МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИННОВАЦИЙ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

МОО ВО Кыргызско-Российский Славянский университет

имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина



УТВЕРЖДАЮ

_Директор_____
(должность)
_Лоцев Г.В_____
(ФИО)
3 сентября____2026 г.

Гидромеханика

рабочая программа дисциплины (модуля)

Разработано **Высшая школа Природопользования, мехатроники и транспорта**

Учебный план Специальность 21.05.04 - РФ, 630003 - КР Горное дело

Квалификация **специалист**

Форма обучения **очная**

Общая трудоемкость **3 ЗЕТ**

Часов по учебному плану 108

в том числе:

аудиторные занятия 48

самостоятельная работа 59,8

Виды контроля в семестрах:

зачет с оценкой 5

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	**5 (3.1)**		Итого	
Недель	17 2/6			
Вид занятий	УП	РП	УП	РП
Лекции	16	16	16	16
Лабораторные	16	16	16	16
Практические	16	16	16	16
Контактная работа в период теоретического обучения	0,2	0,2	0,2	0,2
В том числе инт.	12	12	12	12
Итого ауд.	48	48	48	48
Контактная работа	48,2	48,2	48,2	48,2
Сам. работа	59,8	59,8	59,8	59,8
Итого	108	108	108	108

Программу составил(и):
к.ф.-м.н., Герман Константин Анатольевич

к.т.н, Джаманкулов Азамат Кенешбекович

Рецензент(ы):
к.ф.-м.н., Комарцов Никита Михайлович

д.т.н, Муслимов Аннас Поясович

Согласовано РОП:
Фёдорова Наталья Владимировна

Рабочая программа дисциплины
Гидромеханика

разработана в соответствии с ФГОС 3++:

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - специалитет по специальности 21.05.04 Горное дело (приказ Минобрнауки России от 12.08.2020 г. № 987)

составлена на основании учебного плана:

Специальность 21.05.04 - РФ, 630003 - КР Горное дело
Специализация "Открытые горные работы"
утвержденного учёным советом вуза от 26.06.2026 протокол № 11.

Рабочая программа одобрена на заседании **Высшей школы Природопользования, мехатроники и транспорта**

Протокол от 02.09.2026 г. № 1
Срок действия программы: 2026-2032 уч.г.
Руководитель подразделения: Алсеитов Мирлан Тилегенович

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ
к рабочей программе дисциплины (модуля)

Гидромеханика

№ п/п	Основание внесения изменения	Раздел/ пункт	Содержание изменения
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	
1.1	Цель - сформировать у студентов систему знаний в области механики жидкости и газа на базе общих теорем, с последующим углубленным изучением разделов динамики идеальных и вязких жидкостей и газов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП	
Цикл (раздел) ООП:	Б1.О.2
2.1	**Требования к предварительной подготовке обучающегося:**
2.1.1	Б1.О.2.12. Геология
2.1.2	Б1.О.2.08. Теоретическая и прикладная механика
2.1.3	Б1.О.2.04. Физика
2.1.4	Б1.О.2.03. Вычислительная математика
2.1.5	Б1.О.2.01. Введение в высшую математику
2.1.6	Б1.В.1.07. Гидрогеология и инженерная геология
2.2	**Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:**
2.2.1	Б3.О.03(Д). Выполнение, подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы
2.2.2	Б1.В.1.10. Физические процессы при добыче полезных ископаемых

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)	
ОПК-5: Способен применять методы анализа, знания закономерностей поведения, управления свойствами горных пород и состоянием массива в процессах добычи и переработки полезных ископаемых, а также при строительстве и эксплуатации подземных объектов	
Знать:	
Уровень 1	современные технологии эксплуатационной разведки, добычи, переработки полезных ископаемых, в том числе при освоении ресурсов шельфа морей и океанов
Уровень 2	
Уровень 3	
Уметь:	
Уровень 1	Умеет использовать функционал и инструменты компьютерных систем для решения профессиональных задач
Уровень 2	
Уровень 3	
Владеть:	
Уровень 1	Способен работать с программным обеспечением общего, специального назначения и моделирования горных и геологических объектов
Уровень 2	
Уровень 3	

ОПК-10: Способен применять основные принципы технологий эксплуатационной разведки, добычи, переработки твердых полезных ископаемых, строительства и эксплуатации подземных объектов	
Знать:	
Уровень 1	современные технологии эксплуатационной разведки, добычи, переработки полезных ископаемых, в том числе при освоении ресурсов шельфа морей и океанов
Уровень 2	
Уровень 3	
Уметь:	
Уровень 1	решать типовые учебные задачи по технологиям эксплуатационной разведки, добычи, переработки полезных ископаемых, в том числе при освоении ресурсов шельфа морей и океанов
Уровень 2	
Уровень 3	
Владеть:	
Уровень 1	базовыми знаниями технологий эксплуатационной разведки, добычи, переработки полезных ископаемых, в том числе при освоении ресурсов шельфа морей и океанов
Уровень 2	
Уровень 3	

В результате освоения дисциплины обучающийся должен

3.1	**Знать:**
3.1.1	основные физические свойства жидкостей и газов; основы кинематики: общие законы и уравнения статики и динамики жидкостей и газов; одномерные потоки жидкостей и газов; элементы подобия гидродинамических процессов; теорию гидродинамических сопротивлений; потоки вязких жидкостей; роль гидродинамики в геологоразведке; законы фильтрации нефти, газа и воды; установившиеся и неустановившиеся движения жидкости и газа в пористой среде; основы теории многофазных систем; особенности фильтрации неньютоновской жидкости; движение жидкости и газов в трещиноватых и трещиновато-пористых средах.
3.2	**Уметь:**
3.2.1	производить расчеты: равновесия жидкостей и газов, их движения и истечения в различных средах, массообмена при различных комбинациях видов фаз, проектировать системы подачи и эвакуации жидких и газообразных сред.
3.3	**Владеть:**
3.3.1	методиками проведения типовых гидродинамических расчетов течений жидкости и газа для различных классов задач, навыками выполнять оценочные расчеты, а также применять численные методы при реализации решений с помощью компьютеров.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занятия	Наименование разделов и тем / вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетен-ции	Литература	Инте ракт.	Пр. подг.	Примечание
	Раздел 1. Свойства сред и гидростатика							
1.1	Физические свойства жидкостей и газов и равновесие жидкости Гипотеза сплошной среды; плотность, динамическая и кинематическая вязкость, сжимаемость; выбор свойств при заданных температуре и давлении. Идеальная и вязкая, сжимаемая и несжимаемая среда; закон вязкости Ньютона и границы принятых моделей. Давление в покоящейся среде; уравнение гидростатики в поле тяжести; абсолютное и избыточное давление, показания манометров. Результирующая сила давления на плоскую поверхность и положение центра давления; расчёт стенки резервуара. Выталкивающая сила, плавание тел и капиллярное давление; роль поверхностного натяжения в узких каналах и порах. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
1.2	Свойства жидкости и газа, гидростатическое давление и показания манометра. Сила давления на плоскую стенку и выталкивающая сила . / Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1	2		

1.3	Описание течения и балансовые уравнения Лагранжево и эйлерово описание; поле скорости, линии тока, траектории частиц; установившееся и неустановившееся движение. Локальное и конвективное ускорения; деформация и вращение элемента жидкости, вихрь скорости. Объёмный и массовый расходы; уравнение неразрывности в интегральной и дифференциальной формах. Баланс импульса для контрольного объёма; силы на повороте трубопровода и при торможении струи. Баланс энергии и замыкание модели; начальные и граничные условия, связь локальных уравнений с инженерными балансами. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
1.4	Поле скорости, ускорение и проверка уравнения неразрывности. Массовый баланс и сила воздействия струи на неподвижную преграду. /Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
1.5	Уравнения Эйлера и одномерное течение жидкости и газа Уравнения Эйлера как модель невязкого движения; допустимость пренебрежения вязкостью вне пограничных слоёв. Интеграл Бернулли для установившегося несжимаемого течения вдоль линии тока; геометрический, пьезометрический и скоростной напоры. Истечение из резервуара, сужение струи и коэффициент расхода; связь идеальной модели с реальным расходом. Безвихревое движение, потенциал скорости и функция тока в плоской несжимаемой постановке; назначение потенциальной модели. Одномерный газовый поток: уравнение состояния идеального газа, массовый расход, скорость звука и число Маха; условия учёта сжимаемости. Качественная связь площади сопла и скорости дозвукового и сверхзвукового потока; критическое сечение и ограничения модели без теплообмена и трения. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1	2		

1.6	Расчёт истечения и распределения напоров по уравнению Бернулли . Массовый расход, число Маха и выбор модели одномерного газового потока . /Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
1.7	Вязкое движение и расчёт потерь давления Уравнения Навье — Стокса для ньютоновской среды; условие прилипания; упрощения для установившегося полностью развитого течения. Течение Пуазейля в круглой трубе: профиль скорости, расход, напряжение на стенке; проверка ламинарного режима. Число Рейнольдса и подобие; назначение чисел Фруда, Эйлера и Маха при выборе модели и переносе результатов. Турбулентные пульсации, усреднение и необходимость замыкания; пограничный слой, отрыв и сопротивление обтекаемого тела на качественном уровне. Потери по длине и местные потери; формула Дарси — Вейсбаха, коэффициент трения Дарси и влияние относительной шероховатости. Уравнение энергии реального потока; требуемый напор и мощность насоса, кавитация как ограничение проектирования системы подачи. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
1.8	Течение Пуазейля и обработка учебного набора данных о расходе и перепаде давления. Потери давления в трубопроводе и требуемые напор и мощность насоса. /Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
1.9	Составление таблицы свойств рабочих сред и решение задач на гидростатику. Анализ поля скорости и применение законов сохранения. Сравнение моделей идеальной жидкости и сжимаемого газа. Расчёт сопротивлений и обработка зависимости расхода от перепада давления. /Ср/	5	30	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
	Раздел 2. Фильтрация в пористых средах							

2.1	Установившаяся и неустановившаяся фильтрация жидкости и газа . Пористость и проницаемость; скорость фильтрации и средняя скорость в порах; представительный объём среды. Закон Дарси, гидравлический потенциал и размерность проницаемости; отличие проницаемости от коэффициента фильтрации. Линейная и радиальная установившаяся фильтрация; перепад давления в фильтрующем элементе и приток к скважине в простейшей модели. Сжимаемость газа, зависимость объёмного расхода от давления; массовый баланс при изотермической газовой фильтрации. Уравнение пьезопроводности для слабосжимаемой однофазной среды; начальные и граничные условия, характерное время распространения возмущения. Границы линейной фильтрации и поправка Форхгеймера; применение к фильтрам, движению воды, нефти и газа в геологических средах. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
2.2	Линейная и радиальная установившаяся фильтрация по закону Дарси. Нестационарная фильтрация и оценка характерного времени пьезопроводности. /Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			

2.3	Реологические модели и многофазная фильтрация Кривые течения; степенная модель и модель Бингама; кажущаяся вязкость и предел текучести, ограничения экстраполяции реологических данных. Как реология изменяет расход и распределение скоростей в канале; особенности фильтрации неньютоновской жидкости и возможный порог начала движения. Насыщенности фаз, относительные фазовые проницаемости и капиллярное давление; замыкание двухфазной модели. Фазовые законы Дарси, подвижность и доля потока каждой фазы; вытеснение нефти водой в упрощённом одномерном описании. Межфазный массообмен: движущая сила, коэффициент массопередачи и межфазная поверхность; пример переноса вещества между газом и жидкостью. Выбор однофазного или многофазного приближения; какие данные нужны для расчёта фильтра, смазочного материала или геологической среды. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
2.4	Определение параметров реологической модели и кажущейся вязкости. Фазовые расходы и межфазный массообмен в упрощённых двухфазных моделях. /Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			

2.5	Течение в трещинах и обмен между трещинами и матрицей Геометрия трещины: раскрытие, протяжённость, шероховатость и связность; отличие трещинного пути от порового пространства. Ламинарное течение между параллельными пластинами и кубический закон; влияние раскрытия на расход и проводимость. Эквивалентная проницаемость и её анизотропия; ограничения замены сети трещин однородным континуумом. Модели двойной пористости и двойной проницаемости; баланс массы в матрице и трещинах, смысл обменного члена. Установившийся перепад давления и неустановившийся обмен; характерные масштабы и чувствительность к раскрытию и проницаемости. Примеры движения воды, нефти и газа в трещиноватой породе; перенос модели на щелевые зазоры и пористые инженерные элементы. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1	2		
2.6	Кубический закон течения в трещине и баланс обмена между трещиной и матрицей . /Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1	2		мозговой штурм
2.7	Постановка и проверка численной модели течения. Выбор расчётной области, размерности, физических допущений и граничных условий для течения в трубе или пористом элементе. Идея конечно-объёмной и конечно-элементной дискретизации; сетка, аппроксимация и связь скорости с давлением без вывода алгоритмов решателя. Невязки уравнений и интегральный баланс массы; контроль установления решения и зависимости результата от шага времени. Верификация на решении Пуазейля или Дарси; последовательное сгущение сетки и количественная оценка ошибки расхода или перепада давления. Валидация по независимым измерениям, неопределённость исходных свойств и воспроизводимость; представление полей и интегральных результатов без подмены проверки визуализацией. /Лек/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			

2.8	Подготовка численной модели ламинарного течения в трубе. Верификация расчёта по аналитическому решению и исследование сеточной сходимости. Согласование расхода и перепада давления в системе подачи с пористым элементом. /Пр/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
2.9	Исследование влияния проницаемости и сжимаемости на фильтрацию. Сопоставление реологических моделей и расчёт фазовых расходов. Оценка проводимости трещины и обмена с пористой матрицей. Подготовка воспроизводимого вычислительного отчёта и повторение курса. /Ср/	5	29,8	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
2.10	Консультация и прием зачета / КрТО/	5	0,2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
	Раздел 3. Лабораторный практикум							
3.1	Свойства жидкости и газа, гидростатическое давление и показания манометра /Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
3.2	сила воздействия струи на неподвижную преграду. /Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1	2		
3.3	Потери давления в трубопроводе и требуемые напор и мощность насоса. /Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1	2		
3.4	Расчёт истечения и распределения напоров /Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
3.5	Линейная и радиальная установившаяся фильтрация / Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
3.6	Определение параметров реологической модели /Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
3.7	Закон течения в трещине /Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			
3.8	Согласование расхода и перепада давления в системе подачи /Лаб/	5	2	ОПК-5 ОПК-10	Л1.1Л2.1			

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

5.1. Контрольные вопросы и задания

1 Вопросы текущего контроля и промежуточной аттестации

Тема 1 Физические свойства жидкостей и газов и равновесие жидкости

1. Какие свойства определяют выбор модели жидкости или газа и при каких условиях их следует задавать?
2. Как связаны абсолютное, избыточное давление и вакуумметрическое давление?
3. Как получить распределение давления в покоящейся жидкости и найти силу давления на плоскую стенку?
4. Как определяются выталкивающая сила и капиллярное давление; когда ими нельзя пренебрегать?

Тема 2 Описание течения и балансовые уравнения

5. Чем отличаются линия тока и траектория; при каком условии они совпадают?
6. Как рассчитывается материальная производная скорости и что означают её слагаемые?
7. Как записать массовый баланс для сжимаемого и несжимаемого потока?
8. Как выбрать контрольный объём и учесть импульс струи и внешние силы?

Тема 3 Уравнения Эйлера и одномерное течение жидкости и газа

9. Какие допущения приводят к уравнениям Эйлера и интегралу Бернулли?
10. В каком случае постоянная Бернулли одинакова для разных линий тока; что означает потенциальное течение?
11. Как определяют расход при истечении и как учитывают отклонение от идеального течения?
12. Что показывает число Маха; как меняются массовый расход и скорость в сопле при изменении плотности и площади?

Тема 4 Вязкое движение и расчёт потерь давления

13. Какие члены входят в уравнения Навье — Стокса и как задаётся условие прилипания?

14. Как получить расход Пуазейля и проверить допустимость ламинарной модели?
15. Как выбирают критерии подобия; зачем при турбулентном расчёте вводят модель замыкания?
16. Как рассчитываются потери по длине, местные потери, напор и мощность насоса; как проявляется опасность кавитации?
Тема 5 Установившаяся и неустановившаяся фильтрация жидкости и газа
17. Чем различаются пористость, проницаемость, коэффициент фильтрации и скорость движения в порах?
18. Как записать закон Дарси с учётом тяжести и какие условия ограничивают его применение?
19. Чем отличаются линейная, радиальная и изотермическая газовая фильтрация?
20. Как формируется уравнение пьезопроводности и оценивается характерное время; когда требуется поправка Форхгеймера?
Тема 6 Реологические модели и многофазная фильтрация
21. Как интерпретировать параметры степенной модели и модели Бингама?
22. Почему ньютоновский закон Дарси нельзя без обоснования переносить на жидкость с пределом текучести?
23. Что означают насыщенность, относительная проницаемость, капиллярное давление и фазовая подвижность?
24. Как составить фазовый баланс и оценить массообмен между газом и жидкостью при заданной движущей силе?
Тема 7 Течение в трещинах и обмен между трещинами и матрицей
25. При каких условиях действует кубический закон и как раскрытие влияет на расход?
26. Почему трещиноватая среда может обладать анизотропной проводимостью?
27. Чем различаются модели двойной пористости и двойной проницаемости?
28. Как записать обмен массой между матрицей и трещинами и проверить суммарный баланс?
Тема 8 Постановка и проверка численной модели течения
29. Как выбрать область и согласованные граничные условия численной задачи?
30. Чем различаются невязка решателя, погрешность дискретизации и физическая ошибка модели?
31. Как исследовать сходимость по сетке и времени и проверить баланс массы?
32. Чем отличаются верификация и валидация; какие файлы и данные обеспечивают воспроизводимость расчёта?

2 Задания по темам курса
1. Рассчитать давление на заданной глубине, силу на прямоугольную стенку и центр давления; объяснить выбор отсчёта глубины.
2. Для заданного поля скорости проверить неразрывность; по расходу струи определить силу на преграду и указать все силы контрольного объёма.
3. Рассчитать расход истечения с заданным коэффициентом расхода; определить массовый расход газа и число Маха по заданным состоянию и скорости.
4. Определить расход Пуазейля, число Рейнольдса и потери в трубопроводе; по зависимости Q от перепада давления оценить вязкость.
5. Рассчитать расход через пористый элемент и среднюю скорость в порах; оценить время пьезопроводности и влияние проницаемости.
6. По параметрам реологии найти напряжение и кажущуюся вязкость; рассчитать фазовые расходы и перенос вещества при заданном коэффициенте массопередачи.
7. Рассчитать расход в плоской трещине, исследовать влияние раскрытия и объяснить знаки обменного члена в балансах матрицы и трещин.
8. Составить модель ламинарного течения, получить результат на трёх сетках, проверить массовый баланс и ошибку относительно аналитического решения.

5.2. Темы курсовых работ (проектов)

курсовых работ не предусмотрено

5.3. Фонд оценочных средств

1 Паспорт оценивания
ПК-1 — способность применять физико-математический аппарат, теоретические, расчётные и экспериментальные методы исследования, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности.

Рабочий результат	Темы	Средства и свидетельства
Объясняет физические свойства, режимы, законы сохранения и ограничения моделей	1–8	Опрос по вопросам 1–32; тест Т1–Т20; теоретическая часть билета
Строит расчётную схему и вычисляет давление, силу, расход и сопротивление	1–7	Практические работы 1–13 и 16; задачи З1–З11; контрольные работы
Обрабатывает данные и оценивает параметры и расхождения	4, 8	Практическая работа 7, учебный набор данных Д1; вычислительный отчёт
Ставит и проверяет компьютерную модель, обеспечивает воспроизводимость	8	Практические работы 14–16; вычислительный отчёт В1; задача З12

Учебная обработка данных проверяет приёмы экспериментального анализа, но не подтверждает самостоятельное проведение натурного эксперимента. Лабораторные занятия в аннотации не выделены.
2 Состав и порядок текущего контроля
- Опрос: вопросы 1–32 из раздела 3; по 1–2 вопроса после соответствующей темы. Результат используется для обратной связи.
- Практические работы: 16 работ по 2 ч; за каждую исходная оценка 0–10. Номера и названия совпадают с учебными материалами.
- Тест: все 20 заданий, один верный ответ в каждом, 25 минут; 1 балл за ответ, максимум 20.
- Контрольная работа 1 после темы 4: один из двух вариантов, 3 задачи, 45 минут; максимум 30 исходных баллов.
- Контрольная работа 2 после темы 8: один из двух вариантов, 3 задачи, 45 минут; максимум 30 исходных баллов.
- Вычислительный отчёт В1: выполнение в практических работах 14–15 и самостоятельной работе темы 8; отдельная

защита, максимум 10 исходных баллов.
Для теста разрешён непрограммируемый калькулятор. На контрольных и итоговом билете допускаются калькулятор и выданный преподавателем лист формул без готовых решений. В проекте предусмотрена индивидуальная работа; иные правила определяются утверждённым порядком КРСУ.
3 Контрольные вопросы
Тема 1 Физические свойства жидкостей и газов и равновесие жидкости
1. Какие свойства определяют выбор модели жидкости или газа и при каких условиях их следует задавать?
2. Как связаны абсолютное, избыточное давление и вакуумметрическое давление?
3. Как получить распределение давления в покоящейся жидкости и найти силу давления на плоскую стенку?
4. Как определяются выталкивающая сила и капиллярное давление; когда ими нельзя пренебрегать?
Тема 2 Описание течения и балансовые уравнения
5. Чем отличаются линия тока и траектория; при каком условии они совпадают?
6. Как рассчитывается материальная производная скорости и что означают её слагаемые?
7. Как записать массовый баланс для сжимаемого и несжимаемого потока?
8. Как выбрать контрольный объём и учесть импульс струи и внешние силы?
Тема 3 Уравнения Эйлера и одномерное течение жидкости и газа
9. Какие допущения приводят к уравнениям Эйлера и интегралу Бернулли?
10. В каком случае постоянная Бернулли одинакова для разных линий тока; что означает потенциальное течение?
11. Как определяют расход при истечении и как учитывают отклонение от идеального течения?
12. Что показывает число Маха; как меняются массовый расход и скорость в сопле при изменении плотности и площади?
Тема 4 Вязкое движение и расчёт потерь давления
13. Какие члены входят в уравнения Навье — Стокса и как задаётся условие прилипания?
14. Как получить расход Пуазейля и проверить допустимость ламинарной модели?
15. Как выбирают критерии подобия; зачем при турбулентном расчёте вводят модель замыкания?
16. Как рассчитываются потери по длине, местные потери, напор и мощность насоса; как проявляется опасность кавитации?
Тема 5 Установившаяся и неустановившаяся фильтрация жидкости и газа
17. Чем различаются пористость, проницаемость, коэффициент фильтрации и скорость движения в порах?
18. Как записать закон Дарси с учётом тяжести и какие условия ограничивают его применение?
19. Чем отличаются линейная, радиальная и изотермическая газовая фильтрация?
20. Как формируется уравнение пьезопроводности и оценивается характерное время; когда требуется поправка Форхгеймера?
Тема 6 Реологические модели и многофазная фильтрация
21. Как интерпретировать параметры степенной модели и модели Бингама?
22. Почему ньютоновский закон Дарси нельзя без обоснования переносить на жидкость с пределом текучести?
23. Что означают насыщенность, относительная проницаемость, капиллярное давление и фазовая подвижность?
24. Как составить фазовый баланс и оценить массообмен между газом и жидкостью при заданной движущей силе?
Тема 7 Течение в трещинах и обмен между трещинами и матрицей
25. При каких условиях действует кубический закон и как раскрытие влияет на расход?
26. Почему трещиноватая среда может обладать анизотропной проводимостью?
27. Чем различаются модели двойной пористости и двойной проницаемости?
28. Как записать обмен массой между матрицей и трещинами и проверить суммарный баланс?
Тема 8 Постановка и проверка численной модели течения
29. Как выбрать область и согласованные граничные условия численной задачи?
30. Чем различаются невязка решателя, погрешность дискретизации и физическая ошибка модели?
31. Как исследовать сходимость по сетке и времени и проверить баланс массы?
32. Чем отличаются верификация и валидация; какие файлы и данные обеспечивают воспроизводимость расчёта?
4 Тестовые задания
Т1. При $\rho = \text{const}$ гидростатическое избыточное давление на глубине h равно
А $\rho g h$; Б $\rho g / h$; В $\rho h / g$; Г $\mu g h$.
Т2. Кинематическая вязкость определяется как
А ρ / μ; Б μ / ρ; В $\mu \rho$; Г p / ρ.
Т3. Материальное ускорение в эйлеровом описании равно
А только $\partial v / \partial t$; Б только $(v \cdot \nabla) v$; В $\partial v / \partial t + (v \cdot \nabla) v$; Г ∇p.
Т4. При установившемся потоке без источников массы между сечениями сохраняется
А скорость; Б площадь; В объёмный расход любого газа; Г массовый расход.
Т5. При удвоении напора над отверстием и неизменном коэффициенте расхода Q меняется в
А 2 раза; Б $\sqrt{2}$ раза; В 4 раза; Г не меняется.
Т6. Число Маха — это отношение
А скорости потока к скорости звука; Б инерции к вязкости; В вязкости к плотности; Г давления к температуре.
Т7. Число Рейнольдса для круглой трубы со средней скоростью v равно
А $\mu v / (\rho d)$; Б $\rho d / (\mu v)$; В $\rho v d / \mu$; Г $\rho v \mu / d$.
Т8. Для полностью развитого ламинарного ньютоновского течения в круглой трубе при фиксированных Δp, μ, L расход пропорционален
А d; Б d^2; В d^3; Г d^4.
Т9. В формуле Дарси — Вейсбаха для ламинарного течения в круглой трубе коэффициент трения Дарси равен
А $16 / \mathrm{Re}$; Б $64 / \mathrm{Re}$; В $\mathrm{Re} / 64$; Г $1 / \mathrm{Re}^2$.
Т10. При заданных Q, H, ρ и КПД η мощность насоса на валу равна
А $\rho g Q H / \eta$; Б $\rho g Q H \eta$; В $Q H / (\rho g)$; Г $\rho g H / Q$.
Т11. Размерность внутренней проницаемости k

А м/с; Б Па·с; В м²; Г с⁻¹.
Т12. Для полностью насыщенной среды при пористости φ и скорости фильтрации q средняя поровая скорость равна
А qφ; Б q/φ; В φ/q; Г q.
Т13. При увеличении проницаемости вдвое и неизменных остальных параметрах α = k/(φμc_t) характерное время L²/α
А удваивается; Б не меняется; В увеличивается в четыре раза; Г уменьшается вдвое.
Т14. В степенной модели n < 1 соответствует
А снижению кажущейся вязкости с ростом скорости сдвига; Б ньютоновской жидкости; В обязательному пределу текучести; Г росту кажущейся вязкости.
Т15. Относительная фазовая проницаемость характеризует
А пористость; Б плотность фазы; В снижение проводимости для фазы относительно внутренней проницаемости в принятой модели; Г скорость звука.
Т16. Если kr и μ фаз одинаковы и градиенты давления одинаковы при отсутствии тяжести и капиллярных эффектов, то фазовые расходы
А зависят только от названия фаз; Б одинаковы; В всегда нулевые; Г противоположны по знаку.
Т17. В кубическом законе расход при неизменных W, L, μ, Δp пропорционален
А b; Б b²; В 1/b; Г b³.
Т18. При обмене массой между матрицей и трещиной обменные члены в их балансах
А противоположны по знаку и сокращаются в суммарном балансе; Б одинаковы по знаку; В отсутствуют всегда; Г создают массу.
Т19. Сравнение с точным решением Пуазейля прежде всего служит
А подтверждению любого физического допущения; Б оценке шероховатости; В верификации численного решения; Г измерению вязкости.
Т20. Уменьшение невязок решателя при одной сетке
А доказывает сеточную независимость; Б не заменяет проверку сеточной сходимости и баланса; В всегда подтверждает экспериментальную точность; Г устраняет ошибки свойств.
Ориентиры обратной связи: 17–20 — уверенное владение понятиями; 14–16 — отдельные пробелы; 12–13 — требуется повторение; 0–11 — существенные пробелы. Эти интервалы не заменяют итоговую шкалу дисциплины.
5 Банк расчётных заданий
Все числовые условия разработаны как учебные. Если не оговорено иное, использовать g = 9,81 м/с². Показывать схему, уравнения, подстановки, единицы и вывод о применимости модели. Преподаватель выдаёт условия без раздела ключей.
31 Гидростатическая сила
Вертикальная прямоугольная стенка шириной 1,5 м и высотой 2 м находится в воде. Верхняя кромка на глубине 1 м. Давление на свободной поверхности и с другой стороны стенки атмосферное. Плотность воды 1000 кг/м³. Найдите результирующую силу и глубину центра давления.
32 Торможение струи
Свободная горизонтальная струя воды диаметром 0,020 м имеет расход 0,003 м³/с и нормально ударяет в неподвижную плоскую преграду. После удара осевая компонента скорости равна нулю. Плотность 1000 кг/м³; давление на открытых границах атмосферное, потери до удара не учитываются. Найдите скорость и силу струи на преграду.
33 Истечение
Из большого открытого резервуара вода вытекает через отверстие диаметром 0,020 м в атмосферу. Напор над центром отверстия 2 м, коэффициент расхода 0,62. Скорость свободной поверхности пренебрежимо мала. Найдите расход.
34 Параметры газового потока
В одном сечении канала воздух имеет абсолютное давление 100 кПа, температуру 300 К, скорость 100 м/с и площадь 0,001 м². Считать газ идеальным: R = 287 Дж/(кг·К), γ = 1,4. Найдите плотность, массовый расход и число Маха. Поясните ограничение оценки сжимаемости.
35 Течение Пуазейля
Жидкость с ρ = 900 кг/м³ и μ = 0,1 Па·с движется по горизонтальной круглой трубе диаметром 0,010 м, длиной 2 м. Перепад давления на участке полностью развитого течения 2000 Па. Найдите расход, среднюю скорость и Re; проверьте режим.
36 Трубопровод и насос
Между двумя большими открытыми резервуарами вода подаётся с расходом 0,002 м³/с. Верхний уровень на 5 м выше нижнего. Труба: d = 0,050 м, L = 20 м; коэффициент трения Дарси λ = 0,030, сумма местных коэффициентов 4. Плотность 1000 кг/м³, КПД насоса 0,70. Скорости на свободных поверхностях пренебрежимо малы; все местные потери включены в сумму. Найдите напор и мощность на валу.
37 Однофазная фильтрация
Через горизонтальный однородный пористый образец длиной 0,10 м и площадью 0,010 м² течёт вода с μ = 0,001 Па·с. Проницаемость k = 2·10⁻¹² м², пористость φ = 0,25; перепад давления 50 000 Па. Считать закон Дарси применимым. Найдите расход, скорость фильтрации и среднюю скорость в порах.
38 Характерное время фильтрации
Для слабосжимаемой однофазной среды k = 10⁻¹² м², μ = 0,001 Па·с, φ = 0,20, суммарная сжимаемость c_t = 10⁻⁹ Па⁻¹. Характерная длина 10 м. В модели ∂p/∂t = α∂²p/∂x² используйте α = k/(φμc_t). Найдите α и оценку времени L²/α. Объясните, является ли это точным временем установления.
39 Степенная реология
Жидкость описывается τ = K·γ̇ⁿ, где K = 0,8 Па·сⁿ и n = 0,6. Для положительных скоростей сдвига 10 и 100 с⁻¹ найдите касательное напряжение и кажущуюся вязкость μкаж = τ/γ̇. Определите тип поведения.
310 Двухфазная фильтрация
В горизонтальном образце A = 0,010 м², L = 0,10 м, k = 10⁻¹² м² находятся вода и нефть. Перепад давления обеих фаз 10 000 Па; капиллярным давлением и тяжестью пренебречь. При данной насыщенности k_rw = 0,30, k_ro = 0,20; μw = 0,001 Па·с, μo = 0,005 Па·с. Найдите расходы фаз, суммарный расход и долю воды в потоке.

311 Течение в трещине
Гладкая плоская трещина имеет ширину W = 1 м, раскрытие b = 0,0005 м и длину L = 2 м. Жидкость с μ = 0,001 Па·с течёт при перепаде 1000 Па. Установившееся ламинарное течение между параллельными пластинами, входными эффектами пренебречь. Используйте Q = Wb³Δp/(12μL). Найдите расход и изменение расхода при удвоении раскрытия.
312 Проверка сеточного решения
Учебные результаты расчёта расхода: при шагах сетки 0,100; 0,050; 0,025 м получено соответственно 9,20; 9,80; 9,95 в единицах 10^{-6} м³/с. Аналитический расход $10{,}00\cdot10^{-6}$ м³/с. На мелкой сетке входной расход $10{,}00\cdot10^{-6}$, выходной $9{,}98\cdot10^{-6}$ м³/с. Найдите ошибки, наблюдаемый порядок и относительный небаланс. Объясните различие проверок.
6 Ключи к расчётным заданиям
31. Площадь A = 3 м²; глубина центра площади hc = 2 м. Избыточная сила F = ρgAhc = 58 860 Н. Ic = bh³/12 = 1 м⁴; hцд = hc + Ic/(hcA) = 2,167 м от свободной поверхности.
32. A = πd²/4; v = Q/A = 9,549 м/с. F = ρQv = 28,65 Н по направлению падающей струи. Сила преграды на жидкость противоположна.
33. Q = Cд(πd²/4)√(2gH) = 0,001220 м³/с, или 1,220 л/с. Идеальная скорость √(2gH) = 6,264 м/с; Cд учитывает совокупное влияние сжатия и скорости струи.
34. ρ = p/(RT) = 1,1614 кг/м³; массовый расход = ρvA = 0,11614 кг/с. a = √(γRT) = 347,19 м/с; Ma = 0,288. Значение около 0,3 требует оценки допустимой ошибки; низкое Ma само по себе не исключает изменения плотности при заметном нагреве или изменении давления.
35. Q = πd⁴Δp/(128μL) = $2{,}4544\cdot10^{-6}$ м³/с. vcp = 0,03125 м/с; Re = ρvcpd/μ = 2,813. Ламинарное приближение согласовано; входной участок исключён условием.
36. v = 1,0186 м/с; hпот = (λL/d + Σζ)v²/(2g) = 0,8461 м. H = 5,8461 м; Nвал = ρgQH/η = 163,86 Вт. Коэффициент λ задан; самостоятельная корреляция для него не требуется.
37. Q = kAΔp/(μL) = $1{,}00\cdot10^{-5}$ м³/с. Скорость фильтрации q = Q/A = 0,001 м/с. Средняя поровая скорость u = q/φ = 0,004 м/с; q и u различаются.
38. α = 5 м²/с; t* = L²/α = 20 с. Это оценка масштаба; конкретная степень приближения к стационарному состоянию зависит от геометрии, начальных и граничных условий.
39. При 10 $с^{-1}$: τ = 3,185 Па, μкаж = 0,3185 Па·с. При 100 $с^{-1}$: τ = 12,679 Па, μкаж = 0,1268 Па·с. Среда псевдопластическая; степенной закон применяется в заданном диапазоне, предел текучести им не задаётся.
310. Q_i = kk_riAΔp/(μ_iL). Qw = $3{,}00\cdot10^{-7}$ м³/с; Qo = $4{,}00\cdot10^{-8}$ м³/с. Q = $3{,}40\cdot10^{-7}$ м³/с; fw = Qw/Q = 0,88235. Доля потока не равна насыщенности.
311. Q = $5{,}2083\cdot10^{-6}$ м³/с. При b = 0,001 м расход возрастает в 8 раз: $4{,}1667\cdot10^{-5}$ м³/с, если допущения о режиме остаются применимыми.
312. Относительные ошибки по аналитике: 8%; 2%; 0,5%. p = ln(|9,80−9,20|/|9,95−9,80|)/ln2 = 2. Небаланс = |Qвх−Qвых|/|Qвх| = 0,2%. Это верификация и контроль сохранения массы, а не валидация по эксперименту. Данные учебные синтетические.
7 Контрольные работы
Контрольная работа 1
Темы 1–4. Вариант А: 31, 33, 35. Вариант Б: 32, 34, 36. Полные условия и ключи приведены в разделах 5–6. Каждый вариант проверяет физическую постановку, расчёт и обоснование режима. Баллы за каждую задачу — по критериям раздела 11, максимум 10; за работу — 30.
Контрольная работа 2
Темы 5–8. Вариант А: 37, 39, 311. Вариант Б: 38, 310, 312. Полные условия и ключи приведены в разделах 5–6. Варианты охватывают разные сочетания тем; вопросы, не попавшие в вариант, дополнительно проверяются тестом, практическими работами и билетом. Максимум — 30 баллов.
8 Практические работы и обработка данных
ПР1. Свойства жидкости и газа, гидростатическое давление и показания манометра — тема 1.
ПР2. Сила давления на плоскую стенку и выталкивающая сила — тема 1.
ПР3. Поле скорости, ускорение и проверка уравнения неразрывности — тема 2.
ПР4. Массовый баланс и сила воздействия струи на неподвижную преграду — тема 2.
ПР5. Расчёт истечения и распределения напоров по уравнению Бернулли — тема 3.
ПР6. Массовый расход, число Маха и выбор модели одномерного газового потока — тема 3.
ПР7. Течение Пуазейля и обработка учебного набора данных о расходе и перепаде давления — тема 4.
ПР8. Потери давления в трубопроводе и требуемые напор и мощность насоса — тема 4.
ПР9. Линейная и радиальная установившаяся фильтрация по закону Дарси — тема 5.
ПР10. Нестационарная фильтрация и оценка характерного времени пьезопроводности — тема 5.
ПР11. Определение параметров реологической модели и кажущейся вязкости — тема 6.
ПР12. Фазовые расходы и межфазный массообмен в упрощённых двухфазных моделях — тема 6.
ПР13. Кубический закон течения в трещине и баланс обмена между трещиной и матрицей — тема 7.
ПР14. Подготовка численной модели ламинарного течения в трубе — тема 8.
ПР15. Верификация расчёта по аналитическому решению и исследование сеточной сходимости — тема 8.
ПР16. Согласование расхода и перепада давления в системе подачи с пористым элементом — тема 8.
Для каждой работы предъявляются схема и исходные данные, обоснованная модель, решение, проверка и краткая индивидуальная защита. Преподаватель может использовать соответствующую задачу банка как базовое условие. В ПР3 дополнительно рассматривается поле v = (ax, −ay, 0), где a = 1 $с^{-1}$: требуется проверить div v = 0 и найти материальное ускорение (a^2x, a^2y, 0) для установившегося поля.
Д1 Обработка учебных данных для практической работы 7
Данные ниже синтетические и предназначены для отработки анализа, а не для отчёта о проведённом эксперименте. Для горизонтальной трубы d = 0,010 м, L = 2 м, ρ = 900 кг/м³ заданы пары перепад давления — расход. Входные эффекты исключены. Относительная неопределённость условного канала измерения расхода — 2%, давления — 1%; диаметр и длину в

этой задаче считать точными.

Перепад давления Па	Расход мл/с
500	0,62
1000	1,24
1500	1,85

Задание: построить Q(Δp), оценить наклон прямой Q = aΔp методом наименьших квадратов через начало координат, определить μ = πd⁴/(128La), проверить максимальное Re и оценить отклонения. Объяснить, какие данные нужны для настоящей экспериментальной валидации.

Ключ: a = Σ(Δp·Q)/Σ(Δp²) = 1,235714·10⁻⁹ м³/(с·Па); μ ≈ 0,09931 Па·с. Максимальная скорость ≈ 0,02355 м/с, Re ≈ 2,13. Максимальное относительное отклонение Q от прямой около 0,35%, что меньше условных неопределённостей каналов; это согласованность учебного набора, а не доказательство точности натурной модели.

Дополнительные вопросы к практической работе 12

Межфазный перенос растворённого вещества описан выражением массового потока через поверхность ṁ = K_L A(c* − c). Дано K_L = 2·10⁻⁵ м/с, A = 0,5 м², c* = 2 кг/м³, c = 0,5 кг/м³. Требуется найти скорость переноса, назвать допущения и показать противоположные знаки межфазного переноса в фазовых балансах. Ключ: ṁ = 1,5·10⁻⁵ кг/с; движущая сила и коэффициент отнесены к жидкой фазе, площадь и концентрации считаются заданными постоянными.

Дополнительные вопросы к практическим работам 9 и 13

Для стационарного радиального притока несжимаемой жидкости к скважине без гравитационного эффекта вывести зависимость Q = 2πkh(p_e − p_w)/(μ ln(r_e/r_w)); пояснить роль мощности пласта h. Для двойной пористости записать отдельные балансы накопления матрицы и трещин с равными по модулю противоположными обменными членами. В модели двойной проницаемости дополнительно учитывается перенос внутри обеих подсистем; выбор определяется задачей и данными.

9 Вычислительный отчёт

B1 Верификация ламинарного течения в трубе

Используйте условия З5. Выберите осесимметричную или трёхмерную модель круглой трубы. Жидкость ньютоновская, несжимаемая, изотермическая; стенка неподвижная с прилипанием. Давления на входе и выходе различаются на 2000 Па; задайте согласованные условия для скорости. Геометрия и условия должны воспроизводить полностью развитое течение, например периодический участок с заданным градиентом давления либо вход с развитым профилем и достаточная длина. Способ исключения входного влияния объясните.

- До запуска получите аналитические Q, среднюю и максимальную скорости и перепад давления; для З5 vmax = 2vcp = 0,0625 м/с.
- Постройте три систематически сгущаемые сетки с характерным отношением шагов около 2; укажите число ячеек или элементов и качество сетки.
- Получите расход, профиль скорости, входной и выходной массовые расходы; сохраните историю сходимости.
- Для каждой сетки найдите относительную ошибку расхода по аналитическому решению. Для мелкой сетки оцените максимальное отклонение профиля, нормированное на аналитическую vmax.
- Оцените относительный массовый небаланс |ṁвх − ṁвых|/|ṁвх| и изменение расхода между двумя последними сетками. Если используется нестационарный решатель, проверьте установление и чувствительность к шагу времени.
- Объясните, какие расхождения связаны с дискретизацией, входными условиями и свойствами. Сформулируйте границы применимости проверки; экспериментальные данные для валидации в задании не предоставлены.

Состав отчёта: постановка, схема, уравнения и условия, аналитика, таблица сеток, количественные ошибки, массовый баланс, график профиля и выводы. Приложить файлы расчёта и указать программу, версию и настройки. При использовании готового учебного случая указать источник и собственные изменения.

Проектные ориентиры для этой учебной задачи: ошибка расхода на мелкой сетке не более 2%, нормированная ошибка профиля не более 5%, изменение расхода между последними сетками не более 1%, массовый небаланс не более 0,5%. Это критерии задания, а не универсальные нормы CFD. Превышение требует анализа и исправления; одни малые невязки не заменяют эти проверки.

Если самостоятельный CFD-запуск недоступен, преподаватель может выдать расчётный случай и результаты трёх сеток. Такой вариант проверяет анализ и верификацию готовых результатов; умение самостоятельно поставить и выполнить компьютерный расчёт им не подтверждается. Равнозначность замены должна быть отдельно согласована.

10 Промежуточная аттестация

Предлагаемый формат: билет из двух теоретических вопросов раздела 3 и одной задачи раздела 5. Подготовка — ориентировочно 30 минут, ответ и обсуждение — до 10 минут; продолжительность и организация подлежат согласованию. На экзамене используется предложенная числовая шкала; для зачёта возможный проект порога указан ниже. Фактическая форма в аннотации не определена.

Билет	Вопросы	Задача
1	1 и 22	31
2	6 и 27	32
3	9 и 18	33
4	12 и 29	34
5	14 и 23	35
6	16 и 30	36
7	19 и 32	310
8	24 и 28	311

Перечень 1–32 служит полной программой подготовки. Восемь билетов — базовый комплект для этого проекта; при увеличении группы преподаватель формирует дополнительные равносложные сочетания из того же банка. Каждый теоретический ответ оценивается до 10, задача — до 10, всего 30 исходных баллов.

5.4. Перечень видов оценочных средств

Устный опрос и короткий письменный ответ по физическим моделям, уравнениям и условиям их применимости.
Тематический тест по всем восьми темам с ключом правильных ответов.
Расчётные задачи и защита решений практических работ.
Обработка учебных данных о расходе и перепаде давления с оценкой параметра и отклонений.
Две рубежные контрольные работы по темам 1–4 и 5–8.
Вычислительный отчёт с файлами модели, аналитической проверкой и исследованием сеточной сходимости.
Итоговый билет с двумя теоретическими вопросами и расчётной задачей; применение зависит от утверждённой формы аттестации.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

6.1. Рекомендуемая литература

6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л1.1	Повх И.Л.	Техническая гидромеханика: научное издание	Л.: Машиностроение 1976

6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л2.1	Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.	Теоретическая гидромеханика. Ч. 1: учебник для университетов	М. 1955

6.3. Перечень информационных и образовательных технологий

6.3.1 Компетентностно-ориентированные образовательные технологии

6.3.1.1	1. Python с NumPy SciPy и Matplotlib. Расчёт расходов и сопротивлений, аппроксимация данных, решение простых дифференциальных задач и построение графиков. Свободно распространяемые инструменты; конкретное окружение фиксируется преподавателем.
6.3.1.2	2. OpenFOAM. Численное моделирование течений методом конечных объёмов и подготовка учебных расчётных случаев. Свободное ПО; задания согласуются с выбранной ветвью и версией.
6.3.1.3	3. ParaView. Обработка результатов: сечения, профили скорости, линии тока и интегральные величины. Свободное ПО; используется совместно с вычислительным решателем.
6.3.1.4	4. COMSOL Multiphysics с подходящими модулями течения. Альтернативная среда для задач свободного течения, фильтрации и многофазных сред. Коммерческая лицензия и нужные модули требуются отдельно; наличие в КРСУ не установлено.

6.3.2 Перечень информационных справочных систем и программного обеспечения

6.3.2.1	1. NIST Chemistry WebBook — Thermophysical Properties of Fluid Systems. https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/ — Справочные плотность, вязкость, скорость звука и другие свойства доступных в системе сред при заданных условиях.
6.3.2.2	2. Turbulence Modeling Resource. https://tmbwg.github.io/turbmodels/ — Справочные материалы и проверочные задачи для моделей турбулентности; для ознакомления и дальнейших исследований. Официальная страница перехода — NASA.
6.3.2.3	3. КиберЛенинка. https://cyberleninka.ru/ — Открытые публикации по гидромеханике, фильтрации, реологии и вычислительному моделированию; качество и применимость каждой статьи оцениваются отдельно.
6.3.2.4	4. Crossref. https://www.crossref.org/ — Поиск и проверка библиографических метаданных, DOI и реквизитов публикаций; сервис не гарантирует доступ к полному тексту.

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Подготовка и работа с лекциями
Перед изучением темы повторите нужные понятия математического анализа, дифференциальных уравнений, физики и теоретической механики. В конспекте отдельно фиксируйте физический смысл величин, размерности, допущения и граничные условия. Для каждого уравнения записывайте, к какой среде и какому режиму оно относится. После лекции составьте краткую схему связей между исходной моделью и инженерной расчётной формулой.
Решение расчётной задачи
Начните со схемы системы, направления осей, контрольного объёма и списка искомых величин. Переведите данные в СИ. Обоснуйте стационарность, сжимаемость, вязкость, режим течения и необходимость учёта тяжести. Запишите исходный баланс до подстановки чисел, затем выполните расчёт. Завершите проверкой размерности, знака, порядка величины и области применимости модели.
Проверка характерных ошибок
Не смешивайте абсолютное и избыточное давление. Различайте массовый и объёмный расходы, динамическую и кинематическую вязкость, скорость фильтрации и скорость в порах. В формуле потерь указывайте, что используется коэффициент трения Дарси, а не Фаннинга. Для газа задавайте состояние, к которому отнесён объёмный расход. Учитывайте зависимость свойств от температуры и давления.

Подготовка к практической работе
Прочитайте вопросы соответствующей лекции и составьте план решения без чисел. Подготовьте справочные свойства с указанием температуры, давления и источника. Для компьютерной работы заранее проверьте доступ к выбранной программе. На занятии сохраняйте промежуточные результаты, а при защите объясняйте выбор модели и причины расхождений, а не только показывайте итоговое число.
Работа с данными
Сохраняйте исходную таблицу отдельно от обработанной. Подпишите единицы на осях графиков, укажите способ аппроксимации и остаточные отклонения. Учебные синтетические данные называйте учебными; не представляйте их как выполненный эксперимент. Для реальных измерений фиксируйте методику, приборы и неопределённость. Выборочные несовпадения с формулой сначала проверяйте по единицам, режиму и граничным условиям.
Фильтрационные и многофазные задачи
Перед применением закона Дарси проверьте смысл проницаемости, гравитационного слагаемого и используемой скорости. Для слабосжимаемой среды укажите суммарную сжимаемость и пористость. В двухфазной модели запишите насыщенности, относительные проницаемости и давления фаз; упрощение без капиллярных и гравитационных эффектов обоснуйте отдельно. Для неньютоновской среды задайте реологический закон и допустимый диапазон скоростей сдвига.
Вычислительная работа
Первую модель выполняйте для простой геометрии с известным решением. Сохраните геометрию, сетку, физические свойства, граничные условия, настройки и версию программы. На трёх последовательно сгущённых сетках сравните одну и ту же интегральную величину. Проверяйте невязки и массовый баланс независимо. Сравнение с аналитикой является верификацией; сравнение с независимыми измерениями — валидацией. Графическое поле само по себе не подтверждает точность.
Состав отчёта
Включите постановку и схему, исходные данные с единицами, модель и допущения, уравнения, ход решения, результаты, проверки и вывод. Для численной задачи добавьте таблицу сеток, ошибку относительно эталона, баланс массы и файлы, необходимые для воспроизведения. Для заимствованных формул, свойств и данных укажите источник; отличайте собственные расчёты от опубликованных.
Организация самостоятельной работы
Работайте последовательно по восьми темам и используйте выделенные на них часы. Сначала разберите типовой пример, затем решите изменённую задачу без подсказки и проверьте ответ независимым способом. Часть времени каждой темы оставляйте на исправление замечаний и подготовку к опросу. К концу курса соберите единый набор проверенных формул с условиями их применения.
Подготовка к аттестации
Готовьте ответ по схеме: физическая постановка, модель, уравнения, условия применимости, инженерный пример и способ проверки. Повторите задачи на гидростатику, импульс, истечение, вязкий поток, сопротивления, фильтрацию, реологию, трещины и сходимость. Пользуйтесь полным перечнем контрольных вопросов. Уточните у преподавателя утверждённую форму аттестации, допустимые справочные материалы и порядок сдачи работ.