при различных условиях;
- алгоритмы, методы, принципы создания компьютерных моделей и порядок решения задач в пакетах компьютерной механики (на примере ANSYS, Solid Works);

**уметь:**

- проектировать детали, элементы и узлы машин и механизмов, а также более сложные многокомпонентные механические системы при помощи современных САПР;
- составлять матрицу жесткости и формировать систему разрешающих уравнений для определения напряженно-деформированного состояния;
- использовать пакеты прикладных систем автоматизированного инженерного анализа ANSYS, SolidWorks для решения задач теории упругости, пластичности, вязкоупругости, кинематики, динамики технических систем и анализа физических процессов, происходящих в этих системах;
- решать задачи о прочности, устойчивости и долговечности механических систем при помощи современных CAE пакетов;
- выполнять полный цикл компьютерного моделирования процессов механики, начиная с постановки задачи и построения компьютерной модели механической системы, заканчивая заданием корректных граничных условий, произведением численных расчётов и анализом полученных результатов, а также уметь делать корректные выводы о состоянии рассматриваемых систем и давать рекомендации по их оптимизации.

**владеть:**

- методами построения расчетных моделей;
- навыками анализа механических процессов, протекающих в сплошных средах.

**Требования к компетенциям:**

В результате изучения дисциплины «Computer mechanics» студент должен обладать следующими компетенциями:

**Академические компетенции:**

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-5. Быть способным вырабатывать новые идеи (обладать креативностью).

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.

**Социально-личностные компетенции:**

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-5. Быть способным к критике и самокритике.

СЛК-6. Уметь работать в команде.

**Профессиональные компетенции:**

ПК-7. Проводить исследования в области эффективности решения производственных задач.

ПК-8. Работать с научной, нормативно-справочной и специальной литературой, разрабатывать и использовать современное учебно-методическое обеспечение;

ПК-9. Вести преподавательскую работу в учреждениях высшего и среднего специального образования в соответствии с полученной квалификацией.

ПК -14. Взаимодействовать со специалистами смежных профилей.

ПК -18. Готовить доклады, материалы к презентациям.

ПК -24. Работать с научной, технической и патентной литературой.

ПК -27. Разрабатывать новые информационные технологии на основе проектирования механических схем и систем, проводимым к математическим моделям их оптимизациям.

ПК -28. Применять методы анализа и организации внедрения инноваций.

ПК -29. Реализовывать инновационные проекты в профессиональной деятельности.

### **Структура учебной дисциплины**

Учебная дисциплина «Computer mechanics» изучается в 5 и 6 семестрах дневной формы получения образования.

Всего на изучение дисциплины отведено 312 часов, в том числе 140 аудиторных часов, из них:

- в 5 семестре - 132 часа, в том числе 72 аудиторных часа, из них: лекции – 36 часов, лабораторные занятия – 32 часа, управляемая самостоятельная работа – 4 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – зачет.

- в 6 семестре отведено 180 часов, в том числе 68 аудиторных часов, из них: лекции – 18 часов, лабораторные занятия – 44 часа, управляемая самостоятельная работа – 6 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 5 зачетных единиц.  
Форма текущей аттестации – экзамен.

## **CONTENT OF EDUCATIONAL MATERIAL**

### **Section I. Introduction to computer-aided design and computer-aided engineering**

Basic terms and definitions. Interrelation between computer-aided modeling, design engineering and manufacturing. History of computer-aided design. Overview of computer-aided design and computer-aided engineering commercial software. Fundamentals of computer-aided technologies (CAx) in mechanics: CAD/CAE/CAM tools and features.

### **Section II. Geometric modeling. Mathematical models of computer graphics**

Elementary geometric objects. 2D transformations. 3D transformations and projections. Flat curves. 3D curves. Splines (cubic splines and B-splines). Bezier curves. Surfaces. Piecewise representation of surfaces. Bezier surfaces. Solids and primitives.

### **Section III. CAD methods**

Modeling of 1D, 2D and 3D mechanical systems. Wireframe modeling. Surface modeling. Solid modeling. Modelling of parts and assemblies.

### **Section IV. Stages of computer-aided modeling of mechanical processes**

Mathematical models of mechanical behavior of materials and correspondent mechanical properties. CAD modelling of correspondent mechanical systems. Finite element mesh generation and its crucial features. Types of boundary conditions and approaches to its application. Systems of governing equations and its solution. Postprocessing.

### **Section V. Displacement method**

Kinematic analysis. Main system formation. Loading schemes for single-span statically indeterminate beams. Canonical equations of the displacement method. Determination of coefficients and free terms of canonical equations. Determination of internal force factors in cross sections of rod system. Examples.

### **Section VI. Computational structural mechanics**

Basic terms and definitions of the stiffness method. System of governing equations. Bar and beam finite elements. Trusses and frames. Local and global coordinate systems. Transformation matrix. Stiffness coefficient. Stiffness matrix for bar and beam elements. Stiffness matrix in local and global coordinate systems, its properties. Stiffness matrix for a plane truss. Properties of a stiffness matrix in global coordinates. Boundary



conditions, vector of nodal forces and vector of nodal displacements. Calculation of spatial trusses.

## **Section VII. Methods of solving systems of linear algebraic equations**

Systems of linear algebraic equations (SLAE). Gauss methods. International methods of SLAE solution. Method of successive approximations. Successive over-relaxation method. Partial relaxation method. Convergence theorem.

## **Section VIII. Dynamical problems of structural mechanics**

Dynamics of a system with one degree of freedom. Frequency, period, amplitude. Free and forced vibrations. Damped vibrations. Dynamics of a system with several degrees of freedom. Shear vibrations. Dynamics of a plane truss. Dynamics of a spatial truss. Dynamics of a frame. Dynamical analysis of systems with distributed properties. Earthquake analysis of a rod structure.

## **Section IX. Eigenvalue problem and methods of its solution**

Full and partial eigenvalue problem. Krylov method. Danilevsky method. Methods of solving eigenvalue problems for symmetric matrices. Jacobi method.

## **Tema X. Nonlinear problems of computational mechanics of rod systems.**

Definitions of geometric and physical nonlinearity. Nonlinearity of boundary conditions. Mathematical models describing nonlinear behavior of materials. Eulerian and Lagrangian approaches to the description of displacements. Green stress tensor. Piola-Kirchhoff stress tensor. Nonlinear model of a rod element. Stiffness matrix for nonlinear problems.

## **Section XI. Numerical methods of solving nonlinear algebraic equations and systems of equations**

Simple iteration method. Newton's method. Systems of nonlinear algebraic equations. Jacobi matrix. Seidel method for systems of nonlinear equations. Newton-Raphson method. Convergence theorem for Newton-Raphson method.

## **Section XII. Weighted residual method**

Variation principles in solid mechanics. System of linear independent functions. Residue. Collocation method. Collocation method with subdomains. Numerical interpretation. Examples.

## **Section XIII. Introduction to finite element method**

Basic terms and definitions of finite element method. Nodes and elements. Finite element grid. Degrees of freedom. Stiffness matrix for a finite element. Discretization. Coordinate transformation. System of governing equations.

#### **Section XIV. One-dimensional finite elements**

Rod element and its stiffness matrix. Beam element and its stiffness matrix. Shape functions for one-dimensional finite elements. Generalized one-dimensional finite element. Application of one-dimensional finite elements to rod structures analysis.

#### **Section XV. Plane finite elements**

Three-node and four-node finite elements. Degrees of freedom. Element characteristics. Shape functions. Element stiffness matrix. Nodal forces. Volume forces. System of governing equations. Plane stress analysis. Axisymmetric problems. Examples.

#### **Section XVI. High order finite elements**

Six-node triangular finite element and its properties. Eight-node square finite element and its properties. Element stiffness matrix. Methods for numerical integration.

#### **Section XVII. Spatial finite elements**

Tetrahedral element and its properties. Element in the form of a rectangular prism. Shape functions for spatial finite element. Spatial stress-strain state calculation. Examples.

#### **Section XVIII. Finite element method for dynamical problems of solid mechanics**

Discretization in non-stationary problems. Problems with damping. Mass matrix and damping matrix. Problems for plane stress state and plain strain state. Examples.

#### **Section XIX. Types of problems in computational mechanics**

Static structural analysis of parts, structures and other mechanical systems. Elastic, elastic-plastic and viscoelastic problem statements in computational mechanics. Contact

problems. Modal and eigenvalue buckling problems. Thermal problems. Coupled problems. Thermal-mechanical problems. Pre-stressed modal analysis. Kinematics and dynamics problems.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования с применением электронных средств обучения (ДО)

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия: перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов						Форма контроля знаний
		лекции	практические занятия	семинарские занятия	лабораторные занятия	иное	Количество часов УСР	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>5 семестр</b>								
1	<p><b>Introduction to computer-aided design and computer-aided engineering</b> Basic terms and definitions. Interrelation between computer-aided modeling, design engineering and manufacturing. History of computer-aided design. Overview of computer-aided design and computer-aided engineering commercial software. Fundamentals of computer-aided technologies (CAx) in mechanics: CAD/CAE/CAM tools and features.</p>	2						Вопросы для самопроверки, устный опрос
2	<p><b>Geometric modeling. Mathematical models of computer graphics</b> Elementary geometric objects. 2D transformations. 3D transformations and projections. Flat curves. 3D curves. Splines (cubic splines and B-splines). Bezier curves. Surfaces. Piecewise representation of surfaces. Bezier surfaces. Solids and primitives.</p>	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач

3	<b>CAD methods</b> Modeling of 1D, 2D and 3D mechanical systems. Wireframe modeling. Surface modeling. Solid modeling. Modelling of parts and assemblies.	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач
4	<b>Stages of computer-aided modeling of mechanical processes</b> Mathematical models of mechanical behavior of materials and correspondent mechanical properties. CAD modelling of correspondent mechanical systems. Finite element mesh generation and its crucial features. Types of boundary conditions and approaches to its application. Systems of governing equations and its solution. Postprocessing.	4			2			
5	<b>Displacement method</b> Kinematic analysis. Main system formation. Loading schemes for single-span statically indeterminate beams. Canonical equations of the displacement method. Determination of coefficients and free terms of canonical equations. Determination of internal force factors in cross sections of rod system. Examples.	2			4			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач
6	<b>Computational structural mechanics</b> Basic terms and definitions of the stiffness method. System of governing equations. Bar and beam finite elements. Trusses and frames. Local and global coordinate systems. Transformation matrix. Stiffness coefficient. Stiffness matrix for bar and beam elements. Stiffness matrix in local and global coordinate systems, its properties. Stiffness matrix for a plane truss. Properties of a stiffness matrix in global coordinates. Boundary conditions, vector of nodal forces and vector of nodal displacements. Calculation of spatial trusses.	10			6		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
7	<b>Methods of solving systems of linear algebraic equations</b>	2			2			Вопросы для самопроверки,

	Systems of linear algebraic equations (SLAE). Gauss methods. International methods of SLAE solution. Method of successive approximations. Successive over-relaxation method. Partial relaxation method. Convergence theorem.							устный опрос, решение задач
8	<b>Dynamical problems of structural mechanics</b> Dynamics of a system with one degree of freedom. Frequency, period, amplitude. Free and forced vibrations. Damped vibrations. Dynamics of a system with several degrees of freedom. Shear vibrations. Dynamics of a plane truss. Dynamics of a spatial truss. Dynamics of a frame. Dynamical analysis of systems with distributed properties. Earthquake analysis of a rod structure	6			6			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач
9	<b>Eigenvalue problem and methods of its solution</b> Full and partial eigenvalue problem. Krylov method. Danilevsky method. Methods of solving eigenvalue problems for symmetric matrices. Jacobi method.	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач
10	<b>Nonlinear problems of computational mechanics of rod systems</b> Definitions of geometric and physical nonlinearity. Nonlinearity of boundary conditions. Mathematical models describing nonlinear behavior of materials. Eulerian and Lagrangian approaches to the description of displacements. Green stress tensor. Piola–Kirchhoff stress tensor. Nonlinear model of a rod element. Stiffness matrix for nonlinear problems	2			4		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
11	<b>Numerical methods of solving nonlinear algebraic equations and systems of equations</b> Simple iteration method. Newton’s method. Systems of nonlinear algebraic equations. Jacobi matrix. Seidel method for systems of	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач

	nonlinear equations. Newton-Raphson method. Convergence theorem for Newton-Raphson method.							
<b>6 семестр</b>								
12	<b>Weighted residual method</b> Variation principles in solid mechanics. System of linear independent functions. Residue. Collocation method. Collocation method with subdomains. Numerical interpretation. Examples.	2						
13	<b>Introduction to finite element method</b> Basic terms and definitions of finite element method. Nodes and elements. Finite element grid. Degrees of freedom. Stiffness matrix for a finite element. Discretization. Coordinate transformation. System of governing equations.	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой
14	<b>One-dimensional finite elements</b> Rod element and its stiffness matrix. Beam element and its stiffness matrix. Shape functions for one-dimensional finite elements. Generalized one-dimensional finite element. Application of one-dimensional finite elements to rod structures analysis.	4			2		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
15	<b>Plane finite elements</b>	2			4		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач,

	Three-node and four-node finite elements. Degrees of freedom. Element characteristics. Shape functions. Element stiffness matrix. Nodal forces. Volume forces. System of governing equations. Plane stress analysis. Axisymmetric problems. Examples.							отчет по лабораторной работе с устной защитой; отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
16	<b>High order finite elements</b> Six-node triangular finite element and its properties. Eight-node square finite element and its properties. Element stiffness matrix. Methods for numerical integration.	2			4			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой
17	<b>Spatial finite elements</b> Tetrahedral element and its properties. Element in the form of a rectangular prism. Shape functions for spatial finite element. Spatial stress-strain state calculation. Examples.	2			4		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой; отчет по индивиду-



								альному заданию с устной защитой
18	<b>Finite element method for dynamical problems of solid mechanics</b> Discretization in non-stationary problems. Problems with damping. Mass matrix and damping matrix. Problems for plane stress state and plain strain state. Examples.	2			6			
19	<b>Types of problems in computational mechanics</b> Static structural analysis of parts, structures and other mechanical systems. Elastic, elastic-plastic and viscoelastic problem statements in computational mechanics. Contact problems. Modal and eigenvalue buckling problems. Thermal problems. Coupled problems. Thermal-mechanical problems. Pre-stressed modal analysis. Kinematics and dynamics problems.	2			22			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой
	<b>Всего</b>	<b>54</b>			<b>76</b>		<b>10</b>	

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной литературы

1. *Gromyko O.V. et al.* Computer Mechanics: Introduction to FEA and CAD/CAE Systems. Minsk: BSU, 2011. – 303 p.
2. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. Москва: ДМК Пресс, 2012. – 639 с.
3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М: Мир, 1975. – 541 с.
4. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 388 с.
5. *Ochsner A., Merkel M.* One-dimensional finite elements. An introduction to the FE method, 2nd ed. – Springer, 2018. – 418 p.
6. *Zohdi T.* A finite element primer for beginners. The basics, 2nd ed. – Springer, 2018. – 135 p.
7. *Ferreira A.J.M.* Matlab codes for finite element analysis. Solids and structures. – Springer, 2009. – 235 p.
8. *Kassimali, A.* Matrix analysis of structures, 2nd ed. – Cengage Learning, 2012. – 643 p.
9. *Paz M., Kim Y.H.* Structural dynamics. Theory and computation, 6th edition. – Springer, 2019. – 634 p.

### Перечень дополнительной литературы

1. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир 1986. – 318 с.
2. *Meirovitch L.* Computational methods in structural dynamics. – Sijthoff and Noordhoff, 1980. – 439 p.
3. *Ghaboussi J., Wu X.S.* Numerical methods in computational mechanics. – CRC Press, 2017. – 313 p.
4. *Moaveni S.* Finite Element Analysis. Theory and application with ANSYS. – Prentice Hall, NJ, 1999. –
5. *Chang K.-H.* Product Design Modeling using CAD/CAE, *Academic Press*, 2014. – 438 p.

## **Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки**

Диагностика результатов учебной деятельности по дисциплине «Computer mechanics» проводится, как правило, во время аудиторных занятий. Для диагностики используются:

- вопросы для самопроверки;
- устный опрос;
- отчеты по индивидуальным заданиям с устной защитой;
- отчеты по лабораторным работам с устной защитой;
- решение задач.

Оценка за ответы на лекциях (опрос), практических и лабораторных занятиях включает в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики.

Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины.

Для студентов, пропустивших контрольные мероприятия или получивших неудовлетворительную оценку, решение о повторном проведении контрольного мероприятия выносится в соответствии с положением о рейтинговой системе оценки знаний студентов по дисциплине в Белорусском государственном университете.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Computer mechanics» учебным планом предусмотрен в 5 семестре – зачет, в 6 семестре – экзамен.

При формировании итоговой оценки используется рейтинговая оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая оценка предусматривает использование весовых коэффициентов для текущего контроля знаний и текущей аттестации студентов по дисциплине.

**Примерные** весовые коэффициенты, определяющие вклад текущего контроля знаний и текущей аттестации в рейтинговую оценку:

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- ответы на устный опрос – 10 %;
- решение задач – 20 %;
- отчет по индивидуальным заданиям с устной защитой – 70 %.

Рейтинговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости и экзаменационной оценки с учетом их весовых коэффициентов. Вес оценки по текущей успеваемости составляет 40 %, экзаменационная оценка – 60 %.

## **Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов**

### **Section 6. Computational structural mechanics (2 ч)**

Построить эпюры внутренних усилий в многопролетной балке при помощи возможностей САПР SolidWorks. Задание включает в себя создание компьютерных моделей балок различной геометрии, а также построение эпюр поперечных сил, изгибающих моментов, прогибов и напряжений для полученных балок.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

### **Section 10. Nonlinear problems of computational mechanics of rod systems (2 ч)**

Анализ напряженного состояния стержневых систем в статической упругой, вязкоупругой и упругопластической постановке при помощи возможностей САПР SolidWorks. Индивидуальное задание включает в себя создание трехмерной твердотельной модели, а также расчёт напряженного состояния полученной системы под действием статических нагрузок. Кроме того, по результатам выполнения индивидуального задания необходимо выполнить оценку прочности системы согласно классическим теориям прочности.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

### **Section 14. One-dimensional finite elements (2 ч)**

Построение эпюр балок при помощи возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL. Индивидуальное задание включает в себя создание компьютерных моделей многопролетных балок различного поперечного сечения, а также построение эпюр поперечных сил, изгибающих моментов, прогибов и напряжений для полученных балок посредством написания программного кода на языке APDL с использованием возможностей ANSYS Mechanical APDL.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

### **Section 15. Plane finite elements (2 ч)**

Анализ плоского напряженного состояния деталей в статической упругой постановке при помощи возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL. Индивидуальное задание включает в себя создание твердотельной модели плоской детали, а также расчёт НДС полученной детали под действием статических нагрузок с использованием возможностей ANSYS Mechanical APDL.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

### **Section 17. Spatial finite elements (2 ч)**

Анализ напряженно-деформированного состояния трёхмерных деталей с использованием упругопластических моделей поведения материала при по-

мощи возможностей программного комплекса ANSYS Workbench. Индивидуальное задание включает в себя создание твердотельной модели трёхмерной детали, а также расчёт напряженно-деформированного состояния полученной детали под действием статических нагрузок с использованием возможностей ANSYS Workbench. Индивидуальное задание также предусматривает сравнение результатов, полученных на основании упругой и упругопластической моделей поведения материала. Кроме того, по результатам оценки НДС в различных постановках, необходимо произвести анализ прочности детали и выдать рекомендации по оптимальному нагружению механической системы.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

### **Примерная тематика лабораторных заданий**

Section 2. Geometric modeling. Mathematical models of computer graphics. (2 ч.)

Построение элементарных геометрических объектов. Математическое задание простейших графических примитивов. Преобразование координат при повороте и переносе системы координат.

Section 3. CAD methods (2 ч.)

Основы моделирования в SolidWorks. Задание простейших графических примитивов. Основные операции в SolidWorks при формировании графических в 1D, 2D и 3D форматах. Моделирование ансамблей и сборок.

Section 4. Stages of computer-aided modeling of mechanical processes (2 ч.)

Отличительные особенности в математических моделях описания поведения материалов. Возможности использования упругих нелинейных и упруго-пластических моделей материалов. Исследование влияния корректности построения конечно-элементной сетки на точность результатов. Задание граничных условий в перемещениях и напряжениях. Обработка результатов расчета.

Section 5. Displacement method (4 ч.)

Проведение кинематического анализа стержневой конструкции и определение степени кинематической неопределимости. Формирование системы канонических уравнений, ее решение и определение внутренних силовых факторов в поперечных сечениях стержневой системы.

Section 6. Computational structural mechanics (6 ч.)

Разбиение стержневой системы на конечные элементы. Формирование матриц преобразования и матриц жесткости в локальных системах координат для каждого стержневого элемента. Формирование матриц жесткости в глобальных системах координат. Формирование матрицы жесткости для всей конструкции. Задание граничных условий. Решение систем линейных алгебраических уравнений и анализ напряженно-деформированного состояния стержневой системы.

Section 7. Methods of solving systems of linear algebraic equations (2 ч.)

Алгоритмизация метода Гаусса для систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и его использование для решения систем канонических уравнений

метода перемещений. Алгоритмизация некоторых итерационных методов решения СЛАУ: метод последовательных приближений, метод полной релаксации.

#### Section 8. Dynamical problems of structural mechanics (6 ч.)

Проведение структурного анализа динамической системы с несколькими степенями свободы. Математическая модель динамики системы с конечным числом степеней свободы. Решение задач по динамике стержневых систем: плоская и пространственная ферма, плоская и пространственная рама. Моделирование динамики стержневых систем при сейсмическом нагружении.

#### Section 9. Eigenvalue problem and methods of its solution (2 ч.)

Алгоритмизация некоторых методов численной оценки собственных значений матриц: метод Крылова, метод Данилевского. Применение методов к определению приближенных значений собственных частот колебаний стержневых систем.

Section 10. Nonlinear problems of computational mechanics of rod systems (4 ч.)

Типы нелинейностей: физическая, геометрическая и нелинейность по граничным условиям. Решение задачи о большом прогибе балки приводящим к геометрической нелинейности. Формирование матрицы жесткости для учета геометрической нелинейности задачи.

Section 11. Numerical methods of solving nonlinear algebraic equations and systems of equations (2 ч.)

Алгоритмизация некоторых итерационных методов решения систем нелинейных алгебраических уравнений: метод простых итераций, метод Ньютона, метод Зейделя, метод Ньютона-Рафсона. Использование одного из методов к решению системы нелинейных алгебраических уравнений для геометрически нелинейного изгиба балки.

#### Section 13. Introduction to finite element method (2 ч.)

Базовые элементы моделирования и интерфейс пользователя программного комплекса ANSYS. Рабочие плоскости. Создание ключевых точек, линий, кривых. Основы твердотельного моделирования механических систем. Создание простых одно- и двумерных CAD моделей. Основы языка APDL. Базовые команды APDL. Пример построения эпюр балки коробчатого сечения при помощи интерфейса пользователя и APDL кода.

#### Section 14. One-dimensional finite elements (2 ч.)

Математическое описание одномерного конечного элемента при различных типах деформаций. Обобщенный стержневой конечный элемент и формирование его матрицы жесткости. Использование одномерных КЭ при расчете плоских и пространственных ферм и рам.

#### Section 15. Plane finite elements (4 ч.)

Создание поверхностей. Булевы операции с телами. Создание сложных геометрических форм. Основы создания КЭ сеток. Основы постпроцессинга. Пример расчёта детали на прочность в статической упругой постановке.

Базовые элементы моделирования и интерфейс пользователя ANSYS Workbench. Рабочие плоскости. Создание ключевых точек, линий, кривых. Основы твердотельного моделирования объектов на основании эскизов. Создание простых одно- и двухмерных CAD моделей.

#### Section 16. High order finite elements (4 ч.)

Создание твердотельных моделей сложных механических систем. Выбор корректных математических моделей поведения материалов и задание соответствующих физико-механических свойств. Различные варианты постановок задач (упругая, упругопластическая, вязкоупругая). Варианты граничных условий. Примеры решения задач в различных постановках и сравнение результатов решения при помощи программных комплексов ANSYS и SolidWorks. Полный анализ НДС механических систем. Прочностной анализ механических систем.

#### Section 17. Spatial finite elements (4 ч.)

Анализ НДС трёхмерных деталей с использованием упругопластических моделей поведения материала при помощи возможностей программных комплексов ANSYS и SolidWorks. Создание твердотельной модели трёхмерной детали, а также расчёт НДС полученной детали под действием статических нагрузок. Сравнительный анализ результатов в упругой и упругопластической постановке.

#### Section 18. Finite element method for dynamical problems of solid mechanics (6 ч.)

Способы задания граничных условий в динамических задачах при решении методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Дискретизация по времени и способы контроля решения на каждом временном шаге. Решение кинематических задач в программном комплексе ANSYS. Решение простейших нестационарных задач.

#### Section 19. Types of problems in computational mechanics (22 ч.)

Основы теплофизики. Граничные условия в задачах теплофизики. Особенности рашения задач теплофизики при помощи МКЭ. Пример решения задачи теплофизики для трехмерной механической системы. Пример решения связанной задачи «механика-теплофизика». Примеры решения задач на собственные колебания, потерю устойчивости, контактных задач, задач кинематики и динамики. Модальный анализ и анализ потери устойчивости сложных механических систем.

### **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержание образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;

– использование процедур, способов оценивания, фиксирующих формирование профессиональных компетенций.

## **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

### **1. Самостоятельная работа в процессе работы с литературой.**

Просмотрите конспект сразу после занятий. Пометьте материал конспекта лекций, который вызывает затруднения для понимания.

Попытайтесь найти ответы на затруднительные вопросы, используя предлагаемую литературу.

Если самостоятельно не удалось разобраться в материале, сформулируйте вопросы и обратитесь на ближайшей лекции за помощью к преподавателю.

Каждую неделю рекомендуется отводить время для повторения пройденного материала, проверяя свои знания, умения и навыки по контрольным вопросам.

### **2. Самостоятельная работа по составлению конспекта.**

1. Соберите литературу по теме. Изучите тот источник, где она изложена наиболее полно и на современном уровне.

2. По этому источнику составьте подробный план с указанием страниц книги, относящихся к определенному пункту плана.

3. Изучите другие источники. Если в них встречается материал по уже имеющемуся пункту плана, запишите в плане и новый источник с указанием страниц. Если же в другом источнике материал раскрывает тему с другой стороны, добавьте еще пункт плана.

4. Проанализировав всю литературу, собранную по теме, вы получите окончательный план, по которому можно писать конспект, объединяя по пунктам материал из разных источников.

5. Отредактируйте составленный вами конспект, внимательно прочтите его и подумайте: - удовлетворяет ли вас его общий план; - хорошо ли воспринимается смысловая, логическая связь между отдельными элементами содержания; - удачно ли использованы цитаты, правильно ли установлена связь между оборотами речи и фразами; - верно ли поставлены знаки препинания в цитатах.

### **3. Подготовка к лабораторным занятиям**

Назначение лабораторных занятий - углубление и проработка теоретического материала предмета путем регулярной и планомерной самостоятельной работы студентов на протяжении всего курса. Непосредственное проведение лабораторного занятия предполагает: решение задач и упражнений по образцу; проведение анализа результатов; систематизацию материала и подготовка отчета о проведенной работе.

*Инструкция:*



Изучите нормативные документы, обязательную и дополнительную литературу по рассматриваемому вопросу.

прочтите конспект лекции по теме.

Внимательно изучите порядок выполнения индивидуальной практической работы или алгоритм, представленный преподавателем.

#### **4. Подготовка к зачету/экзамену**

Внимательно прочитайте материал по конспекту, составленному на учебном занятии.

Прочитайте тот же материал по учебнику, учебному пособию.

Постарайтесь разобраться с непонятными, в частности новыми терминами. Часто незнание терминологии мешает студентам воспринимать материал на занятиях на должном уровне.

Ответьте на контрольные вопросы для самопроверки, имеющиеся в учебнике.

Кратко перескажите содержание изученного материала «своими словами».

Заучите «рабочие определения» основных понятий, законов.

Освоив теоретический материал, приступайте к выполнению заданий, упражнений; решению задач, расчетов по индивидуальным заданиям и т.д.

### **Примерный перечень вопросов к экзамену**

1. Математическое описание обобщенного стержневого конечного элемента.
2. Матрица жесткости элемента и способы ее формирования.
3. Матрица преобразования и ее построение.
4. Способы задания эквивалентных узловых нагрузок по граничным условиям.
5. Способы формирования глобальной матрицы жесткости для всех конструкции.
6. Функции формы и их задание.
7. Математическая модель решения динамической задачи методом конечных элементов.
8. Дискретизация решения динамической задачи по времени и контроль решения на каждом из временных этапов.
9. Численные методы решения систем линейных алгебраических уравнений.
10. Численные методы оценки собственных значений матрицы.
11. Метод перемещений и его применение к решению задач для кинематических неопределимых стержневых систем.
12. Численные методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений.
13. Математическое описание плоских трехузловых и четырехузловых конечных элементов.

14. Математическое описание пространственных конечных элементов.
15. Метод коллокаций и его численная реализация.
16. Сплаины (кубические сплайны и В-сплайны) и кривые Безье.
17. Математические модели простейших геометрических примитивов.
18. Модальный анализ стержневой системы.
19. Анализ устойчивости стержневой системы методом конечных элементов.
20. Понятие нелинейной задачи. Типы нелинейностей.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола) <sup>1</sup>
Механика сплошной среды	Кафедра теоретической и прикладной механики	нет	Изменений в содержании учебной программы не требуется. Протокол №10 от 19.05.2021.
Численные методы	Кафедра веб-технологий и компьютерного моделирования	нет	Изменений в содержании учебной программы не требуется. Протокол №10 от 19.05.2021.

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**  
на \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ учебный год

№№ ПП	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
(протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_ г.)

Заведующий кафедрой

д-р физ.-мат. наук,

профессор

(степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_ М.А. Журавков \_\_\_\_\_

(И.О. Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета

д-р физ.-мат. наук,

доцент

(степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_ С.М. Босяков \_\_\_\_\_

(И.О. Фамилия)