

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

Факультет компьютерных систем и информационных технологий

Кафедра прикладной математики

УТВЕРЖДАЮ:

Декан факультета компьютерных  
систем и информационных технологий

Кочевский А.А.

» *апреля* 2023 года



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Моделирование турбулентности»

По направлению подготовки 01.04.03 Механика и математическое моделирова-  
ние

Магистерская программа: «Компьютерная аэрогидродинамика»

Луганск – 2023 г.

Лист согласования РПУД

Рабочая программа учебной дисциплины «Моделирование турбулентности» по направлению подготовки 01.04.03 Механика и математическое моделирование. – с.

Рабочая программа учебной дисциплины «Моделирование турбулентности» составлена с учетом Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 01.04.03 Механика и математическое моделирование утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от «10» января 2018 года № 14.

СОСТАВИТЕЛЬ:

докт. техн. наук, профессор Сёмин Д. А.

Рабочая программа дисциплины утверждена на заседании кафедры прикладной математики «18» апреля 2023 г., протокол № 10

Заведующий кафедрой прикладной математики  В.В.Малый

Переутверждена: «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г., протокол № \_\_\_\_\_

Переутверждена: «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_

Рекомендована на заседании учебно-методической комиссии факультета компьютерных систем и информационных технологий «19» апреля 2023 г., протокол № 8.

Председатель учебно-методической комиссии факультета компьютерных систем и информационных технологий \_\_\_\_\_



Н.Н. Ветрова.

© Сёмин Д. А., 2023 год

© ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», 2023 год

## Структура и содержание дисциплины

### 1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

*Цель* изучения дисциплины – овладение методологией математического моделирования турбулентных течений жидкости, приобретение практических навыков применения законов механики вязкой жидкости и газа для решения теоретических и прикладных задач гидро- и газодинамики.

*Задачи:* изучение и усвоение основных моделей турбулентности, их свойств и особенностей, математической формулировки в сочетании с законами гидродинамики вязкой жидкости при турбулентных течениях.

### 2. Место дисциплины в структуре ООП ВО.

Дисциплина «Моделирование турбулентности» входит в вариативную часть профессионального цикла дисциплин, по выбору студентов, направления подготовки 01.04.03 «Механика и математическое моделирование».

Необходимыми условиями для освоения дисциплины являются:

*знания* основных теорем и законов механики жидкости и газа, их математическую форму записи;

*умения* применять законы аэрогидромеханики для решения практических задач;

*навыки* методологии постановки и решения задач гидродинамики вязкой жидкости.

Содержание дисциплины является логическим продолжением содержания дисциплин: «Математика», «Физика», «Теоретическая механика», «Аэрогидромеханика», «Динамика вязкой жидкости», «Математические модели в механике сплошной среды». Содержание дисциплины является теоретическим фундаментом для выполнения магистерской работы по направлению подготовки 01.04.03 «Механика и математическое моделирование» по магистерской программе «Компьютерная аэрогидродинамика».

### 3. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижений компетенции (по реализуемой дисциплине)	Перечень планируемых результатов
ОПК-1. Способен находить, формулировать и решать актуальные проблемы механики и математики	ОПК-1.1. Знать методы анализа научных данных, способы подготовки и проведения научных исследований	<b>Знать:</b> основные достоинства методов и моделей турбулентных напряжений при решении задач турбулентного движения жидкости. их математическую форму записи
	ОПК - 1.2. Осуществляет анализ научной литературы для выявления актуальных	<b>Уметь:</b> выявлять актуальные задачи гидромеханики и применять для их решения

	задач механики и математики.	законы турбулентных течений
	ОПК - 1.3. Аргументированно обосновывает выбор метода решения конкретной задачи механики и математики на основе теоретических знаний	<b>Владеть:</b> навыками методологии выбора модели турбулентности, постановки и решения теоретических и прикладных задач гидродинамики турбулентных течений.

ОПК-2. Способен разрабатывать и применять новые методы математического моделирования в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности	ОПК-2.1. Знать достоинства и недостатки применения конкретных методов для решения поставленных прикладных задач, аргументированно обосновывая критерии оценки и сравнения методов	<b>Знать:</b> основные достоинства методов и моделей турбулентных напряжений при решении задач турбулентного движения жидкости. их математическую форму записи;
	ОПК - 2.2. Совершенствует существующие методы при решении конкретных прикладных задач, аргументированно обосновывая критерии, по которым проводились изменения и сравнение методов	<b>Уметь:</b> применять законы механики турбулентных течений для решения теоретических и прикладных задач;
	ОПК - 2.3. Владеть навыками реализации новых методов при решении конкретных прикладных задач в сфере своей профессиональной деятельности	<b>Владеть:</b> навыками методологии постановки и решения теоретических и прикладных задач гидродинамики турбулентных течений.

## 4. Структура и содержание дисциплины

### 4.1. Объем учебной дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Объем часов (зач. ед.)	
	Очная форма	Заочная форма
<b>Общая учебная нагрузка (всего)</b>	<b>360</b> (10 зач. ед)	<b>360</b> (10 зач. ед)
<b>Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего)</b> <b>в том числе:</b>	<b>120</b>	<b>60</b>
Лекции	60	30
Семинарские занятия	-	-
Практические занятия	60	30
Лабораторные работы	-	-
Курсовая работа (курсовой проект)	-	-
Другие формы и методы организации образовательного процесса	36	13
<b>Самостоятельная работа студента (всего)</b>	<b>204</b>	<b>287</b>

## 4.2. Содержание разделов дисциплины

### Введение

#### *Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости.*

Свойство напряжений в движущейся вязкой жидкости. Уравнения динамики вязкой жидкости в напряжениях. Обобщение гипотезы Ньютона о нормальных и касательных напряжениях в вязкой жидкости на случай пространственного течения. Уравнения Навье-Стокса динамики вязкой жидкости. Основные предположения и допущения. Уравнения Рейнольдса для осредненного турбулентного движения жидкости - Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS. Дополнительные касательные и нормальные напряжения. Особенности течения вязкой жидкости при больших рейнольдсовых числах. Пограничный слой. Общее дифференциальное уравнение для ламинарного и турбулентного пограничных слоев

#### *Раздел 2. Гипотезы турбулентности.*

Общая характеристика существующих подходов.

Алгебраические модели турбулентности –ARSM: Буссинеска, Прандтля, Кармана, Тейлора. Дифференциальные модели турбулентности. Модели с одним дифференциальным уравнением. Модель Спаларта-Аллмареса (SA). Модель Секундова vt-92. Модели с двумя дифференциальными уравнениями. Гипотеза Колмогорова-Прандтля. Модели типа k-ε. Модели типа k-ω. Модель Ментера Shear Stress Transport - SST.

Подходы к решению уравнений турбулентных течений.

Уравнения осредненного турбулентного движения жидкости - уравнения Рейнольдса - Reynolds Averaged Navier-Stokes –RANS.

Метод моделирования крупных вихрей - Large Eddy Simulation – LES.

Метод моделирования отсоединенных вихрей - Detached-Eddy Simulation – DES.

Метод прямого численного моделирования - Direct Numerical Simulation- DNS.

*Раздел 3. Реализация моделей турбулентности в современных программных комплексах вычислительной гидродинамики.*

Реализация моделей турбулентности в «**OpenFoam**».

Реализация моделей турбулентности в «**FlowVision**».

Реализация моделей турбулентности в «**ANSYS/CFX**».

## 4.3. Лекции

№ п/п	Название темы	Объем часов	
		Очная форма	Заочная форма
	Семестр 2-й		

1	<i>Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости. Свойства напряжений в движущейся вязкой жидкости. Уравнения динамики вязкой жидкости в напряжениях.</i>	4	2
2	Обобщение гипотезы Ньютона о нормальных и касательных напряжениях в вязкой жидкости на случай пространственного течения.	8	2
3	Дифференциальные уравнения движения жидкости Навье-Стокса.	8	2
4	Турбулентные течения. Уравнения осредненного турбулентного движения жидкости - уравнения Рейнольдса. Дополнительные касательные и нормальные напряжения.	4	2
5	Особенности течения вязкой жидкости при больших рейнольдсовых числах. Пограничный слой. Общее дифференциальное уравнение для ламинарного и турбулентного пограничных слоев	4	2
	<b><i>Итого за 2-й семестр</i></b>	<b>28</b>	<b>10</b>
	<b>Семестр 3-й</b>		
5	<i>Раздел 2. Гипотезы турбулентности. Алгебраические модели турбулентности –ARSM: Буссинеска, Прандтля, Кармана, Тейлора.</i>	4	3
6	Дифференциальные модели турбулентности. Модели с одним дифференциальным уравнением. Модель Спаларта-Аллмареса (SA). Модель Секундова vt-92.	4	3
7	Модели с двумя дифференциальными уравнениями. Гипотеза Колмогорова-Прандтля. Модели типа k-ε. Модели типа k-ω. Модель Ментера Shear Stress Transport - SST.	6	4
8	Подходы к решению уравнений турбулентных течений. Общая характеристика существующих подходов. Уравнения осредненного турбулентного движения жидкости - уравнения Рейнольдса - Reynolds Averaged Navier-Stokes –RANS. Метод моделирования крупных вихрей - Large Eddy Simulation – LES.	6	4

	Метод моделирования отсоединенных вихрей – Detached Eddy Simulation – DES. Метод прямого численного моделирования - Direct Numerical Simulation - DNS.		
9	Раздел 3. Реализация моделей турбулентности в современных программных комплексах вычислительной гидродинамики. Реализация моделей турбулентности в «OpenFoam».	4	2
10	Реализация моделей турбулентности в «FlowVision».	4	2
11	Реализация моделей турбулентности в «ANSYS/CFX».	4	2
	<b>Итого за 3-й семестр</b>	<b>32</b>	<b>20</b>
<b>Итого за 2-й и 3-й семестр:</b>		<b>60</b>	<b>30</b>

#### 4.4. Практические занятия

№ п/п	Название темы	Объем часов	
		Очная форма	Заочная форма
1	Применения алгебраических моделей турбулентности для расчета турбулентных течений. Свободная турбулентность.	4	2
2	Уравнения для рейнольдсовых напряжений. Генерация, диффузия, диссипация.	8	4
3	Уравнения для переноса кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации.	8	4
4	Модель Ментера. Вывод уравнений для «k- $\omega$ » из «k- $\epsilon$ » турбулентности.	8	4
5	Калибровка констант моделей турбулентности	8	4
6	Моделирование турбулентности в программном комплексе «OpenFoam».	8	4
7	Моделирование турбулентности в программном комплексе «FlowVision».	8	4
8	Моделирование турбулентности в программном комплексе «ANSYS/CFX».	8	4
<b>Итого:</b>		<b>60</b>	<b>30</b>

**4.5. Лабораторные работы.** Учебным планом не предусмотрены.

#### 4.6. Самостоятельная работа студентов

№ п/п	Название темы	Вид СРС	Объем часов	
			Очная форма	Заочная форма
1	<i>Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости в форме Навье-Стокса и Рейнольдса. Область ограничений.</i>	Поиск, анализ, структурирование и изучение информации по темам. Работа с конспектом лекций. Подготовка к практическим занятиям и к экзамену.	64	87
2	<i>Раздел 2. Алгебраические и дифференциальные гипотезы турбулентности. Условия применимости.</i>		70	100
3	<i>Раздел 3. Реализация гипотез турбулентности в современных программных комплексах вычислительной гидродинамики CFD.</i>		70	100
<b>Итого:</b>			<b>204</b>	<b>287</b>

**4.7. Курсовой проект/ курсовая работа/индивидуальные задания.** Учебным планом не предусмотрены.

### **5. Образовательные технологии**

Для достижения планируемых результатов освоения дисциплины «Моделирование турбулентности» используются следующие образовательные технологии:

1. Информационно-развивающие технологии.
2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии.
3. Личностно ориентированные технологии обучения.

Форма организации обучения Методы	Лекции	Практические занятия	Самостоятельная работа студента
Работа в команде		+	
Игра	+	+	
Методы проблемного обучения	+		+
Обучение на основе опыта	+	+	
Опережающая самостоятельная работа	+	+	+
Поисковый метод			+

### **6. Формы контроля освоения дисциплины**

По данному курсу предусматриваются следующие формы контроля знаний:

- текущий контроль (самоконтроль);
- промежуточный контроль;
- итоговый контроль.

Текущая аттестация студентов производится в дискретные временные интервалы лектором и преподавателем, ведущими практические и лабораторные занятия по дисциплине, в следующих формах:

Комбинированный контроль (устный или письменный) усвоения теоретического материала и практических занятий.

Фонды оценочных средств, включающие типовые задания и методы контроля, позволяющие оценить результаты обучающихся по данной дисциплине, помещаются в УМКД.

Итоговый контроль по результатам освоения дисциплины проходит в форме устного зачета (2-й семестр) и письменного экзамена (3-й семестр) (включает в себя ответ на теоретические вопросы и решение задач). Студенты, выполнившие 75% текущих и контрольных мероприятий на «отлично», а остальные 25% на «хорошо», имеют право на получение итоговых оценок, соответственно «зачтено» или «отлично».

В зачетную книжку выставляются оценки по национальной шкале, приведенные в таблицах.

**Критерии и шкала оценивания по оценочному средству –  
комбинированный контроль усвоения теоретического материала**

Шкала оценивания (интервал баллов)	Критерий оценивания
зачтено	Ответ дан на высоком уровне (студент в полном объеме осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, владеет профильным понятийным (категориальным) аппаратом и т.п.)
зачтено	Ответ дан на среднем уровне (студент в целом осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, допустив некоторые неточности и т.п.)
зачтено	Ответ дан на низком уровне (студент допустил существенные неточности, изложил материал с ошибками, не владеет в достаточной степени профильным категориальным аппаратом и т.п.)
Не зачтено	Ответ дан на неудовлетворительном уровне или не представлен (студент не готов, не выполнил задание и т.п.)

Национальная шкала	Характеристика знания предмета и ответов	Зачеты
отлично (5)	Студент глубоко и в полном объеме владеет программным материалом. Грамотно, исчерпывающе и логично его излагает в устной или письменной форме. При этом знает рекомендованную литературу, проявляет творческий подход в ответах на вопросы и правильно обосновывает принятые решения, хорошо владеет умениями и навыками при выполнении практических задач.	зачтено
хорошо (4)	Студент знает программный материал, грамотно и по сути излагает его в устной или письменной форме, допуская незначительные неточности в утверждениях, трактовках, определениях и категориях или незначительное количество ошибок. При	

	этом владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических задач.	
удовлетворительно (3)	Студент знает только основной программный материал, допускает неточности, недостаточно четкие формулировки, непоследовательность в ответах, излагаемых в устной или письменной форме. При этом недостаточно владеет умениями и навыками при выполнении практических задач. Допускает до 30% ошибок в излагаемых ответах.	

## 7. Учебно-методическое и программно-информационное обеспечение дисциплины:

### *а) основная литература:*

1. Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей [Электронный ресурс]: учебник для вузов / А.Е. Зарянкин - М. : Издательский дом МЭИ, 2014. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383009031.html>

2. Современные подходы к моделированию турбулентности: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, А.К. Травин, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с. [http://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb\\_models](http://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb_models)

3. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88с. [http://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb\\_models](http://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb_models)

### *б) дополнительная литература:*

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Изд-во Дрофа, 2003.- 846с.

2. Численное исследование задач внешней и внутренней аэродинамики [Электронный ресурс] / Башкин В.А., Егоров И.В - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922115247.html>

3. Основы работы в ANSYS 17 [Электронный ресурс] / Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. - М. : ДМК Пресс, 2017. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970604250.html>

### *в) методические указания*

1. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Моделирование турбулентности» для студентов по направлению подготовки «Энергетическое машиностроение». / Сост. Сёмин Д.А., Левашов А.Н. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В.Даля. 2015 – 32 с.

2. Методические указания к самостоятельной работе по курсу «Моделирование турбулентности» для студентов по направлению подготовки «Энергетическое машиностроение». / Сост. Сёмин Д.А., Левашов А.Н. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В.Даля. 2015 – 32 с.

### *г) интернет-ресурсы:*

Министерство образования и науки Российской Федерации – <http://минобрнауки.рф/>

Федеральная служба по надзору в сфере образования и науки – <http://obrnadzor.gov.ru/>

Министерство образования и науки Луганской Народной Республики – <https://minobr.su>

Народный совет Луганской Народной Республики – <https://nslnr.su>

Портал Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования – <http://fgosvo.ru>

Федеральный портал «Российское образование» – <http://www.edu.ru/>

Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» – <http://window.edu.ru/>

Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов – <http://fcior.edu.ru/>

### **Электронные библиотечные системы и ресурсы**

Электронно-библиотечная система «Консультант студента» – <http://www.studentlibrary.ru/cgi-bin/mb4x>

Электронно-библиотечная система «StudMed.ru» – <https://www.studmed.ru>

### **Информационный ресурс библиотеки образовательной организации**

Научная библиотека имени А. Н. Коняева – <http://biblio.dahluniver.ru/>

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

В качестве материально-технического обеспечения дисциплины используются презентационная техника (проектор, экран, ноутбук), наборы слайдов (либо раздаточный материал в бумажном виде) или кинофильмов; демонстрационные приборы и лабораторные стенды кафедры «Гидрогазодинамика».

### **Программное обеспечение:**

<b>Функциональное назначение</b>	<b>Бесплатное программное обеспечение</b>	<b>Ссылки</b>
Офисный пакет	Libre Office 6.3.1	<a href="https://www.libreoffice.org/">https://www.libreoffice.org/</a> <a href="https://ru.wikipedia.org/wiki/LibreOffice">https://ru.wikipedia.org/wiki/LibreOffice</a>
Операционная система	UBUNTU 19.04	<a href="https://ubuntu.com/">https://ubuntu.com/</a> <a href="https://ru.wikipedia.org/wiki/Ubuntu">https://ru.wikipedia.org/wiki/Ubuntu</a>
Браузер	FirefoxMozilla	<a href="http://www.mozilla.org/ru/firefox/fx">http://www.mozilla.org/ru/firefox/fx</a>
Браузер	Opera	<a href="http://www.opera.com">http://www.opera.com</a>
Почтовый клиент	MozillaThunderbird	<a href="http://www.mozilla.org/ru/thunderbird">http://www.mozilla.org/ru/thunderbird</a>
Файл-менеджер	FarManager	<a href="http://www.farmanager.com/download.php">http://www.farmanager.com/download.php</a>
Архиватор	7Zip	<a href="http://www.7-zip.org/">http://www.7-zip.org/</a>

Графический редактор	GIMP (GNU Image Manipulation Program)	<a href="http://www.gimp.org/">http://www.gimp.org/</a> <a href="http://gimp.ru/viewpage.php?page_id=8">http://gimp.ru/viewpage.php?page_id=8</a> <a href="http://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP">http://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP</a>
Редактор PDF	PDFCreator	<a href="http://www.pdfforge.org/pdfcreator">http://www.pdfforge.org/pdfcreator</a>
Аудиоплеер	VLC	<a href="http://www.videolan.org/vlc/">http://www.videolan.org/vlc/</a>

Паспорт  
фонда оценочных средств по учебной дисциплине  
«Моделирование турбулентности»

Перечень компетенций (элементов компетенций), формируемых в результате освоения учебной дисциплины (модуля) или практики

№ п / п	Код контролируемой компетенции	Формулировка контролируемой компетенции	Контролируемые темы учебной дисциплины, практики	Этапы формирования (семестр изучения)
1	ОПК-2	способность создавать и исследовать новые математические модели в естественных науках	<i>Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости.</i>	3
			<i>Раздел 2. Гипотезы турбулентности.</i>	3
			<i>Раздел 3. Реализация моделей турбулентности в современных программных комплексах вычислительной гидродинамики.</i>	3
2	ПК-5	способность к творческому применению, развитию и реализации математически сложных алгоритмов в современных программных комплексах	<i>Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости.</i>	3
			<i>Раздел 2. Гипотезы турбулентности.</i>	3
			<i>Раздел 3. Реализация моделей турбулентности в современных программных комплексах вычислительной гидродинамики.</i>	3
3	ПК-12	способность к проведению методических и экспертных работ в области математики	<i>Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости.</i>	3
			<i>Раздел 2. Гипотезы турбулентности.</i>	3
			<i>Раздел 3. Реализация моделей турбулентности в современных программных</i>	3

			комплексах вычислительной гидродинамики.	
--	--	--	--	--

## Показатели и критерии оценивания компетенций, описание шкал оценивания

№ п/п	Код контролируемой компетенции	Показатель оценивания (знания, умения, навыки)	Контролируемые темы учебной дисциплины	Наименование оценочного средства
1	ОПК-2	<p><i>знать</i> основные методы и модели турбулентных напряжений при решении задач турбулентного движения жидкости. их математическую форму записи;</p> <p><i>уметь</i> применять законы механики турбулентных течений для решения теоретических и прикладных задач;</p> <p><i>владеть навыками</i> методологии постановки и решения теоретических и прикладных задач гидродинамики турбулентных течений.</p>	Раздел 1, Раздел 2, Раздел 3.	Вопросы для комбинированного контроля усвоения теоретического материала, задания по практическим занятиям, экзамен
2	ПК-5	<p><i>знать</i> основные методы и модели турбулентных напряжений при решении задач турбулентного движения жидкости. их математическую форму записи;</p> <p><i>уметь</i> применять законы механики турбулентных течений для решения теоретических и прикладных задач;</p> <p><i>владеть навыками</i> методологии постановки и решения теоретических и прикладных задач гидродинамики турбулентных течений.</p>	Раздел 1, Раздел 2, Раздел 3.	Вопросы для комбинированного контроля усвоения теоретического материала, задания по практическим занятиям, экзамен
3	ПК-12	<p><i>знать</i> основные методы и модели турбулентных напряжений при решении задач турбулентного движения жидкости. их математическую форму записи;</p> <p><i>уметь</i> применять законы механики турбулентных течений для решения теоретических и прикладных задач;</p> <p><i>владеть навыками</i> методологии постановки и решения теоретических и прикладных задач гидродинамики турбулентных течений.</p>	Раздел 1, Раздел 2, Раздел 3.	Вопросы для комбинированного контроля усвоения теоретического материала, задания по практическим занятиям, экзамен

## **Фонды оценочных средств по дисциплине «Моделирование турбулентности»**

### **Вопросы для комбинированного контроля усвоения теоретического материала (устно или письменно):**

#### *Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости.*

1. Свойство напряжений в движущейся вязкой жидкости.
2. Уравнения динамики вязкой жидкости в напряжениях.
3. Обобщение гипотезы Ньютона о нормальных и касательных напряжениях в вязкой жидкости на случай пространственного течения.
4. Уравнения Навье-Стокса динамики вязкой жидкости.
5. Основные предположения и допущения.
6. Уравнения Рейнольдса для осредненного турбулентного движения жидкости - Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS.
7. Дополнительные касательные и нормальные напряжения.

#### *Раздел 2. Гипотезы турбулентности.*

8. Общая характеристика существующих подходов.
9. Алгебраические модели турбулентности –ARSM:
  - 9.1. Буссинеска,
  - 9.2. Прандтля,
  - 9.3. Кармана,
  - 9.4. Тейлора.
10. Дифференциальные модели турбулентности:
  - 10.1. Модели с одним дифференциальным уравнением.
  - 10.2. Модель Спаларта-Аллмареса (SA).
  - 10.3. Модель Секундова vt-92.
11. Модели с двумя дифференциальными уравнениями:
  - 11.1. Гипотеза Колмогорова-Прандтля.
  - 11.2. Модели типа k-ε. Модели типа k-ω.
  - 11.3. Модель Ментера Shear Stress Transport - SST.
12. Подходы к решению уравнений турбулентных течений.
  - 12.1. Уравнения осредненного турбулентного движения жидкости - уравнения Рейнольдса - Reynolds Averaged Navier-Stokes –RANS.
  - 12.2. Метод моделирования крупных вихрей - Large Eddy Simulation – LES.
  - 12.3. Метод моделирования отсоединенных вихрей - Detached-Eddy Simulation – DES.
  - 12.4. Метод прямого численного моделирования - Direct Numerical Simulation-DNS.

Раздел 3. Реализация моделей турбулентности в современных программных комплексах вычислительной гидродинамики.

13.1. Реализация моделей турбулентности в «OpenFoam».

13.2. Реализация моделей турбулентности в «FlowVision».

13.3. Реализация моделей турбулентности в «ANSYS/CFX».

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству –  
комбинированный контроль усвоения теоретического материала

Шкала оценивания (интервал баллов)	Критерий оценивания
5	Ответ дан на высоком уровне (студент в полном объеме осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, владеет профильным понятийным (категориальным) аппаратом и т.п.)
4	Ответ дан на среднем уровне (студент в целом осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, допустив некоторые неточности и т.п.)
3	Ответ дан на низком уровне (студент допустил существенные неточности, изложил материал с ошибками, не владеет в достаточной степени профильным категориальным аппаратом и т.п.)
2	Ответ дан на неудовлетворительном уровне или не представлен (студент не готов, не выполнил задание и т.п.)

Задания по практическим занятиям:

№ п/п	Название темы
1-3	Применения алгебраических моделей турбулентности для расчета турбулентных течений. Свободная турбулентность.
4-6	Уравнения для рейнольдсовых напряжений. Генерация, диффузия, диссипация.
7-9	Уравнения для переноса кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации.
10-12	Модель Ментера. Вывод уравнений для «k- $\omega$ » из «k- $\epsilon$ » турбулентности.
13-15	Калибровка констант моделей турбулентности
16	Моделирование турбулентности в программном комплексе «OpenFoam».
17	Моделирование турбулентности в программном комплексе «FlowVision».
18	Моделирование турбулентности в программном комплексе «ANSYS/CFX».

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству –

*комбинированный контроль усвоения теоретического материала*

Шкала оценивания (интервал баллов)	Критерий оценивания
5	Ответ дан на высоком уровне (студент в полном объеме осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, владеет профильным понятийным (категориальным) аппаратом и т.п.)
4	Ответ дан на среднем уровне (студент в целом осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, допустив некоторые неточности и т.п.)
3	Ответ дан на низком уровне (студент допустил существенные неточности, изложил материал с ошибками, не владеет в достаточной степени профильным категориальным аппаратом и т.п.)
2	Ответ дан на неудовлетворительном уровне или не представлен (студент не готов, не выполнил задание и т.п.)

**Тема и задание курсовой работы.** Учебным планом не предусмотрена.

**Вопросы к экзамену:**

*Раздел 1. Уравнения динамики вязкой жидкости.*

1. Свойство напряжений в движущейся вязкой жидкости.
2. Уравнения динамики вязкой жидкости в напряжениях.
3. Обобщение гипотезы Ньютона о нормальных и касательных напряжениях в вязкой жидкости на случай пространственного течения.
4. Уравнения Навье-Стокса динамики вязкой жидкости.
5. Основные предположения и допущения.
6. Уравнения Рейнольдса для осредненного турбулентного движения жидкости - Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS.
7. Дополнительные касательные и нормальные напряжения.

*Раздел 2. Гипотезы турбулентности.*

8. Общая характеристика существующих подходов.
9. Алгебраические модели турбулентности –ARSM:
  - 9.1. Буссинеска,
  - 9.2. Прандтля,
  - 9.3. Кармана,
  - 9.4. Тейлора.
10. Дифференциальные модели турбулентности:
  - 10.1. Модели с одним дифференциальным уравнением.
  - 10.2. Модель Спаларта-Аллмареса (SA).
  - 10.3. Модель Секундова vt-92.
11. Модели с двумя дифференциальными уравнениями:
  - 11.1. Гипотеза Колмогорова-Прандтля.
  - 11.2. Модели типа k-ε. Модели типа k-ω.
  - 11.3. Модель Менгера Shear Stress Transport - SST.
12. Подходы к решению уравнений турбулентных течений.

12.1. Уравнения осредненного турбулентного движения жидкости - уравнения Рейнольдса - Reynolds Averaged Navier-Stokes –RANS.

12.2. Метод моделирования крупных вихрей - Large Eddy Simulation – LES.

12.3. Метод моделирования отсоединенных вихрей - Detached-Eddy Simulation – DES.

12.4. Метод прямого численного моделирования - Direct Numerical Simulation-DNS.

*Раздел 3. Реализация моделей турбулентности в современных программных комплексах вычислительной гидродинамики.*

13.1. Реализация моделей турбулентности в «**OpenFoam**».

13.2. Реализация моделей турбулентности в «**FlowVision**».

13.3. Реализация моделей турбулентности в «**ANSYS/CFX**».

**Оценочные средства для промежуточной аттестации (экзамен). Типовой экзаменационный билет.**

Билет № N

**I.** Вопрос из 1-го раздела.

**II.** Теоретический вопрос из 2-го раздела.

**III.** Вопрос из 3-го раздела.

*Утверждено на заседании кафедры ГГД, протокол №\_\_ от \_\_\_\_\_201\_\_ г.*

Заведующий кафедрой

*доц. Мальцев Я.И.*

Лектор

*проф. Семин Д.А.*

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству промежуточный контроль (экзамен)

Шкала оценивания	Критерий оценивания
отлично (5)	Студент глубоко и в полном объёме владеет программным материалом. Грамотно, исчерпывающе и логично его излагает в устной или письменной форме. При этом знает рекомендованную литературу, проявляет творческий подход в ответах на вопросы и правильно обосновывает принятые решения, хорошо владеет умениями и навыками при выполнении практических задач.
хорошо (4)	Студент знает программный материал, грамотно и по сути излагает его в устной или письменной форме, допуская незначительные неточности в утверждениях, трактовках, определениях и категориях или незначительное количество ошибок. При этом владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических задач.
удовлетворительно (3)	Студент знает только основной программный материал, допускает неточности, недостаточно чёткие формулировки, непоследовательность в ответах, излагаемых в устной или письменной форме. При этом недостаточно владеет умениями и навыками при выполнении практических задач. Допускает до 30% ошибок в излагаемых ответах.
неудовлетворительно (2)	Студент не знает значительной части программного материала. При этом допускает принципиальные ошибки в доказательствах, в трактовке понятий и категорий, проявляет низкую культуру знаний, не владеет основными умениями и навыками при выполнении практических задач. Студент отказывается от ответов на дополнительные вопросы

## Форма листа изменений и дополнений, внесенных в ФОС

### Лист изменений и дополнений

№ п/п	Виды дополнений и изменений	Дата и номер протокола заседания кафедры (кафедр), на котором были рассмотрены и одобрены изменения и дополнения	Подпись (с расшифровкой) заведующего кафедрой (заведующих кафедрами)

## Экспертное заключение

Представленный фонд оценочных средств (далее - ФОС) по дисциплине «Моделирование турбулентности» соответствует требованиям ГОС ВО.

Предлагаемые формы и средства текущего и промежуточного контроля адекватны целям и задачам реализации магистерской программы по направлению подготовки 01.04.03 «Механика и математическое моделирование».

Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающегося представлены в полном объеме.

Виды оценочных средств, включенные в представленный фонд, отвечают основным принципам формирования ФОС.

Разработанный и представленный для экспертизы фонд оценочных средств рекомендуется к использованию в процессе подготовки магистров, по указанной программе.

Председатель учебно-методической комиссии

института транспорта и логистики \_\_\_\_\_ Е.И. Иванова