

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института-заместитель  
директора ФАКТ**

**М.А. Кудров**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Управление течением жидкости
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии
	Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
	кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: М.А. Брутян, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 04.03.2025

## Аннотация

Программа "Управление течением жидкости" направлена на формирование у студентов базовых знаний в области теории и практики управления течением жидкости и газа и знакомство студентов с современными проблемами управления течением жидкости и газа при дозвуковых и трансзвуковых скоростях. Курс состоит из трех разделов: (1) методы и способы активного управления течением, (2) методы и способы пассивного управления течением, (3) методы и способы адаптивного управления течением.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- знакомство студентов с современными проблемами управления течением жидкости и газа при дозвуковых и трансзвуковых скоростях. Курс состоит из трех разделов: (1) методы и способы активного управления течением, (2) методы и способы пассивного управления течением, (3) методы и способы адаптивного управления течением.

### Задачи дисциплины

- формирование у студентов базовых знаний в области теории и практики управления течением жидкости и газа;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований по проблеме управления течением жидкости и газа.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, законы классической и современной физики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- современные проблемы механики и прикладной математики;
- современные методы, способы теоретического, экспериментального и численного исследования проблемы управления течением жидкости и газа и физические принципы, на которых они основаны.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- выводиться основные уравнения аэрогидродинамики и понимать их физический смысл;
- пользоваться математическим аппаратом дифференциальных уравнений, тензорного анализа и методом сращиваемых асимптотических разложений;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- навыками теоретического анализа реальных задач управления течением жидкости и газа.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение. Основные концепции управления течением жидкости.	2			
2	Управление за счет введения в поток полимерных частиц.	2			10
3	Повышение устойчивости течений за счет введения в поток полимерных частиц.	3			
4	Уменьшение сопротивления в микрополярной жидкости.	2			
5	Спурт-эффект для течения вязкоупругой жидкости в трубах.	2			
6	Активное управление течением за счет оптимального отсоса-вдува.	2			

7	Оптимизация формы обтекаемых тел в вязкой жидкости.	2			
8	Пассивное управление течением жидкости.	2			
9	Управление отрывом пограничного слоя за счет пассивного перепуска.	2			
10	Адаптивные мембранные профили.	2			
11	Адаптивные мембранные крылья.	2			
12	Влияние пассивной адаптации формы профиля на его аэродинамические характеристики.	2			
13	Управление с помощью регулярной структуры обтекаемой поверхности.	2			
14	Управление с помощью фрактальной микро- и наноструктуры обтекаемой поверхности.	3			5
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Введение. Основные концепции управления течением жидкости.

Понятия активного, пассивного и адаптивного управления течением. Актуальность темы. Современное состояние вопроса. Практические примеры различных концепций управления.

##### 2. Управление за счет введения в поток полимерных частиц.

Уравнения Эрингена (МПУ). Модифицированные уравнения движения микрополярной жидкости (ММПУ). Приближение пограничного слоя. Влияние микрополярных свойств среды на отрыв пограничного слоя.

##### 3. Повышение устойчивости течений за счет введения в поток полимерных частиц.

Исследование устойчивости течения микрополярной жидкости. Периодическое течение Колмогорова. Определение критического числа Рейнольдса для класса периодических течений.

##### 4. Уменьшение сопротивления в микрополярной жидкости.

Точное решение задачи Кармана о вращении бесконечного диска в микрополярной жидкости. Эффект уменьшения сопротивления в нелинейных задачах.

##### 5. Спурт-эффект для течения вязкоупругой жидкости в трубах.

Уравнения движения вязкоупругой жидкости. Газодинамическая аналогия для 4-х константной модели Олдройда. Спурт-эффект и гистерезис. Анализ картины интегральных кривых.

##### 6. Активное управление течением за счет оптимального отсоса-вдува.

Метод оптимизации систем с распределенными параметрами. Оптимизация отсоса-вдува, необходимые условия оптимальности. Точные решения оптимальных задач при малых и больших числах Рейнольдса. Качественная перестройка оптимального решения при переходе к отрывному режиму обтекания.

#### 7. Оптимизация формы обтекаемых тел в вязкой жидкости.

Вывод необходимых условий оптимальности. Новый градиентный метод решения оптимальных задач. Изопериметрическое неравенство, связывающее крутящий момент с заданным объемом тела.

#### 8. Пассивное управление течением жидкости.

Две концепции пассивного управления: формой обтекаемого тела и условиями на его поверхности; способы реализации.

#### 9. Управление отрывом пограничного слоя за счет пассивного перепуска.

Влияние пассивного отсоса-вдува на характер течения и отрыв пограничного слоя на профиле. Различные способы организации перепуска.

#### 10. Адаптивные мембранные профили.

Одномембранные и двухмембранные профили. Теория гибкого профиля. Предкрылок типа «парус». Влияние проницаемости материала на аэродинамические характеристики профиля.

#### 11. Адаптивные мембранные крылья.

Одномембранные и двухмембранные крылья. Влияние пространственных эффектов (стрингерного закрепления и наличия нервюр) на аэродинамические характеристики крыла.

#### 12. Влияние пассивной адаптации формы профиля на его аэродинамические характеристики.

Гидродинамический эффект Грея. Метод построения профиля с пассивно-адаптируемой поверхностью. Сравнение аэродинамических характеристик гибких и соответствующих жестких профилей.

#### 13. Управление с помощью регулярной структуры обтекаемой поверхности.

Влияние малой волнистости формы поверхности на обтекание профиля. Выбор оптимальных параметров «волны» диффузорной части профиля. Сравнение с экспериментом

#### 14. Управление с помощью фрактальной микро- и наноструктуры обтекаемой поверхности.

Фрактальная структура поверхности материала, формирующаяся при воздействии высокотемпературной плазмы. Спектральные свойства пульсаций скорости в пограничном слое. Эффект уменьшения сопротивления при обтекании фрактальной поверхности.

### **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

### **6.Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Теоретический взгляд на управление течением жидкости [Текст], [монография]/М. А. Брутян, -М, Изд. отд. ЦАГИ, 2013
2. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика [Текст], теория и приложения к геофизической гидродинамике/Г. И. Баренблатт, -Л., Гидрометеиздат, 1982
3. Управление движением жидкости [Текст], монография/В. И. Меркулов, -Новосибирск, Наука, 1984

#### Дополнительная литература

1. Необходимое условие в оптимальном управлении [Текст]/А. П. Афанасьев [и др.], -М., наука, 1990

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину "Управление течением жидкости", должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	М.А. Брутян, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Управление течением жидкости» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, законы классической и современной физики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- современные проблемы механики и прикладной математики;
- современные методы, способы теоретического, экспериментального и численного исследования проблемы управления течением жидкости и газа и физические принципы, на которых они основаны.

### уметь:



- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- выводить основные уравнения аэрогидродинамики и понимать их физический смысл;
- пользоваться математическим аппаратом дифференциальных уравнений, тензорного анализа и методом сращиваемых асимптотических разложений;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

**владеть:**

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- навыками теоретического анализа реальных задач управления течением жидкости и газа.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

1. Полуэмпирические методы выбора основных размерений лодки или поплавка МЛА.
2. Физические основы выбора габаритных размеров летающей лодки.
3. Роль угла продольной килеватости в гидродинамических и мореходных характеристиках МЛА.
4. Экспериментальное определение области устойчивого глиссирования МЛА,
5. Коэффициент совершенства обводов летающей лодки.
6. Математическое моделирование динамики глиссирующих объектов: эффективность и внешние условия.
7. Распределение нагрузок на глиссирующем корпусе при стационарном движении.
8. Особые области неустойчивого движения глиссирующих корпусов МЛА.
9. Построение границ области устойчивого глиссирования МЛА на основе результатов испытаний динамически подобной модели.
10. Динамически подобная модель МЛА как объект буксировочных испытаний в гидроканале.
11. Типовые параметры волнения при мореходных испытаниях МЛА.
12. Эффективные расчетные схемы при математическом моделировании глиссирования.
13. Эффективные расчетные схемы при математическом моделировании подводного крыла.
14. . Эффективные расчетные схемы при математическом моделировании воздушной подушки.
15. Преимущества и недостатки глиссирующей гидролыжи.
16. Методы расчета взлетно-посадочных дистанций МЛА.
17. Предварительная оценка мореходности перспективного МЛА.
18. Методы определения границ области устойчивого глиссирования.
19. Оцените потребную энерговооруженность самолета с лодочным корпусом, шасси на подводных крыльях и шасси на воздушной подушке.
20. Этапность в натурных испытаниях МЛА.
21. Параметры, измеряемые при натурных гидродинамических испытаниях МЛА.
22. Постановка задачи о волнах малой амплитуды. Линеаризация граничных условий. Влияние глубины водоема и длины волн на скорость их распространения.
23. Перенос энергии и массы прогрессивными волнами.
24. Влияние глубины водоема на гидродинамические характеристики МЛА.
25. Типовые модельные испытания проектируемого МЛА.
26. Сопоставление технико-экономических характеристик МЛА и летательного аппарата сухопутного базирования.

#### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

1. Виды и типы ЛА водного базирования.
2. Способы обеспечения взлета и посадки МЛА на воде.
3. Режимы движения МЛА при нахождении на воде.
4. Остойчивость и непотопляемость МЛА.
5. Гидростатический расчет МЛА.
6. Глиссирование как динамический способ поддержания МЛА на воде.
7. Подъемная сила при глиссировании.
8. Виды сопротивления при глиссировании.
9. Альтернативные способы создания динамической подъемной силы на воде.
10. Постановка плоской задачи о глиссировании.
11. Продольный подпор в плоской задаче о глиссировании.
12. Линейная постановка плоской задачи о глиссировании.
13. Брызгообразование при глиссировании. Брызговое сопротивление.
14. Метод аналогии с крылом при определении гидродинамических характеристик глиссеров. Формулы Джонса. Предельные случаи допустимости аналогии.
15. Метод плоских поперечных сечений в задачах глиссирования. Границы применимости метода.
16. Поправки к методу плоских поперечных сечений в задачах глиссирования.
17. Моделирование глиссирования на экспериментальных установках.
18. Цели и задачи буксировочных испытаний динамически подобных моделей МЛА.
19. Предварительная оценка гидродинамических и мореходных характеристик МЛА расчетными методами.
20. Оценка гидродинамических и мореходных характеристик МЛА методами экспериментальной гидродинамики.
21. Экранный эффект. Положительные и отрицательные стороны. Классификация ЛА, использующих экранный эффект.
22. Статическая устойчивость экраноплана. Фокус по высоте.
23. Поддув под крыло как метод повышения мореходности экранопланов.
24. Виды и типы ЛА, использующих экранный эффект.
25. Физические особенности функционирования подводных крыльев.
26. Кавитация и аэрация на подводных крыльях.
27. Компонентные схемы шасси на воздушной подушке.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.