

**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>	Техника и методика эксперимента в авиастроении
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Беспилотные авиационные системы Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра аэрофизического и летного эксперимента
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

5 (осенний) - Дифференцированный зачет

6 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 150 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 90 час.

Самостоятельная работа: 165 час.

Всего часов: 315, всего зач. ед.: 7

Программу составил: А.Р. Горбушин, канд. техн. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизического и летного эксперимента 08.04.2024

## Аннотация

Курс «Техника и методика эксперимента в авиастроении» дает студентам представление о до-, транс- и сверхзвуковых аэродинамических трубах и методах проведения в них экспериментальных исследований. В курсе демонстрируются первые аэродинамические трубы Уэнхена, Пашкевича, Циолковского, Жуковского, братьев Райт и современные установки ЦАГИ, а также зарубежных исследовательских центров NASA, ONERA, QinetiQ, ETW. Представлены современные первичные преобразователи, измерительные и оптические системы, применяющиеся в аэродинамических трубах. Разобраны методика измерений нагрузок с помощью тензометрических весов, давления, температуры, методика визуализации течения в окрестности модели и на ее поверхности. Рассмотрены методика учета внутреннего сопротивления свободнопроточных мотогондол, методика учета влияния границ потока и поддерживающих устройств, методика учета систематических погрешностей первичных преобразователей. Представлена оценка погрешностей аэродинамических характеристик на основе паспортных погрешностей первичных преобразователей.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- изучение техники и методики экспериментальных исследований в аэродинамических трубах.

#### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области аэродинамического эксперимента;
- приобретение теоретических знаний в области методики обработки результатов экспериментальных исследований;
- знакомство с первичными преобразователями и измерительными системами.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- методы визуализации течений газа на поверхности.

уметь:

- обрабатывать результаты эксперимента в аэродинамической трубе с применением тензодинамометра;
- 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;
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- 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;
- методами определения поправок к результатам измерений первичных преобразователей;
- методами учета влияния поддерживающих устройств и границ потока на аэродинамические характеристики моделей летательных аппаратов.

#### 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. Экспериментальные установки ведущих аэродинамических центров мира.	6		12	18
2	Методика обработки данных тензометрического эксперимента.	6		12	18
3	Механические и тензометрические весы.	6		12	18
4	Определение поправок на влияние веса модели и динамометра к показаниям тензодинамометра.	6		12	18
5	Первичные преобразователи в аэродинамическом эксперименте.	6		12	18
6	Границы потока и поддерживающих устройств.	5		5	11
7	Влияние границ потока и поддерживающих устройств.	5		4	11
8	Методика вторичной обработки данных весового эксперимента.	5		6	11
9	Погрешности измерения в аэродинамическом эксперименте.	5		5	11

10	Техника и методика испытаний в гиперзвуковых трубах.	5		5	16
11	Методы визуализации течений газа на поверхности.	5		5	15
Итого часов		60		90	165
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		315 час., 7 зач.ед.			

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

##### Семестр: 5 (Осенний)

#### 1. Введение. Экспериментальные установки ведущих аэродинамических центров мира.

Назначение аэродинамических труб. Аэродинамические центры мира.

#### 2. Методика обработки данных тензометрического эксперимента.

Методика обработки данных тензометрического эксперимента. Методика первичной обработки данных эксперимента с применением тензодинамометра. Поправки на влияние температуры на показания тензодинамометра.

#### 3. Механические и тензометрические весы.

Устройство и принцип действия механических весов. Трехкомпонентный тензодинамометр. Уравнения измерения.

#### 4. Определение поправок на влияние веса модели и динамометра к показаниям тензодинамометра.

Способы и методы определения поправок на влияние веса модели и динамометра к показаниям тензодинамометра.

#### 5. Первичные преобразователи в аэродинамическом эксперименте.

Определения, системы координат. Техника аэродинамического эксперимента: первичные преобразователи и измерительно-вычислительные комплексы. Измерение параметров потока. Фиксация ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя.

##### Семестр: 6 (Весенний)

#### 6. Границы потока и поддерживающих устройств.

Влияние границ потока и поддерживающих устройств на аэродинамические характеристики моделей.

#### 7. Влияние границ потока и поддерживающих устройств.

Описание влияний потока и поддерживающих устройств, их характеристики

#### 8. Методика вторичной обработки данных весового эксперимента.

Методика вторичной обработки данных весового эксперимента. Поправки на скос потока, донное сопротивление, внутреннее сопротивление протоков, малые изменения чисел Re и M от заданных.

9. Погрешности измерения в аэродинамическом эксперименте.

Описание погрешностей измерения в аэродинамическом эксперименте.

10. Техника и методика испытаний в гиперзвуковых трубах.

Описание техники и методики испытаний в гиперзвуковых трубах.

11. Методы визуализации течений газа на поверхности.

Описание методов визуализации течений газа на поверхности.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном, аэродинамическая труба АТ-1, персональный компьютер, тензометрические весы, измерительная система.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Аэродинамика [Текст] : в 2 ч. Ч. 1, Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла / Н. Ф. Краснов - М. Высшая школа, 1980

Дополнительная литература

1. Механика жидкости и газа [Текст] : учебник для вузов / Л. Г. Лойцянский ; Рек. М-вом образования РФ. — 7-е изд., испр. — М. : Дрофа, 2003. — 840 с.

## **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 занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, изучающий курс «Техника и методика эксперимента в авиастроении», должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания в эксперименте.

В результате изучения дисциплины студент должен иметь представление об измерительных системах, применяемых в аэродинамических трубах, а также должен знать методику проведения экспериментальных исследований в аэродинамических трубах.

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 учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- проведение лабораторных работ;
- подготовку к дифференцированному зачету.

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

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Беспилотные авиационные системы Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра аэрофизического и летного эксперимента
<b>курс:</b>	<u>3</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 5 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 6 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** А.Р. Горбушин, канд. техн. наук, доцент, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Техника и методика эксперимента в авиастроении» обучающийся должен:

### знать:

- методы визуализации течений газа на поверхности.

### уметь:

- обрабатывать результаты эксперимента в аэродинамической трубе с применением тензодинамометра;
- 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;
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- 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;
- методами определения поправок к результатам измерений первичных преобразователей;
- методами учета влияния поддерживающих устройств и границ потока на аэродинамические характеристики моделей летательных аппаратов.

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

- 1) Влияние температуры на показания тензовесов.
- 2) Поправка на влияние температуры
- 3) Влияние изменения температуры на нулевые показания тензовесов за время опыта.



- 4) Поправка к нулевым показаниям
- 5) Определение веса динамометра
- 6) Определение веса модели
- 7) Барометрическая поправка к показаниям датчиков давления
- 8) Определение скоса потока в рабочей части и введение поправки
- 9) Поправка на малые изменения числа Рейнольдса от заданного значения
- 10) Поправка на малые изменения числа Маха от заданного значения
- 11) Поправка на донное сопротивление
- 12) Методика определения поправки на внутреннее сопротивление
- 13) Вывести формулы для определения погрешностей числа Маха и скоростного напора. Оценить погрешности числа Маха и скоростного напора для  $M=1$ ,  $P_0=10000$  мм.вд.ст и инструментальной погрешности датчиков статического и полного давления  $\Delta P_0=2$  мм.вд.ст
- 14) Вывести формулу для определения погрешности коэффициента сопротивления в скоростной системе координат. Оценить погрешность определения коэффициента сопротивления модели пассажирского самолета для параметров  $Q=3000$  мм.вд.ст,  $X=9$  кГс,  $Y=600$  кГс,  $\alpha=2^\circ$ ,  $S=0.4$  м<sup>2</sup>, базируясь на следующих инструментальных погрешностях:  $\Delta Q=3$  мм.вд.ст,  $\Delta X=0.1$  кГс,  $\Delta Y=0.5$  кГс,  $\Delta \alpha=0.01^\circ$ .
- 15) Вывести формулу для определения погрешности коэффициента подъемной силы в скоростной системе координат. Оценить погрешность определения коэффициента подъемной силы пассажирского самолета для параметров  $Q=3000$  мм.вд.ст,  $X=9$  кГс,  $Y=600$  кГс,  $\alpha=2^\circ$ ,  $S=0.4$  м<sup>2</sup>, базируясь на следующих инструментальных погрешностях:  $\Delta Q=3$  мм.вд.ст,  $\Delta X=0.1$  кГс,  $\Delta Y=0.5$  кГс,  $\Delta \alpha=0.01^\circ$ .
- 16) Вывести формулу для определения погрешности аэродинамического качества. Оценить погрешность определения аэродинамического качества модели пассажирского самолета для параметров  $X=9$  кГс,  $Y=600$  кГс,  $\alpha=2^\circ$ , базируясь на следующих инструментальных погрешностях:  $\Delta X=0.1$  кГс,  $\Delta Y=0.5$  кГс,  $\Delta \alpha=0.01^\circ$ .
- 17) Элементы рабочего тракта аэродинамической трубы (до-, транс- и сверхзвуковой).

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

- 1) Оптические методы визуализации можно систематизировать по физическим явлениям, лежащим в их основе: преломление света, рассеяние света, люминесценция, собственное свечение исследуемого объекта. Приведите примеры методов в соответствии с этой систематизацией. В чем преимущество люминесцентных методов.
- 2) Какие физические явления сопровождают ламинарно-турбулентный переход пограничного слоя, позволяющие осуществить его визуализацию.
- 3) Назовите методы, с помощью которых можно визуализировать переход пограничного слоя, сравните эти методы.
- 4) Назовите панорамные методы, с помощью которых можно измерить тепловые потоки, сравните эти методы.
- 5) Назовите методы, с помощью которых можно визуализировать предельные линии тока, сравните эти методы.
- 6) Как с помощью оптики измерить шарнирный момент на закрылке?
- 7) Как измерить температуру 2000К и зачем это надо делать?
- 8) Метод шелковинок: в какой цвет надо красить модель и какого цвета должны быть шелковинки? Выведите формулу для контраста шелковинок при регистрации картины обтекания на матричный фотоприемник.
- 9) Типы поддерживающих устройств, преимущества и недостатки. Экспериментальное определение влияния поддерживающих устройств на аэродинамические характеристики моделей
- 10) Способы моделирования движения летательных аппаратов вблизи взлетно- посадочной полосы
- 11) Системы координат, используемые в аэродинамическом эксперименте. Взаимное положение связанной системы координат относительно нормальной и скоростной.
- 12) Фиксация ламинарно- турбулентного перехода пограничного слоя. Метод определения собственного сопротивления турбулизаторов.

- 13) Датчики для измерения углов тангажа, крена и рыскания. Уравнения измерения. Учет деформации поддерживающих устройств.
- 14) Термометры сопротивления. Измерение температуры торможения и температуры первичных преобразователей.
- 15) Измерение полного и статического давления в до-, транс- и сверхзвуковых аэродинамических трубах. Приемники и первичные преобразователи.
- 16) Схема и принцип работы трехкомпонентных механических весов.
- 17) Тензорезистор. Устройство и принцип работы. Коэффициент чувствительности.
- 18) Мост Уитстона в приложении к тензовесам. Схема, принцип измерения, выходной сигнал.
- 19) Схема и принцип работы трехкомпонентного тензодинамометра
- 20) Уравнения связи сигналов тензодинамометра с нагрузкой. Уравнения измерения.
- 21) Влияние температуры на показания тензовесов. Поправка на влияние температуры
- 22) Влияние изменения температуры на нулевые показания тензовесов за время опыта. Поправка к нулевым показаниям
- 23) Определение веса динамометра
- 24) Определение веса модели
- 25) Барометрическая поправка к показаниям датчиков давления

### 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.

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