

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и  
образовательным инновациям

О.Н. Здрок

« 30 » 2020 г

Регистрационный № УД- 8356 /уч.



## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУХОВОГО АНАЛИЗАТОРА

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:

1-31 80 04 Механика и математическое моделирование

*профилизация Теоретическая и прикладная механика*

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 80 04-2019 и учебного плана № G31-019/уч. от 11.04.2019 г.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**Михасев Геннадий Иванович** – заведующий кафедрой био- и наномеханики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**Вихренко Вячеслав Степанович** - доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры механики и конструирования Белорусского государственного технологического университета.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой био- и наномеханики  
(протокол № 13 от 16.06.2020)

Научно-методическим советом Белорусского государственного университета  
(протокол № 5 от 17.06.2020)

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_



Михасев Г.И.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

### Цели и задачи учебной дисциплины

**Целью** дисциплины является изучение строения слухового анализатора человека, включая среднее и внутренне ухо, а также моделирование колебательной системы среднего уха, базилярной мембраны внутреннего уха и колебательной системы среднего уха при различных вариантах хирургической реконструкции.

**Задачами** дисциплины «Математическое моделирование слухового анализатора» являются:

- ✓ Формирование у студентов основных понятий о строении слухового анализатора человека и вариантах его хирургической реконструкции;
- ✓ Формирование у студентов основных понятий по математическому моделированию колебательной системы среднего уха в норме и после реконструкции, включая отдельные элементы среднего уха и базилярную мембрану внутреннего уха;
- ✓ Использование основ классической механики (механики деформируемого твердого тела, гидромеханики, теоретической механики) в моделировании среднего и элементов внутреннего уха;

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

Учебная дисциплина относится к модулю «Математическое моделирование физических процессов» компонента учреждения высшего образования.

### Связь с другими дисциплинами.

Программа дисциплины «Математическое моделирование слухового анализатора» составлена с учетом межпредметных связей и программ по смежным дисциплинам. Ее изучение базируется на знаниях дисциплин «Дифференциальные уравнения», «Теоретическая механика», «Физика», «Механика сплошных сред», «Уравнения математической физики», «Теория оболочек и пластин».

### Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Математическое моделирование слухового анализатора» должно обеспечить формирование следующей специализированной компетенции:

СК-7. Владеть методами математического моделирования при анализе сложных технических систем и процессов, многофазных сред, при решении задач биомеханики.

В результате изучения дисциплины обучаемый должен:

#### **знать:**

- методы моделирования биомеханических систем и объектов;
- общее строение сенсорных систем человека и их функционирование;
- строение среднего и внутреннего уха человека и его функционирование;

- механические свойства элементов среднего уха;
- классификацию реконструкций среднего уха;
- простейшие математико-механические модели реконструированного среднего уха при тимпанопластике;
- простейшие математико-механические модели среднего уха в норме.

**уметь:**

- рассчитывать центр тяжести слуховых косточек;
- определять ориентацию главных осей инерции слуховых косточек;
- определять главные моменты инерции слуховых косточек;
- рассчитывать напряжения в связке овального окна при заданном силовом воздействии на головку стремени косточки;
- строить простейшие математические модели равновесия тимпанальной мембраны, протеза и стремени при тимпанопластике;
- уметь рассчитывать НДС реконструированной системы среднего уха в простейшем случае тимпаноластики;
- строить простейшую динамическую модель колебательной системы реконструированного среднего уха при тимпанопластике;
- уметь находить собственные частоты колебательной системы среднего уха при различных вариантах реконструкции;
- строить простейшую математическую модель волнового движения базилярной мембраны внутреннего уха;
- уметь находить основные динамические характеристики локализованной волны, бегущей по базилярной мембране.

**владеть:**

– навыками работы с современными программными средствами численного решения математических и прикладных задач при моделировании колебательных процессов в слуховом анализаторе.

**Структура учебной дисциплины**

Дисциплина «Математическое моделирование слухового анализатора» изучается магистрантами в 3 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Математическое моделирование слухового анализатора» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 198 часов, в том числе 72 аудиторных часа, из них: лекции – 36 часов, лабораторных занятий – 36 часов. Трудоемкость учебной дисциплины составляет 6 зачетных единиц.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен

# СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

## Раздел 1. Строение слухового анализатора человека

Тема 1.1. Введение. Предмет биомеханики и методы современной математики и механики в моделировании биомеханических систем.

Тема 1.2. Сенсорные системы человека. Органы слуха и их функционирование. Строение среднего и внутреннего уха человека.

Тема 1.3. Варианты патологий и заболеваний, приводящие к хирургической реконструкции среднего уха. Технологии реконструкции среднего уха. Тимпанопластика, оссикулопластика, стапедопластика, фенестрация овального окна.

## Раздел 2. Механические свойства элементов среднего уха в норме

Тема 2.1. Механические свойства тимпанальной мембраны, слуховых косточек, мышц и связок.. Свойства связок овального окна.

Тема 2.2. Определение конфигурации среднего уха в норме. Главные оси и моменты инерции слуховых косточек.

Тема 2.3. Строение улитки внутреннего уха. Кортиев орган. Геометрическая модель и механические свойства базилярной мембраны. Напряженно-деформированное состояние оболочек положительной гауссовой кривизны.

## Раздел 3. Моделирование элементов слухового анализатора в норме.

Тема 3.1. Простейшая математическая модель среднего уха в норме. Уравнения колебаний пологой конической оболочки, моделирующей тимпанальную мембрану в норме.

Тема 3.2. Расчет НДС тимпанальной мембраны при избыточном атмосферном давлении.

Тема 3.3. Моделирование колебаний стремени в норме. Собственные частоты колебаний стремени в норме. Влияние жесткости связки овального окна на собственные частоты колебаний стремени.

Тема 3.4. Моделирование волновых форм движения базилярной мембраны. Комплексный метод ВКБ в исследовании локализованных форм движения скрученной пластинки переменной ширины.

## Раздел 4. Статические модели реконструированного среднего уха человека.

Тема 4.1. Классификация видов тимпаноластики. Простейшая математическая модель реконструированного среднего уха при тимпаноластике. Уравнения равновесия восстановленной тимпанальной мембраны..

Тема 4.2. Уравнения равновесия протеза и стремени. Потенциальная энергия среднего уха после ввода тотального протеза.

Тема 4.3. Методы интегрирования уравнений равновесия реконструированной тимпанальной мембраны.

Тема 4.4. Влияние технологии установки протеза на напряженно-деформированное состояние колебательной системы среднего уха. Устойчивые и неустойчивые положения равновесия тотального протеза.

## **Раздел 5. Моделирование динамики реконструированной колебательной системы среднего уха.**

Тема 5.1. Простейшая динамическая модель реконструированного среднего уха при тотальной реконструкции. Определение собственных частот.

Тема 5.2. Простейшая динамическая модель реконструированного среднего уха при тимпанопластике, стапедопластике и фенестрации подножной пластины стремени. «Мертвые» моды колебаний восстановленной тимпанальной мембраны, не стимулирующие движение протеза.

Тема 5.3 Модель свободных колебаний реконструированного среднего уха при тимпанопластике и стапедопластике в случае функциональной подвижности стремени.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Дневная форма получения образования**

Номер раздела	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов по УСР	Формы контроля знаний
		лекции	практические занятия	семинарские занятия	лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Строение слухового анализатора человека</b>	<b>6</b>						
1.1	Введение. Предмет биомеханики и методы современной математики и механики в моделировании биомеханических систем.	2						Опрос
1.2	Сенсорные системы человека. Органы слуха и их функционирование. Строение среднего и внутреннего уха человека.	2						Опрос
1.3	Варианты патологий и заболеваний, приводящие к хирургической реконструкции среднего уха. Технологии реконструкции среднего уха. Тимпанопластика, оссикулопластика, стапедопластика, фенестрация овального окна.	2						Опрос
<b>2</b>	<b>Механические свойства элементов среднего уха в норме</b>	<b>6</b>			<b>10</b>			
2.1	Механические свойства тимпанальной мембраны, слуховых косточек, мышц и связок.. Свойства связок	2			4			Отчет по лабораторным работам с их устной

	овального окна.								защитой
2.2	Определение конфигурации среднего уха в норме. Главные оси и моменты инерции слуховых косточек.	2				6			Отчет по лабораторным работам с их устной защитой
2.3	Строение улитки внутреннего уха. Кортиева орган. Геометрическая модель и механические свойства базилярной мембраны.	2							Собеседование
<b>3</b>	<b>Моделирование элементов слухового анализатора в норме.</b>	<b>10</b>				<b>8</b>			
3.1	Простейшая математическая модель среднего уха в норме. Уравнения колебаний пологой конической оболочкой, моделирующей тимпанальную мембрану в норме.	2							Опрос
3.2	Расчет НДС тимпанальной мембраны при избыточном атмосферном давлении.	2				4			Отчет по лабораторным работам с их устной защитой
3.3	Моделирование колебаний стремени в норме. Собственные частоты колебаний стремени в норме. Влияние жесткости связки овального окна на собственные частоты колебаний стремени.	2				4			Отчет по лабораторным работам с их устной защитой
3.4	Моделирование волновых форм движения базилярной мембраны. Комплексный метод ВКБ в исследовании локализованных форм движения скрученной пластинки переменной ширины.	4							Собеседование
<b>4</b>	<b>Статические модели реконструированного среднего уха человека.</b>	<b>8</b>				<b>10</b>			
4.1	Классификация видов тимпанопластики. Простейшая математическая модель реконструированного	2							Опрос



	среднего уха при тимпанопластике. Уравнения равновесия восстановленной тимпанальной мембраны.									
4.2	Уравнения равновесия протеза и стремени. Потенциальная энергия среднего уха после ввода тотального протеза.	2			4					Отчет по лабораторной работе с ее устной защитой
4.3	Методы интегрирования уравнений равновесия реконструированной тимпанальной мембраны.	2			2					Собеседование
4.4	Влияние технологии установки протеза на напряженно-деформированное состояние колебательной системы среднего уха. Устойчивые и неустойчивые положения равновесия тотального протеза.	2			4					Отчет по лабораторной работе с устной защитой
<b>5</b>	<b>Моделирование динамики реконструированной колебательной системы среднего уха.</b>	<b>10</b>			<b>8</b>					
5.1	Простейшая динамическая модель реконструированного среднего уха при тотальной реконструкции. Определение собственных частот.	2			4					Отчет по лабораторной работе с устной защитой
5.2	Простейшая динамическая модель реконструированного среднего уха при тимпанопластике, стапедопластике и фенестрации подложной пластины стремени. «Мертвые» моды колебаний восстановленной тимпанальной мембраны, не стимулирующие движение протеза.	4			4					Отчет по лабораторной работе с устной защитой
5.3	Модель свободных колебаний реконструированного среднего уха при тимпанопластике и стапедопластике в случае функциональной подвижности стремени.	2								Опрос
	<b>Всего по курсу</b>	<b>36</b>			<b>36</b>					

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Основная литература

1. Чигарев, А. В., Михасев Г.И., Борисов А.В. Биомеханика: Учебник (с грифом МО РБ) / А.В. Чигарев, Г.И. – Минск: Изд-во Гревцова, 2010. – 284с.
2. Кобрак Г. Среднее ухо – М.: Изд-во мед. лит., 1963.
3. Гельфанд С.А. Слух: Введение в психологическую и физиологическую акустику. –М.: Медицина, 1984.-352с.

### Дополнительная литература

4. Михасев Г.И. Выбор толщины хрящевого трансплантата для хирургического лечения ретракционного кармана тимпанальной мембраны на основании модального анализа колебательной системы среднего уха / Г.И. Михасев, С.М. Босяков, К.С. Юркевич, А.А. Дутина, Л.Г. Петрова, М.М. Майсюк // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика, Информатика. 2017. № 2. С. 52-58.
5. Босяков С.М., Михасев Г.И. Свободные колебания среднего уха, подвергнутого тотальной тимпанопластике и оссикулопластике, при функциональной подвижности подножной пластины стремени// Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2019. - № 1 – С. 46-57.
6. Михасев Г.И., С.А. Ермоченко, Л.Г. Петрова. Расчет напряженно-деформированного состояния среднего уха при его тотальной реконструкции с учетом влияния остатков тимпанальной мембраны// Российский журнал биомеханики. – 2008.– Т.12, №3.
7. Михасев Г.И., Фирсов М.А., Ситников В.П. Моделирование свободных колебаний звукопроводящей системы реконструированного среднего уха // Российский журнал биомеханики. – 2005.– Т. 9, №1.– С. 52–62.
8. Mikhasev G. On the strain–stress state of the reconstructed middle ear after inserting a malleus–incus prosthesis/ G. Mikhasev, S. Ermochenko, M. Bornitz // Mathematical Medicine and Biology (Oxford University Press). – 2010. –Vol. 27(4). – P. 289-312.
9. Михасев Г.И., Товстик П.Е. Локализованные колебания и волны в тонких оболочках. Асимптотические методы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. -292с.

## ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ И МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОЦЕНКИ

Диагностика результатов учебной деятельности по дисциплине «Математическое моделирование слухового анализатора» проводится, как правило, во время устного собеседования, в том числе по результатам лабораторных занятий. Для диагностики используются:

- устные собеседования;
- отчеты по аудиторным лабораторным работам с их устной защитой;

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 «Математическое моделирование слухового анализатора» учебным планом предусмотрен экзамен.

Полученные студентом количественные результаты учитываются как составная часть итоговой оценки по дисциплине в рамках рейтинговой системы.

Итоговая оценка формируется на основе трех документов:

- 1) Постановления министерства образования республики Беларусь от 29 мая 2012г. № 53 об утверждении Правил проведения аттестации студентов, курсантов, слушателей при освоении содержания образовательных программ высшего образования;
- 2) Положения о рейтинговой системе оценки знаний по дисциплине в Белорусском государственном университете № 189-ОД от 31.03.2020
- 3) Письма министерства образования ректорам высших учебных заведений Республики Беларусь № 21-04-1/105 от 22.12.2003 о критерии оценки знаний и компетенции студентов по 10-бальной шкале.

Формирование оценки за *текущую успеваемость* осуществляется в соответствии со следующими весовыми коэффициентами:

- ответы при опросах на лекциях и собеседованиях на лабораторных занятиях – 40 %;

- отчеты по аудиторным лабораторным работам с их устной защитой – 60 %.

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

## ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

Лабораторные работы по Разделу 2 «Механические свойства элементов среднего уха в норме»:

Задание № 1. Определить приведенные упругие круглой характеристики слоистой пластинки, моделирующей темпанальную мембрану.

Задание №2. Найти центры масс молоточка, наковальни и стремени в глобальной системе координат

Задание №3. Найти главные оси инерции слуховых косточек в глобальной системе координат.

Задание №4. Вычислить главные моменты инерции слуховых косточек.

Лабораторная работа по Разделу 3 «Моделирование элементов слухового анализатора в норме»:

Задание № 5. Найти мембранные усилия в круглой кольцевой пластинке при заданном перемещении внутреннего недеформированного контура.

Задание № 6. Определить три первых собственных частоты свободных плоскостных колебаний стремени

Задание № 7. Определить три первых собственных частоты свободных пространственных колебаний стремени с учетом жесткости связки овального окна.

Лабораторные работы по Разделу 4 «Статические модели реконструированного среднего уха человека»:

Задание № 8. Вывести уравнение равновесия протеза при тотальной реконструкции среднего уха

Задание № 9. Вывести уравнение равновесия стремени с учетом реакции связки овального окна.

Задание № 10. Определить мембранные усилия в реконструированной тимпанальной мембране в зависимости от угла наклона ствола протеза и его длины

Лабораторные работы по Разделу 5 «Моделирование динамики реконструированной колебательной системы среднего уха»:

Задание № 11. Определить первые пять собственных частот колебательной системы «пластина-стержень-пружина»

Задание № 12. Найти «мертвые» моды свободных колебаний реконструированной колебательной системы среднего уха, соответствующие образованию двух, трех, четырех узловых линий на тимпанальной мембране.

## ОПИСАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ К ПРЕПОДАВАНИЮ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

При организации образовательного процесса используется *метод учебной дискуссии*, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или согласования существующих позиций по определенной решаемой задаче (проблеме).

Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания в моделировании компонент среднего и внутреннего уха человека и их применение в биомеханике, а также в медицинской практике при реконструкции среднего уха.

### ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

#### Тема 2. Механические свойства элементов среднего уха в норме

##### Задание:

1. Получить коэффициенты в дифференциальном уравнении, описывающем движение базилярной мембраны.

#### Тема 3. Моделирование элементов слухового анализатора в норме

##### Задание:

2. Получить дисперсионное уравнение, систему Гамильтона и уравнение Риккати, описывающие локализованные волны, бегущие по базилярной мембране..

#### Методические рекомендации по организации самостоятельной работе обучающихся

Задания самостоятельной работы по учебной дисциплине «Математическое моделирование слухового анализатора» состоят из 2-х модулей и предназначены для самостоятельного изучения двух тем из Раздела 2 «Механические свойства элементов среднего уха в норме» и Раздела 3 «Моделирование элементов слухового анализатора в норме»

Модуль 1 «Механические свойства элементов среднего уха в норме» формирует достаточные знания механических свойств основных элементов среднего уха, включая молоточек, наковальню, стремя, а также связок и мышц. Для изучения данных свойств следует использовать Гл. 2 из [2], [3], а также [6]. Студент должен самостоятельно изучить упругие свойства связки овального окна, выписывать уравнения физического состояния связки и находить ее реакцию на отклонение стремени от исходного равновесия.

Модуль 2 «Моделирование элементов слухового анализатора в норме» формирует компетенции на уровне применения комплексного ВКБ-метода, позволяющего исследовать локализованные волновые формы движения в тонкой закрученной пластинке, моделирующей базилярную мембрану внутреннего уха.

Для изучения данного метода и его использования при моделировании волновых форм движения базилярной мембраны рекомендуется использовать источник [7] (стр. 75-80).

### Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Строение колебательной системы среднего уха в норме.
2. Механические свойства звукопроводящих косточек.
3. Механические свойства связки овального окна.
4. Классификация техник тимпаноластики и оссикулоластики.
5. Простейшая математическая модель барабанной перепонки, подвергнутой тимпаноластике с использованием техники "cartilage plate"
6. Математическая модель барабанной перепонки, подвергнутой тимпаноластике с использованием техники "small island".
7. Математическая модель барабанной перепонки, подвергнутой тимпаноластике с использованием техники "large island".
8. Граничные условия на тимпанальном кольце.
9. Граничные условия на контуре сопряжения барабанной перепонки и основания протеза.
10. Уравнения равновесия протеза и стремени после реконструкции, предусматривающей тимпаноластику и установку протеза, замещающего звено «молоточек-наковальня».
11. Потенциальная энергия колебательной системы реконструированного среднего уха.
12. Методы интегрирования уравнений равновесия реконструированной барабанной перепонки при заданном перемещении присоединенного протеза.
13. Простейшая динамическая модель реконструированного среднего уха при тимпаноластике и стапедотомии. Собственные частоты.
14. Мембранные усилия в барабанной перепонке в норме при заданном перемещении молоточка.
15. Простейшая математическая модель колебательной системы среднего уха в норме.

## 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)
Математическое моделирование многофазных, дисперсных сред и сопряженных задач механики	Био- и нано механики, Теоретической и прикладной механики	Нет	Вносить изменения в содержание программы не требуется (протокол № 13 от 16.06.2020)

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

на \_\_\_\_ / \_\_\_\_ учебный год

№п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2020 г.)

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н., профессор

(степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

Г.И. Михасев

(И.О.Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета

Д. пед. н., доцент

(степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

С.М. Босяков

(И.О.Фамилия)