

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**

Геологический факультет
Кафедра инженерной и экологической геологии

УТВЕРЖДАЮ
Декан геологического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
чл.-корр. РАН Еремин Н.Н.



«25» сентября 2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины (модуля):

**В-ПД Современные нелинейные модели деформирования и разрушения грун-
тов**

**Уровень высшего образования:
Магистратура (ИМ)**

**Направление подготовки/ специальность:
05.04.01 Геология**

**Профиль программы магистратуры:
Инженерная геология**

**Форма обучения:
*Очная***

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методическим Советом Геологического факультета
(протокол № 6 от 8 сентября 2025 г.)

Москва 2025

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 05.04.01 «Геология» (*программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки*), утвержден приказом МГУ от 30 декабря 2020 г. № 1379 (в действующей редакции).

Год (годы) приема на обучение – 2024.

© Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения факультета.

Цель и задачи дисциплины

Целью курса «Современные нелинейные модели деформирования и разрушения грунтов» является подготовка будущего магистра к самостоятельной работе по определению в ходе инженерно-геологических изысканий параметров механических моделей грунтов, используемых при выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов, подготовке рекомендаций по выбору модели при проектировании.

Задачи – освоение основных принципов построения механических моделей материалов, в частности, грунтов, требований к выбору наиболее рациональной механической модели для расчета и ее валидации, знакомство с методами и средствами определения входных параметров модели.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП – вариативная часть, профессиональный блок, дисциплина по выбору, курс – II, семестр – 3.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

освоение дисциплин «Инженерная геология, часть 1. Грунтоведение», «Инженерная геология, часть 2. Инженерная геодинамика», «Высшая математика», «Механика грунтов», «Методы исследования грунтов в массиве», желательно освоение дисциплин «Решение инженерно-геологических задач численными методами», «Расчетные характеристики грунтов: методы определения и применение в проектировании».

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
ОПК-3 (на уровне магистратуры)	ОПК-3.М Самостоятельно формулирует цели исследований, устанавливает последовательность решения профессиональных задач.	Знать: основные принципы построения механических моделей грунтов. Уметь: определять комплекс параметров физико-механических свойств грунтов и выбирать наиболее рациональную математическую, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. Владеть: математическим аппаратом механики сплошной среды и механики грунтов.
ОПК-7 (на уровне магистратуры)	ОПК-7.М Выбирает и использует современное научное и техническое оборудование для решения научных и практических задач по профилю подго-	Знать: методы и средства определения входных параметров модели. Уметь: определять комплекс параметров физико-механических свойств грунтов и выбирать наиболее рациональную математическую модель, ориентироваться в литературных ис-

	товки	точниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. Владеть: математическим аппаратом механики сплошной среды и механики грунтов.
СПК-1 (на уровне магистратуры) (формируется частично).	СПК-1.М Формирует программы инженерно-геологических исследований и инженерно-геологических изысканий в соответствии с поставленными научными и практическими задачами, составляет программу инженерно-геологического мониторинга.	Знать: требования к выбору модели для проведения расчета и ее валидации. Уметь: ориентироваться в литературных источниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. Владеть: навыками по формированию проектной документации: технического задания на инженерные изыскания и программы работ.
СПК-3.М. (на уровне магистратуры)	СПК-3.М Анализирует, обобщает и систематизирует результаты инженерно-геологических исследований и изысканий в соответствии с поставленными задачами и действующими нормативными документами.	Знать: методы и средства определения входных параметров модели. Уметь: ориентироваться в литературных источниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. Владеть: математическим аппаратом механики сплошной среды и механики грунтов, математической статистики.

4. Объем дисциплины: 1 з.е., в том числе 28 академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем (лекции), 8 академических часов на самостоятельную работу обучающихся, форма промежуточной аттестации – зачет.

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Освоение курса начинается с теоретических положений механики деформируемого твердого тела как основы механики грунтов. Обсуждаются положения теории упругости и теории пластичности, вводятся необходимые понятия, такие как компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС), константы упругости, понятия главных напряжений и главных деформаций, инварианты напряжений. Так же приводятся необходимые термины и определения. Отдельное внимание уделяется различным условиям прочности (пластичности) и их применимости к грунтовой среде, как к выраженно пластическому телу. Дополнительно излагаются основы механики грунтов критического состояния, широко используемой в зарубежных странах, а также особенности реологического поведения грунтов.

Дальнейший курс строится на поступательном изложении теоретических основ наиболее распространенных математических моделей по мере их усложнения. Для каждой модели приводится историческая справка; аналитическое обоснование; список и методика определения

параметров, входящих в модель; рекомендации по ее применению к грунтовой среде. В курсе дисциплины рассматриваются следующие модели:

- упругая модель Гука;
- модели прочности (Треска - Сен-Венана, Мизеса - Губера);
- идеально-упругопластические модели (Кулона - Мора, Друкера - Прагера, Cam-Clay, Modified Cam-Clay, Hoek-Brown);
- упрочняющиеся модели (Hardening Soil, Hardening Soil Small-Strain, Soft Soil);
- вязкоупругие и упруго-вязкопластические модели (Soft Soil Creep, Sekiguchi - Ohta);
- модели, учитывающие анизотропию свойств (NGI-ADP, Jointed Rock).

5. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий:

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе		
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, часы</i>		Самостоятельная работа обучающегося (выполнение практических работ), <i>часы</i>
		Занятия лекционного типа	Всего	
Раздел 1. Краткие основы механики деформируемого твердого тела	5	4	4	Работа с литературой, подготовка к контрольному опросу, 1 час
Раздел 2. Основы теории пластичности	5	4	4	Работа с литературой, подготовка к контрольному опросу, 1 час
Раздел 3. Механика грунтов критического состояния	5	4	4	Работа с литературой, подготовка к контрольному опросу, 1 час
Раздел 4. Реологические свойства грунтов	5	4	4	Работа с литературой, подготовка к контрольному опросу, 1 час
Раздел 5. Комплексные многопараметрические модели	7	6	6	Работа с литературой, подготовка к контрольному опросу, 1 час
Раздел 6. Обзор прочих распространенных моделей	5	4	4	Работа с литературой, подготовка к контрольному опросу, 1 час
Промежуточная аттестация <u>зачет</u>	4	2		2
Итого	36	28		8

Содержание разделов дисциплины:

Раздел 1. Краткие основы механики деформируемого твердого тела

Краткие основы механики деформируемого твердого тела. Напряжения, деформации, понятие напряженно-деформированного состояния в точке пространства. Понятия упругости, пластичности, прочности, вязкости, ползучести. Базовые элементы (простейшие реологические тела) построения механических моделей и их комбинации. Модели Прандтля, Максвелла, Кельвина-Фойгта. Линейно-упругая модель Гука, ее модификации применительно к механике грунтов. Закон Гука в общем виде, модуль общей деформации, модуль повторного нагружения.

Раздел 2. Основы теории пластичности

Пространство главных напряжений, вид поверхности текучести. Основные теории и условия прочности - Треска, Сен-Венана, Кулона-Мора, Мизеса. Сопротивление сдвигу, оценка пластических деформаций по ассоциированному и неассоциированному законам пластического течения. Модель Кулона-Мора, ее основные закономерности и модификации. Понятие дилатансии, теория Роу. Понятие потенциала пластичности, упрочнение и разупрочнение. Инвариантные условия прочности и их преимущества - условия Друкера-Прагера, Мацуока-Накаи, Ладе-Дункана. Модель Друкера-Прагера, ее основные закономерности.

Раздел 3. Механика грунтов критического состояния

Теоретические основы механики грунтов критического состояния, границы применимости. Понятие критического сопротивления сдвигу, поверхность Ворслева, линия критического состояния. Нелинейное объемное деформирование по логарифмическому закону. Модель Cam Clay, ее основные закономерности и модификации. Ограничение упругих объемных деформаций дополнительной поверхностью текучести. Модель Soft Soil, теоретическое обоснование и методы определения параметров. Рекомендации по применению модели Soft Soil.

Раздел 4. Реологические свойства грунтов

Способы учета вязкости деформирования, ползучесть и релаксация напряжений. Закон (модель) Бингама-Шведова, уравнение Кельвина-Фойгта, уравнение Максвелла. Модель Sekiguchi – Ohta, принцип статистической оценки объемной ползучести. Модель Soft Soil Creep, теоретическое обоснование и методы определения параметров. Модель Extended Drucker-Prager, понятие поверхности ползучести. Метод определения параметров ползучести при различных уровнях средних напряжений. Рекомендации по применению моделей с учетом реологических свойств.

Раздел 5. Комплексные многопараметрические модели

Гиперболический закон сдвигового деформирования. Модель Duncan-Chang, модель Ю.К. Зарецкого. Упрочнение и разупрочнение. Изотропное и кинематическое упрочнение. Модели с независимой жесткостью при сдвиге и объемном сжатии: модель Hardening Soil, модель Hardening Soil Small-strain. Методика определения параметров с учетом обеспечения совместности параметров. Особенности статистической обработки и оптимизации значений с учетом требований нормативных технических документов.

Раздел 6. Обзор прочих распространенных моделей

Анизотропия свойств и методы ее учета. Модель NGI-ADP, методы определения параметров и область применения. Специализированные модели для скальных грунтов. Условие прочности Хука-Брауна, модель Хука-Брауна, методы определения параметров прочности и жесткости скального массива. Модель Jointed rock, методы описания анизотропии строения скальных массивов. Модель UBC3D-PLM и ее возможности при моделировании динамического разжижения дисперсных грунтов. Заключительные положения курса.

6. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Текущий контроль усвоения дисциплины осуществляется при контрольном тестировании.

Примерный перечень вопросов (тестов) для проведения текущего контроля:

1. Компоненты пространственного напряженно-деформированного состояния в точке.
2. Базовые элементы механических моделей и их принципы работы.
3. Функциональные возможности линейно-упругой модели Гука.
4. Основные теории прочности, используемые в механике грунтов.
5. Функциональные возможности идеально-упругопластической модели Кулона-Мора.
6. Природа дилатансии и ее влияние на прочность грунтов.
7. Преимущества инвариантных условий прочности.
8. Функциональные возможности идеально-упругопластической модели Друкера-Прагера.
9. Основные положения механики грунтов критического состояния.
10. Различия между моделями семейства Cam-Clay.
11. Пластическое объемное сжатие в модели Soft Soil.
12. Принципы учета ползучести в моделях Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, Extended Drucker-Prager.
13. Гиперболический закон деформирования применительно к дисперсным грунтам.
14. Функциональные возможности модели упрочняющегося грунта Hardening Soil.
15. Необходимость учета нелинейности в упругой постановке.
16. Особенности моделей, применяемых для скальных и крупнообломочных грунтов.
17. Функциональные возможности модели Хука-Брауна.
18. Принципы выбора механической модели в зависимости от разновидности грунта и типа сооружения.
19. Дополнительные пункты программы изысканий при определении параметров нелинейных моделей.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации:

1. Пространственное напряженно-деформированное состояние в точке: теоретические предпосылки, компоненты НДС.
2. Принципы построения механических моделей, основные механические свойства материалов, в частности грунтов.
3. Линейно-упругая модель Гука: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
4. Основные теории прочности, используемые в механике грунтов.
5. Идеально-упругопластическая модель Кулона-Мора: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
6. Инвариантные условия прочности: принципы построения, преимущества и недостатки, область применения.
7. Неассоциированный закон пластического течения, понятие потенциала пластичности. Явление дилатансии.
8. Идеально-упругопластическая модель Друкера-Прагера: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
9. Основные положения механики грунтов критического состояния.

10. Функциональные возможности и область применения моделей семейства Cam-Clay.
11. Методы определения параметров ползучести и применение моделей Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, Extended Drucker-Prager.
12. Гиперболические модели деформирования, основные закономерности и методика определения параметров.
13. Функциональные возможности модели упрочняющегося грунта Hardening Soil.
14. Методика определения параметров модели упрочняющегося грунта Hardening Soil.
15. Идеально-упругопластическая модель Хука-Брауна: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
16. Модель анизотропного грунта NGI-ADP: возможности, методы определения параметров, область применения.
17. Модель с возможностью воспроизведения динамического разжижения UBC3D-PLM: возможности, методы определения параметров, область применения.
18. Принципы выбора механической модели в зависимости от разновидности грунта и типа сооружения.
19. Дополнительные пункты программы изысканий при определении параметров нелинейных моделей.
20. Требования к лабораторному оборудованию, применяемому для определения параметров нелинейных механических моделей.

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Результаты обучения	Незачет	Зачет
Знания (устный опрос): основные принципы построения механических моделей грунтов, требования к выбору модели для расчета и ее верификации, методы и средства определения входных параметров модели.	Фрагментарные знания или отсутствие знаний	Сформированные систематические знания или общие, но не структурированные знания теории упругости и пластичности, принципов выбора оптимальной модели.
Умения (устный опрос): определять комплекс механических свойств грунтов и выбирать наиболее рациональную механическую модель, ориентироваться в литературных источниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях.	В целом успешное, но не систематическое умение или отсутствие умений	Успешное и систематическое или в целом успешное, но содержащее отдельные пробелы (допускает неточности непринципиального характера) умение выбирать наиболее рациональную модель и обеспечивать ее параметрами.
Навыки (владения, опыт деятельности) (устный опрос): применение математического аппарата механики сплошной среды и механики грунтов для решения прикладных задач	Навыки владения математическим аппаратом механики сплошной среды отсутствуют	Сформированные навыки владения методами нелинейной механики грунтов в рамках изложенного курса или в целом сформированные навыки владения методами, но используемые не в активной форме.

7. Ресурсное обеспечение:

Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

1. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов// М.: Изд-во Рост. ун-та, 1989. 607 с. (доступно в библиотеке МГУ и в электронном виде в кафедральном фонде)
2. Вязов С.С. Реологические основы механики грунтов. // М.: Высшая школа, 1978. 447 с. (доступно в библиотеке МГУ и в электронном виде в кафедральном фонде)
3. Мирный А.Ю., Мосина А.С. Математические модели грунтов для инженеров// М.: Геоинфо, 2024 (доступно в кафедральном фонде)

- дополнительная литература:

1. Burland J.B. On the compressibility and shear strength of natural clays// Geotechnique, 1990, No. 3(4). P. 329-378.
2. Drucker D.C., Prager. W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Journal of applied mathematics, 1952, No. 10. P. 157-165.
3. Duncan J.M., Chang C.-Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils // Journal of the Soil mechanics and foundations division ASCE, 1970, 96. P. 1629-1652.
4. Janbu N. Soil compressibility as determined by odometer and triaxial tests // Proc. ECSMFE, 1963. P. 19-25.
5. Rowe P.W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact // Proceedings of the Royal Society of London, 1962. Vol. 269, No. 1339. P. 500-527.
6. Schanz T., Vermeer P.A. Bonnier P.G. The hardening soil model: Formulation and verification. // Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 years of PLAXIS, 1999. 16 p.
7. Vermeer P.A., de Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. // Heron, 1984, No. 3 (29). 65 p.
8. Wood D.M. Soil behavior and critical state // Cambridge University Press, 1990. 462 p.

- Перечень лицензионного программного обеспечения: не требуется
- Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем: - реферативная база данных издательства Elsevier: www.sciencedirect.com
- Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:
 - поисковая система научной информации www.scopus.com
 - электронная база научных публикаций www.webofscience.com
 - электронная база научных публикаций <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Описание материально-технической базы
 - лекционные аудитории с проектором и экраном.

8. Язык преподавания – русский.

9. Преподаватель: Ответственный за курс — Мирный Анатолий Юрьевич (доцент кафедры инженерной и экологической геологии, к.т.н.). Преподаватель: Мирный А.Ю.

10. Разработчик программы: доцент, к.т.н. Мирный А.Ю.