

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖАЮ
Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям
О.Н. Здрок
« 30 » _____ 2020 г.

Регистрационный № УД 8349 Уч.

МЕХАНИКА СЫПУЧИХ И ДИСКРЕТНЫХ СРЕД

Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности

1-31 80 04 Механика и математическое моделирование

Профилизация: Теоретическая и прикладная механика

Минск, 2020 г.

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

СОСТАВИТЕЛЬ:

Журавков М.А., заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Василевич Ю.В., заведующий кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Белорусского национального технического университета, доктор физико-математических наук, профессор;

Коновалов О.Л., заведующий НИЛ факультета прикладной математики и информатики, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета (протокол №11 от 16.06.2020);

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

Зав.кафедрой _____

М.А. Журавков

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Целью учебной дисциплины «Механика сыпучих и дискретных сред» является повышение общепрофессионального уровня подготовки студентов, получение новых знаний по специальным разделам современной механики – механики сыпучих тел и дискретных сред, механики грунтов, геомеханики, гидрогеомеханики.

Задачами дисциплины «Механика сыпучих и дискретных сред» являются:

- знакомство с механикой сыпучих и дискретных сред как разделом современной механики;
- знакомство с классификацией фундаментальных и прикладных задач механики сыпучих и дискретных сред с точки зрения постановки граничных задач механики;
- знакомство с механико-математическими моделями решения различных классов задач механики сыпучих и дискретных сред;
- знакомство с современными подходами численного решения модельных задач механики сыпучих и дискретных сред;
- развитие профессионального мышления, которое обеспечивает специалисту возможность свободно оперировать профессиональными знаниями, видеть проблемы и пути их решения в самостоятельной практической деятельности, выбирать оптимальные пути их решения и методу осуществления решений;

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

Учебная дисциплина относится к модулю «Специальные разделы механики сплошных сред» компонента учреждения высшего образования.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Данная дисциплина опирается и использует знания ранее изучаемых дисциплин: «Механика сплошной среды», «Математические методы механики деформируемого твёрдого тела и основы механики разрушения»; «Численные методы механики сплошной среды»; «Механико-математические модели современной геомеханики».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Механика сыпучих и дискретных сред» должно обеспечить формирование следующей **специализированной компетенции**:

СК-4. Быть способным использовать приборы, оборудование, инструменты и аппаратуру для достижения экспериментальной верификации результатов, поставленных целей решаемых задач современной экспериментальной механики.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- сущность и классификацию задач механики сыпучих и дискретных сред как задач механики;
- современные подходы и методы к построению механико-математических аналогов задач механики сыпучих и дискретных сред;
- современные численные методы и технологии решения модельных задач механики сыпучих и дискретных сред.

уметь:

- осуществлять постановку начально-краевых задач механики сыпучих и дискретных сред;
- осуществлять математическое и численное решение модельных задач механики сыпучих и дискретных сред;
- совершенствовать классические модели механики деформируемого твердого тела, механики сплошных сред с учетом специфики объекта исследования;
- выполнять анализ и обобщение результатов решения и моделирования, выдавать рекомендации и заключения.

владеть:

- современными подходами и методами, аналитическими решениями прикладной математики для эффективного решения сложных прикладных задач механики сыпучих и дискретных сред;
- современными технологиями численного моделирования и решения задач механики сыпучих и дискретных сред.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 3 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Механика сыпучих и дискретных сред» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 198 часов, в том числе 72 аудиторных часа, из них: лекции – 36 часов, лабораторные занятия – 36 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 6 зачетных единиц.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

- Тема 1** **Содержание и сущность курса «Механика сыпучих и дискретных сред». Основные определения и понятия.**
Понятия о сыпучих телах и дискретных средах. О механических процессах в сыпучих и дискретных средах; Классификация задач механики сыпучих и дискретных сред как задач механики сплошных и дискретных сред. Особенности моделирования деформационных процессов сыпучих и дискретных тел.
- Тема 2** **Механические характеристики и предельные критерии механики сыпучих и дискретных сред.**
Основные определяющие механические характеристики сыпучих и дискретных сред. Классификация материалов по характеру деформирования от внешнего механического воздействия. Масштабный фактор. Эффективные механические характеристики сыпучих и дискретных сред.
Полные диаграммы деформирования и разрушения.
Критерии устойчивости и предельного состояния сыпучих и дискретных сред.
- Тема 3** **Базовые понятия теории напряженно-деформированного состояния сыпучих и дискретных сред.**
Тензор напряжений. Уравнения равновесия сыпучих и дискретных сред. Условия равновесия на границах и в областях контакта. Тензор деформаций. Малые и конечные деформации. Об инвариантах напряженного и деформированного состояний в математических моделях механики сыпучих и дискретных сред.
- Тема 4** **Механико-математическая постановка задач механики сыпучих и дискретных сред**
Базовые механические модели и структурные схемы описания состояния и поведения сыпучих и дискретных сред. Физические соотношения, определяющие поведение сыпучих и дискретных сред, в различных приближениях.
О моделировании сыпучих и дискретных сред с различными внутренними связями между элементами.
Полные системы уравнений для описания состояния среды в рамках различных приближений и при использовании различных моделей состояния сыпучих и дискретных сред.
- Тема 5** **Современные подходы и методы численного решения модельных задач механики сыпучих и дискретных сред в различных постановках и приближениях.**

Методы численного моделирования в рамках моделей сплошных и дискретных сред. Основные подходы к построению компьютерных модельных схем задач механики сыпучих и дискретных сред.

Особенности моделирования и решения задач механики сыпучих и дискретных сред на базе континуальных методов.

Методы дискретных элементов. Явные и неявные реализации метода дискретных элементов. Основные преимущества различных реализаций дискретных методов и их недостатки при решении разнообразных типов задач механики.

Гибридные модели. Сплошные и разрывные сопряженные методы. Принципы построения гибридных моделей. Примеры задач, реализованных на базе гибридных моделей.

О построении модельных задач с учетом формирования зон с различным деформационным состоянием. Эффект образования зон дилатансии, локальных сдвигов. Моделирование зон трещиноватости, сдвигов, областей разрушения и распространения макротрещин. Построение модельных задач с «неклассическими законами взаимосвязи компонент напряженно-деформированного состояния» (блочная структура, ниспадающая ветвь диаграммы деформирования, модели дробного порядка и др.).

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
 Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов						Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное	Количество часов УСП	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Содержание и сущность курса «Механика сыпучих и дискретных сред». Основные определения и понятия	2						Устный опрос, собеседование
2	Механические характеристики и предельные критерии механики сыпучих и дискретных сред.	4						Устный опрос, собеседование
3	Базовые понятия теории напряженно-деформированного состояния сыпучих и дискретных сред	4			4			Устный опрос, защита научно-исследовательских эссе
4	Механико-математическая постановка задач механики сыпучих и дискретных сред	8			8			Устный опрос, отчет по индивидуальным работам с устной защитой
5	Современные подходы и методы численного решения модельных задач механики сыпучих и дискретных сред в различных постановках и приближениях.	18			24			Устный опрос, отчет по индивидуальным работам с устной защитой
	Всего	36			36			

ИНФОРМАЦИОННО - МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. P.W. Cleary, J.E. Hilton, M.D. Sinnott, Modelling of industrial particle and multiphase flows // Powder Technology, 314, 2016, pp. 232-252.
2. G. Lu, J.R. Third, C.R. Müller, Discrete element models for non-spherical particle systems: From theoretical developments to applications // Chemical Engineering Science, 127, 2015, pp. 425-465.
3. W. Zhong, A. Yu, X. Liu, Z. Tong, H. Zhang, DEM/CFD-DEM Modelling of Non-spherical Particulate Systems: Theoretical Developments and Applications // Powder Technology, 302, 2016, pp. 108-152.
4. W.G. Hoover, C.G. Hoover. Simulation and Control of Chaotic Nonequilibrium Systems. World Scientific. 2015. 324 p.
5. Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах. – Мн., БГУ, 2002. – 456 с.
6. Журавков М.А. Фундаментальные решения теории упругости и некоторые их применения в геомеханике, механике грунтов и оснований. Курс лекций. Минск: БГУ, 2008. 247 с.
7. Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Прохоров П.А., Круподеров А.В. Компьютерное моделирование в геомеханике / Под общ. ред. М.А. Журавкова. Мн. БГУ, 2008. 443 с.
8. Журавков М.А., Зубович В.С. Устойчивость и сдвигание массивов горных пород. М.: РУДН, 2009. 432 с.
9. Журавков М.А., Старовойтов Э.И. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности: учеб.пособие. – Минск: БГУ, 2011. 543 с.
10. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003.
11. Механика – от дискретного к сплошному / Под ред. В. М. Фомина. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2008. 343 с.
12. Морозов Н.Ф., Паукшто М.В. Дискретные и гибридные модели механики разрушения. С.-Пб: изд. СПбГУ. 1995. 160 с.
13. Николаевский, В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984, - 232с.
14. Ревуженко А.Ф. Механика упругопластических сред и нестандартный анализ. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000.
15. Multiscale Modeling in Solid Mechanics. Editor Ugo Galvanetto. Imperial College Press. London. 2010.
16. Modern approaches to plasticity (editor D. Kolymbas). – Amsterdam,

London, New York, Tokio, 1993. 780 p.

17. Munjiza A. The combined finite-discrete element method, John Wiley&Sons, Ltd, University of London, 2004.
18. Revuzhenko A.F. Mechanics of Granular. Berlin; Heidelberg: Media Springer-Verlag, 2006.
19. B. Soltanbeigi, A. Podlozhnyuk, S.-A. Papanicolopoulos, C. Kloss, S. Pirker, J.Y. Ooi, DEM study of mechanical characteristics of multi-spherical and superquadric particles at micro and macro scales // Powder Technology, 329, 2018, pp. 288-303.

Дополнительная литература

1. Гениев Г.А., Эстрин М.И. Динамика пластической и сыпучей сред. М.: Стройиздат, 1972. 216 с.
2. Николаевский В.Н. Механика геоматериалов. Усложненные модели // Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела. М.: ВИНТИ. 1987. Т.19. С148-182.
3. Chappel, BA. The mechanics of blocky material, Australia National University, Canberra, 1972.
4. Mustoe GGW. Generalized formulation of the discrete element method. Engineering Computations 1992; 9(2):181-190.
5. Taylor LM. BLOCKS, A block motion code for geomechanics studies. Sandia National Laboratories, 1983.
6. Hentz S, Donze FV, Daudeville L. Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates. Comput Struct, 2004; 82: 2509-2524.
7. Shi GH. Discontinuous deformation analysis, a new numerical model for the statics and dynamics of block systems. PhD thesis, Univ. of California, Berkeley, Berkeley, Calif, 1988.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Диагностика результатов учебной деятельности по дисциплине «Механика сыпучих и дискретных сред» проводится, как правило, во время аудиторных занятий. Для диагностики используются:

- отчеты по лабораторным работам и индивидуальным заданиям с устной защитой;
- устный опрос;
- защита научно-исследовательских эссе;
- собеседование.

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

практики. Оценка эссе, реферата формируется на основе следующих критериев: оригинальность (новизна) постановки проблемы и способа ее интерпретации/решения, самостоятельность и аргументированность суждений, грамотность и стиль изложения.

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

Успеваемость студентов в рамках дисциплины «Механика сыпучих и дискретных сред» рекомендуется оценивать в конце семестра в форме экзамена.

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.

Итоговая оценка по курсу «Механика сыпучих и дискретных сред» формируется на основе 3-х документов:

1. Правила проведения аттестации студентов, курсантов, слушателей при освоении содержания образовательных программ высшего образования (утверждены Постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 29 мая 2012 г. № 53)
2. Положение о рейтинговой системе оценки знаний студентов по дисциплине в Белорусском государственном университете (приказ ректора № 189-ОД от 31.03.2020)
3. Критерии оценки знаний и компетенций студентов по 10-балльной шкале (Письмо Министерства образования Республики Беларусь 21-04-01/105 от 22.12.2003).

Весовые коэффициенты, определяющие вклад текущего контроля знаний и текущей аттестации в рейтинговую оценку:

- ответы при собеседовании, устном опросе – 30%;
- проверка индивидуальных заданий, защита научно-исследовательских эссе – 30%;
- подготовка отчетов и защита лабораторных работ – 40%.

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

Примерная тематика лабораторных занятий

Тема 3. Базовые понятия теории напряженно-деформированного состояния сыпучих и дискретных сред. (4 ч.)

Уравнения равновесия сыпучих/дискретных тел для различных структурных схем. Предельные условия для сыпучих/дискретных тел. Уравнения предельного напряженного состояния сыпучих/дискретных тел.

Связь напряженного и деформированного состояний для сыпучих/дискретных сред. Малые и конечные деформации.

Тема 4. Механико-математическая постановка задач механики сыпучих и дискретных сред. (8 ч.)

Для различных представлений сыпучей/дискретной среды предложить и обосновать структурную модель поведения; выбрать и обосновать физические соотношения, описывающие состояние и поведение сыпучей/дискретной среды. Механико-математические модели поведения внутренних связей в сыпучих/дискретных телах.

Привести полную систему уравнений для исследования состояния сыпучего/дискретного тела в рамках различных приближений и при использовании различных моделей.

Тема 5. Современные подходы и методы численного решения модельных задач механики сыпучих и дискретных сред в различных постановках и приближениях. (24 ч.)

Для конкретных структурных моделей состояния сыпучих/дискретных тел составить алгоритм решения модельной задачи по исследованию состояния изучаемого объекта. Обосновать выбор метода численного решения модельной задачи.

Для рассматриваемой модельной задачи обосновать критерий предельного состояния и составить алгоритм численного решения.

Описать алгоритмы решения прикладной конкретной модельной задачи с использованием МКЭ и МДЭ. Построить численные модели в различных приближениях рассматриваемого объекта исследования.

Описать алгоритм решения сформулированных модельных задач с использованием гибридных методов. Построить гибридные модели для исследуемых объектов.

Описать алгоритм решения сформулированных модельных задач с учетом дополнительных эффектов (зоны дилатансии и дезинтеграции, участки локальных сдвигов, зоны трещиноватости и макротрещин).

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины «Механика сыпучих и дискретных сред»

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

- освоение содержания образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- использование процедур, способов оценивания, фиксирующих формирование профессиональных компетенций.

Примерный перечень заданий самостоятельной работы студентов

Формы контроля знаний – отчет, эссе, индивидуальный или группой проект, презентации, обзор

Тема 3. Базовые понятия теории напряженно-деформированного состояния сыпучих и дискретных сред.

Выполнить сравнительный анализ основных положений теории напряженно-деформированного состояния твердых сплошных сред и теории напряженно-деформированного состояния сыпучих. Выбрать прикладную задачу в приближении твердого и сыпучего материалов и выписать условия равновесия и предельные условия; выполнить анализ.

Выполнить сравнительный анализ основных положений теории напряженно-деформированного состояния твердых деформируемых сред и теории напряженно-деформированного состояния дискретных сред. Выбрать прикладную задачу в приближении твердого и дискретного материалов и выписать условия равновесия и предельные условия; выполнить анализ.

Исследовательская работа о сравнении и анализе инвариантов напряженного и деформированного состояний в математических моделях механики сплошных твердых деформируемых, сыпучих и дискретных сред.

Тема 4. Механико-математическая постановка задач механики сыпучих и дискретных сред.

Выполнить анализ механико-математических постановок задач для описания НДС сыпучих и дискретных сред в различных модельных приближениях, для различных структурных схем. Обосновать выбранные механико-математические модели для конкретных типов прикладных задач. Описать алгоритмы решения задач для таких классов задач.

Тема 5. Современные подходы и методы численного решения модельных задач механики сыпучих и дискретных сред в различных постановках и приближениях.

Обзор и сравнительный анализ методов численного моделирования в рамках моделей сплошных и дискретных сред. Основные подходы к построению компьютерных модельных схем задач механики сыпучих и дискретных сред, используемые в различных пакетах компьютерного моделирования.

Выбрать пакет метода конечных разностей, метода конечных элементов и исследовать особенности моделирования поведения сыпучих/дискретных тел на примере решения конкретной задачи механики сыпучих/дискретных сред.

Выполнить обзор основных пакетов, реализующих метод дискретных элементов. Выполнить решение тестовых задач.

Исследовать алгоритмы, реализующие гибридные модели.

Примерный перечень вопросов к экзамену

- Понятие о сыпучих телах как объекта механики сплошных сред.
- Описание дискретных тел как объектов механики сплошных сред и механики дискретных сред.
- Особенности механических процессов в сыпучих и дискретных средах.

- Особенности механических процессов в дискретных средах.
- Основные механические характеристики сыпучих сред.
- Основные механические характеристики дискретных сред
- Масштабный фактор.
- Эффективные механические характеристики сыпучих сред.
- Эффективные механические характеристики дискретных сред.
- Полные диаграммы деформирования и разрушения.
- Критерии устойчивости и предельного состояния сыпучих сред.
- Критерии устойчивости и предельного состояния дискретных сред.
- Базовые механические модели и структурные схемы описания состояния и поведения сыпучих сред.
- Базовые механические модели и структурные схемы описания состояния и поведения дискретных сред.
- Физические соотношения, определяющие поведение сыпучих сред, в различных приближениях.
- Физические соотношения, определяющие поведение дискретных сред, в различных приближениях
- Моделирование внутренних связей между элементами.
- Полные системы уравнений для описания состояния сыпучей среды в рамках различных приближений.
- Полные системы уравнений для описания состояния дискретных сред в рамках различных приближений.
- Условия предельного состояния сыпучей среды. Механико-математическая постановка задачи исследования предельного состояния сыпучей среды.
- Особенности и подходы к построению модельных краевых задач механики сыпучих сред.
- Особенности и подходы к построению модельных краевых задач механики дискретных сред.
- Основные методы численного решения задач механики сыпучих и дискретных сред.
- Построение компьютерных модельных схем задач механики сыпучих сред.
- Построение компьютерных модельных схем задач механики дискретных сред.
- Моделирование и решение задач механики сыпучих сред на базе континуальных методов.
- Моделирование и решение задач механики дискретных сред на базе континуальных методов.
- Основные положения метода дискретных элементов.
- Различные реализации метода дискретных элементов.
- Основные преимущества различных реализаций дискретных методов и их недостатки при решении задач механики.
- Гибридные модели. Принципы построения гибридных моделей.

- Гибридные модели. Подходы к решению задач на основе гибридных методов.
- Моделирование структурных особенностей и особенностей локального поведения сыпучих сред.
- Моделирование структурных особенностей и особенностей локального поведения дискретных сред.
- Построение модельных задач с учетом ниспадающей ветви диаграммы деформирования.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Современная экспериментальная механика	Кафедра теоретической и прикладной механики	Нет	Вносить изменения не требуется (протокол №11 от 16.06.2020)
Математическое моделирование многофазных, дисперсных сред и сопряженных задач механики	Кафедра теоретической и прикладной механики	Нет	Вносить изменения не требуется (протокол №11 от 16.06.2020)

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

на ____ / ____ учебный год

№п/ п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры теоретической и прикладной механики (протокол № ____ от _____ 20_ г.)

Заведующий кафедрой
д. физ.-мат. наук, профессор

М.А. Журавков

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
д. физ.-мат. наук, доцент

С.М. Босяков

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на ____ / ____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
_____ (протокол № ____ от _____ 201_ г.)

Заведующий кафедрой

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
