

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

УТВЕРЖДАЮ
и.о. декана Геологического факультета
чл.-корр. РАН _____/Н.Н.Ерёмин/
«___» _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
Гидрогеодинамическое моделирование

Автор-составитель: Поздняков С.П.

Уровень высшего образования:
Бакалавриат

Направление подготовки:
05.03.01 Геология

Направленность (профиль) ОПОП:
Гидрогеология, инженерная геология, геокриология

Форма обучения:
Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методическим Советом Геологического факультета
(протокол № _____, _____)

Москва

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Геология» (программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки).

Год (годы) приема на обучение: 2022

© 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 "Гидрогеодинамическое моделирование" является изучение теоретических основ и методов построения математических моделей потоков подземных вод и формирование устойчивого комплекса базовых знаний о моделировании геофильтрации потоков подземных вод постоянной и переменной плотности.

Задачи:

- получить теоретические представления о моделировании геофильтрационных и геомиграционных процессов, как методе решения прогнозных гидрогеологических задач на объектах антропогенного воздействия на подземные воды.
- освоить основные принципы построения конечно-разностных и конечно-объемных численных схем решения уравнений геофильтрации.
- изучить методики численного моделирования геофильтрации в различных постановках и различным набором граничных условий, отражающих формирование геофильтрационных потоков подземных вод различного масштаба в естественных и нарушенных условиях.
- получить теоретические представления о связанных моделях геофильтрации, миграции загрязнения и теплопереноса в подземных водах, а также ознакомиться с методами моделирования связанных задач.
- получить навыки работы с современным программным обеспечением и решение на нем задач геофильтрации, приближенных к реальным условиям для получения навыков геофильтрационной и вычислительной схематизации и моделирования геофильтрации.
- освоить современные профессиональные понятия и термины в области численного моделирования геофильтрации.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО – вариативная часть, профессиональный цикл, курс – IV, семестр – 7.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

освоение дисциплин «Математический анализ», «Уравнения математической физики», «Геоинформационные системы в геологии», «Гидрогеология», «Гидрогеодинамика», Дисциплина необходима в качестве предшествующей для дисциплин «Геогидрология», «Разведочная гидрогеология», дисциплин магистерской программы «Гидрогеология», а также для научно-исследовательской работы и выполнения выпускных квалификационных работ.

3. Результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы (показатели) достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), сопряженные с компетенциями
ОПК-1.Б Способен применять знания фундаментальных разделов наук о Земле, базовые знания естественно-научного и математического циклов при решении стандартных профессиональных задач (формируется частично).	Б-ОПК-1.1. Использует базовые знания фундаментальных разделов наук естественно-научного и математического циклов в профессиональной деятельности	Знать: – принципы численной конечно-разностной аппроксимации уравнений геофильтрации с помощью структурированных и неструктурированных пространственных сеток
ОПК-2.Б. Способен	Б-ОПК-2.1.	Знать: методы конечно-разностной

применять теоретические основы фундаментальных геологических дисциплин при решении задач профессиональной деятельности (формируется частично).	Использует теоретические знания о закономерностях и особенностях геологических процессов для решения профессиональных задач	аппроксимации уравнений геофильтрации и основные методы решения систем конечно-разностных уравнений для линейных и нелинейных задач геофильтрации Владеть: навыками построения структурированных конечно-разностных сеток для решения численными методами геофильтрационных задач условий
ОПК-3.Б Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности в соответствии с профилем подготовки (формируется частично)	. Б.ОПК-3. И-3. Владеет базовыми навыками обработки и интерпретации информации при решении стандартных задач профессиональной деятельности в соответствии с профилем подготовки	Знать: методы геофильтрационного моделирования напорной и безнапорной геофильтрации потоков подземных вод постоянной и переменной плотности Уметь: проводить геофильтрационную схематизацию и последующую вычислительную схематизацию для численного конечно-разностного моделирования
СПК-1.Б Способен оценивать гидрогеологические, инженерно-геологические и геокриологические условия территорий для различных видов хозяйственной деятельности (формируется частично)	Б-СПК-1.1 Владеет навыками сбора, систематизации и интерпретации данных гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических съёмок, исследований и изысканий	Знать: основные этапы создания геофильтрационных моделей реальных гидрогеологических объектов Уметь: решать с помощью методов моделирования практически важные задачи прогнозирования изменения режима и баланса подземных вод при воздействии на них инженерных мероприятий Владеть: навыками создания геофильтрационных моделей гидрогеологических объектов при помощи специализированных программных пакетов моделирования геофильтрации

4. Объем дисциплины (модуля) составляет **3** зачетные единицы или **108** часов, в том числе **70** часа аудиторных занятий (**42** часов лекций, **28** часов практических занятий) и **38** часов внеаудиторных самостоятельных занятий студента. Форма – экзамен.

5. Формат обучения – лекции, практические занятия и самостоятельная работа студента

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

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Гидрогеодинамическое моделирование является по существу продолжением базового курса гидрогеодинамики, так как современные методы гидрогеодинамических расчетов

связаны в основном с применением математического моделирования. Поэтому специалистам-гидрогеологам необходимо овладеть теоретическими основами численного моделирования и практическими методами и способами решения как прямых, так и обратных задач геофильтрации. Курс включает знакомство с методами конечных разностей применительно к задачам геофильтрации, методикой моделирования прямых задач геофильтрации, подходами к калибровке геофильтрационных моделей. В завершающей части курса рассматриваются вопросы моделирования потоков переменной плотности, связанных с изменением концентраций растворенных в воде компонентов и неизотермической фильтрацией подземных вод. Лекционный курс дополняется семинарами, лабораторными занятиями для закрепления навыков разработки геофильтрационных моделей и выполнения с их помощью прогнозных расчетов по оценке влияния инженерных воздействий (водоотбора) на режим и баланс подземных вод.

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) Виды контактной работы, часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы		
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Занятия семинарского типа	Всего	Расчетно-графические работы	Знакомство с аналоговой техникой в музее кафедры	Всего
Введение: Основы гидрогеодинамического моделирования	2	2	-	-	2			
Раздел 1. История развития моделирования в гидрогеологии	8	4	2	-	6		2	2
Раздел 2. Основы конечно-разностных методов моделирования геофильтрации	12	4	2	-	6	Разработка учебной стационарной и нестационарной моделей планового потока в среде Processing Modflow, 6 часов.		6
Раздел 3. Численное моделирование прямых задач геофильтрации	30	6	12	-	18	Разработка модели потока подземных вод реального объекта для обоснования водозабора, 12 часов.		12
Раздел 4. Введение в методы калибровки геофильтрационных моделей	26	4	4	-	8	Калибровка модели, расчет области захвата водозабора 18 часов		18
Раздел 5. Связанные модели геофильтрации, миграции и теплопереноса	18	6	6	-	12	Разработка модели динамики интрузии морских вод при работе берегового водозабора 6 часов		6
<u>Промежуточная аттестация -экзамен</u>	12	<i>экзамен</i>				12		
Итого	108	26	26	-	52	56		

Содержание разделов дисциплины:

Содержание лекционных и семинарских занятий

Введение:

Постановка задач гидрогеодинамического моделирования: прогноз эпигноз, верификация и калибровка моделей, разведочное, имитационное моделирование

1. История развития моделирования в гидрогеологии

Математическая постановка геофильтрационных задач и развитие методов моделирования геофильтрации. Аналитические, аналоговые, численные и численно-аналитические методы.

2. Основы конечно-разностных методов моделирования геофильтрации

Принципы численной дискретизации дифференциальных уравнений геофильтрации. Конечно-разностная сетка. Пространственная и временная аппроксимация. Порядок аппроксимации. Явная и неявная схема. Система сеточных геофильтрационных уравнений. Аппроксимация граничных условий. Методы решения систем сеточных уравнений. Нелинейные задачи геофильтрации.

3. Численное моделирование прямых задач геофильтрации

Виды численных конечно-разностных сеток, используемых при решении детальных, локальных и региональных задач. Структурированные и неструктурированные сетки. Способы моделирования разделяющих слоев. Особенности задания внешних граничных условий моделей. Особенности аппроксимации скважин на численных моделях. Аппроксимация водотоков и водоемов, дрена. Аппроксимация испарения подземных вод. Выбор временной дискретизации для различных типов прогнозных задач. Аппроксимация переменных во времени граничных условий. Особенности моделирования откачек на прямоугольных сетках. Моделирование конвективного переноса на основе решения задач геофильтрации. Аналитический расчет области захвата скважиной в естественном потоке. Расчет траекторий движения частиц и линий тока по скоростям фильтрации на сеточных моделях. Программа MODFLOW и ее характеристики.

4. Введение в методы калибровки геофильтрационных моделей

Понятие обратной задачи геофильтрации. Некорректность решения. Понятие калибровки геофильтрационных моделей. Общая стратегия калибровки. Функция качества. "Ручные" и автоматизированные способы калибровки. Чувствительность модели к параметрам. Автоматизированные методы калибровки.

5. Связанные модели геофильтрации, миграции и теплопереноса

Уравнение состояния воды и поток переменной плотности. Связь плотность концентрация и плотность температура. Аппроксимация моделью кусочно-однородной плотности. Условие на границе раздела жидкостей разной плотности. Непрерывное изменение плотности. Обобщенный закон фильтрации однофазной жидкости переменной плотности и вязкости. Расчет скорости фильтрации по методу локальных градиентов. Приведенный напор. Использование приведенного напора для построения плана течения потока высокоминерализованных вод. Обобщенная модель потока переменной плотности. Моделирование связанных процессов фильтрации и массо-теплопереноса. Программа Seawat.

Содержание лабораторных занятий

1. Знакомство с системой моделирования Processing Modflow путем разработки стационарной и нестационарной моделей планового потока.
2. Разработка геофильтрационной модели потока подземных вод к водозабору.
3. Калибровка геофильтрационной модели.
4. Прогнозное численное моделирование водоотбора.
5. Расчет траекторий движения и области захвата на численной модели.
6. Моделирование интрузии морских вод в прибрежный водоносный горизонт.

Рекомендуемые образовательные технологии

Учебный материал подаётся с использованием современных средств визуализации и анимированных презентаций.

В процессе проведения семинарских лабораторных занятий применяются методы развивающего обучения в интерактивной форме. На лабораторных занятиях студенты самостоятельно, под контролем преподавателя осваивают лабораторные методы определения водно-коллекторских свойств горных пород и гидрогеохимического анализа воды, проводят гидрогеологические расчеты. Лабораторные занятия проводятся в специализированной лаборатории моделирования, оборудованной компьютерами с установленным лицензионным программным обеспечением для геофильтрационного моделирования по группам (подгруппам), численностью не более 10-12 чел.

Самостоятельная работа студентов заключается в проработке отдельных разделов курса, выполнение моделирования задач, начатых на лабораторных занятиях и составлении пояснительной записки к ним при дистанционном сопровождении (консультациях) преподавателя.

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

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

Текущий контроль усвоения дисциплины осуществляется при сдаче каждым студентом выполненных лабораторных работ по моделированию геофильтрации.

Для текущего контроля студентов в ходе семестра проводятся устные опросы.

Примерный перечень вопросов для проведения текущего контроля/ Темы

1. Написать дифференциальные уравнения геофильтрации для одномерного, планового, профильного, планово-пространственного и пространственного потоков (одного из) и объяснить входящие в него параметры.
2. Рассказать постановку задач гидрогеодинамического моделирования, объяснив отличие терминов: прогноз, эпигноз, верификация и калибровка моделей, разведочное, имитационное моделирование.
3. Как развивалась история развития гидрогеодинамического моделирования
4. Объяснить сущность метода конечных разностей (МКР)
5. Что такое конечно-разностная сетка
6. Что такое аппроксимация уравнения геофильтрации с помощью МКР.
7. Что такое система сеточных уравнений геофильтрации
8. Как происходит аппроксимация внутренних граничных условий и источников-стоков (на примере водотоков).
9. В чем отличие прямых и итерационных методов решения системы сеточных уравнений
10. Привести пример нелинейной задачи геофильтрации.
11. В чем проблема аппроксимации скважин на сеточных моделях
12. Каковы особенности моделирования откачек на прямоугольных и радиальных сетках
13. Пример структурированной и неструктурной сетки
14. Почему программа MODFLOW широко используется для моделирования геофильтрации
15. Суть метода Поллака для расчета траекторий движения частиц и линий тока по скоростям фильтрации на сеточных моделях.
16. Что такое некорректная задача

17. Почему есть мнение, что калибровка моделей – это искусство
18. Что лучше на Ваш взгляд – ручные или автоматизированные методы калибровки.
19. Почему приходится вводить понятие приведенный напор
20. Почему возникают интрузии морских вод в прибрежные горизонты
21. Почему в прибрежных водозаборах, расположенных на берегах морей и океанов падает качество воды
22. Что такое связанные процессы фильтрации и тепломассопереноса. Их отличие от не связанных процессов
23. За счет чего могут возникать конвективные ячейки при хранении радиоактивных отходов в геологической среде
24. Что происходит при фильтрации жидких стоков повышенной плотности из шламохранилищ

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

1. Постановка задач гидрогеодинамического моделирования: прогноз эпитгроз, верификация и калибровка моделей, разведочное, имитационное моделирование
2. Применение метода фильтрационных сопротивлений для расчетов контурных систем дрен и скважин.
3. Расчет области захвата скважины в плановом однородном потоке.
4. Принципы численной дискретизации дифференциальных уравнений геофильтрации. Конечно-разностная сетка. Пространственная и временная аппроксимация.
5. Система сеточных геофильтрационных уравнений. Явная и неявная схема. Аппроксимация граничных условий на сеточных моделях.
6. Методы решения систем сеточных уравнений.
7. Нелинейные задачи геофильтрации. Особенности их аппроксимации на сеточных моделях
8. Виды численных конечно-разностных сеток, используемых при решении детальных, локальных и региональных задач. Способы моделирования разделяющих слоев.
9. Аппроксимация скважин на численных моделях. Расчет дополнительного понижения в скважине
10. Аппроксимация водотоков и водоемов, дрен. Аппроксимация испарения подземных вод.
11. Выбор временной дискретизации для различных типов прогнозных задач. Аппроксимация переменных во времени граничных условий.
12. Особенности моделирования откачек на прямоугольных сетках.
13. Понятие и преимущества неструктурированных сеток. Суть метода конечного объема для дискретизации уравнений геофильтрации на неструктурированных сетках. Их преимущества и недостатки по сравнению с прямоугольными сетками
14. Расчет траекторий движения частиц и линий тока по скоростям фильтрации на сеточных моделях.
15. Расчет области захвата скважины в естественном потоке подземных вод аналитически и на сеточной модели
16. Понятие обратной задачи геофильтрации. Некорректность решения.
17. Понятие калибровки геофильтрационных моделей. Общая стратегия калибровки. Функция качества.
18. “Ручные” и автоматизированные способы калибровки. Чувствительность модели к параметрам.
19. Автоматизированные методы калибровки при помощи пакетов, Ucode и Pest.
20. Поток переменной плотности. Связь плотность концентрация и плотность температура

21. Аппроксимация моделью кусочно-однородной плотности. Условие на границе раздела жидкостей разной плотности.
22. Аналитический расчет стационарной интрузии морских вод
23. Непрерывное изменение плотности. Обобщенный закон фильтрации однофазной жидкости переменной плотности и вязкости.
24. Приведенный напор и его использование для построения плана течения.
25. Обобщенная модель связанных процессов фильтрации и массо-теплопереноса
26. Моделирование связанных процессов фильтрации и массо-теплопереноса при помощи SEAWAT.

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации:

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине.

Результаты обучения	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания: основные методы гидрогеодинамического моделирования, принципы численного конечно-разностного моделирования геофильтрации потоков подземных вод постоянной и переменной плотности, основные этапы создания геофильтрационных моделей	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
Умения: решать с помощью методов моделирования практически важные задачи прогнозирования изменения режима и баланса подземных вод при воздействии на них инженерных мероприятий	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности непринципиального характера	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умения проводить геофильтрационную и вычислительную схематизацию и геофильтрационное моделирование	Успешное умение проводить геофильтрационную и вычислительную схематизацию и геофильтрационное моделирование, расчеты траекторий и линий тока, оценку областей захвата скважинами,
Владения: навыками создания	Навыки владения	Фрагментарное владение	В целом сформированны	Владение современным

<p>геофильтрационных моделей гидрогеологических объектов при помощи специализированных программных пакетов моделирования геофильтрации</p>	<p>отсутствуют</p>	<p>методикой геофильтрационного моделирования с использованием прикладных пакетов программ моделирования геофильтрации</p>	<p>е навыки владения методикой геофильтрационного моделирования с использованием прикладных пакетов программ моделирования геофильтрации</p>	<p>терминологическим аппаратом моделирования, методикой геофильтрационной и вычислительной схематизации и построения моделей. Умение решать при помощи геофильтрационного моделирования прикладные задачи гидрогеологических прогнозов.</p>
--	--------------------	--	--	---

8. Ресурсное обеспечение:

А) Перечень основной и дополнительной литературы.

а) основная литература:

1. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика: учебник - М.: Изд-во КДУ, 2009. - 334 с.
2. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ. Учебное пособие (под ред. Штенгелова Р.С.). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. – 335 с.

б) дополнительная литература:

- 1 Василевский Ю.В, Капырин И.В. Практикум по современным вычислительным технологиям и основам математического моделирования. М.: МАКС Пресс, 2009.
- 2 Chiang WH and Kinzelbach W, 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First Edition. Springer Berlin Heidelberg New York. 2001, ISBN 3-540 67744-5, 346 pp
- 3 Hill. M.C. and Tiedeman, C.R., 2007, Effective model calibration, with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty: Wiley and Sons, New York, New York, 455 p.

Б) Перечень лицензионного программного обеспечения пакеты программ Microsoft Office Excel, Microsoft Office Word, Microsoft Office PowerPoint, Processing Modflow X,

В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем
нет

Г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (лицензионное программное обеспечение не требуется):

Д) Материально-технического обеспечение:

а) помещения – аудитория, рассчитанная на группу из 15 учащихся; 1 лаборатория геофильтрационного моделирования с сетью персональных компьютеров.

б) оборудование:

аудитория: мультимедийный проектор, компьютер, экран, выход в Интернет;

лаборатория геофильтрационного моделирования – компьютерный класс с установленным лицензионным программным обеспечением для моделирования

9. Язык преподавания – русский.

10. Преподаватель (преподаватели) – Поздняков С.П. Самарцев В.Н.

11. Автор (авторы) программы – Поздняков С.П.