

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физико-технический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

Декан

Ю.Н. Рыжих

Рабочая программа дисциплины

**Газодинамические основы внутрикамерных процессов**

по направлению подготовки

**24.04.03 Баллистика и гидроаэродинамика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**Баллистика ракетно-ствольных систем**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Магистр**

Год приема

**2025**

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОПОП

К.С. Рогаев

Председатель УМК

В.А. Скрипняк

Томск – 2025

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен самостоятельно приобретать, развивать и применять математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для решения нестандартных задач, в том числе в новой или незнакомой среде и в междисциплинарном контексте.

ОПК-3 Способен применять на практике новые научные принципы и методы исследований на основе анализа научной и патентной литературы.

ОПК-5 Способен осуществлять научный поиск и разрабатывать новые подходы и методы решения профессиональных задач в области авиационной и ракетно-космической техники.

ПК-1 Способен к проведению работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований.

ПК-2 Способен применять знания на практике, в том числе составлять математические модели профессиональных задач, находить способы их решения и интерпретировать профессиональный (физический) смысл полученного математического результата.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Знать основные положения математики, естественных и социально-экономических наук

ИОПК 1.2 Уметь развивать полученные знания и применять их для решения нестандартных задач.

ИОПК 1.3 Владеть способами адаптации к работе в новой среде.

ИОПК 3.1 Знать новые научные принципы и методы исследований в области профессиональной деятельности.

ИОПК 3.2 Уметь применять на практике новые научные принципы и методы исследований

ИОПК 3.3 Владеть методами поиска и анализа научной и патентной литературы

ИОПК 5.1 Знать способы генерирования новых идей в профессиональной деятельности

ИОПК 5.2 Уметь разрабатывать и реализовывать новые подходы и методы решения профессиональных задач

ИОПК 5.3 Владеть методологией научного поиска

ИПК 1.1 Знает методы анализа научных данных

ИПК 1.2 Умеет применять актуальную нормативную документацию в соответствующей области знаний.

ИПК 1.3 Осуществляет организацию сбора и изучения научно-технической информации по теме исследований и разработок

ИПК 2.1 Знает математическое описание законов баллистики и гидроаэродинамики.

ИПК 2.2 Умеет составлять математические модели профессиональных задач и находить способы их решения

ИПК 2.3 Осуществляет анализ и интерпретацию результатов математического моделирования

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Изучить основные процессы и эффекты, сопровождающие выстрел из ствольной системы, область применимости классической модели внутренней баллистики ствольных систем

– Научиться получать аналитическое и численное решение основной задачи внутренней баллистики, использовать численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений

– Изучить газодинамические модели внутренней баллистики ствольных систем и области их применения

– Научиться проводить расчет процесса выстрела из ствольной системы с использованием классической и нетрадиционных схем заряжания на основе газодинамических моделей, использовать методы и численные схемы интегрирования систем уравнений в частных производных, описывающих выстрел из ствольных систем.

### **3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, является обязательной для изучения.

### **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Второй семестр, экзамен

### **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

### **6. Язык реализации**

Русский

### **7. Объем дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

-лекции: 10 ч.

-практические занятия: 18 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

### **8. Содержание дисциплины, структурированное по темам**

Тема 1. Цели и задачи изучения курса. Основные процессы артиллерийского выстрела

Введение. Деление внутренней баллистики на разделы. Основные обозначения и определения во внутренней баллистике. Понятие об артиллерийском выстреле, общее устройство ствола, ведущих систем снаряда. Давление форсирования. Сопротивление ведущего пояска при движении снаряда по каналу ствола. Гладкоствольные системы. Движение и горение элементов метательного заряда.

Тема 2. Современные проблемы и задачи внутренней баллистики ствольных систем. Физические ограничения скорости метания, эффект насыщения. Способы повышения эффективности выстрела. Нетрадиционные схемы метания и новые топлива. Схемы с дополнительным подгоном, двухступенчатые легкогазовые установки, схемы с вводом электрической энергии, ствольно-реактивные и комбинированные схемы, заряды моноблочного типа, использование жидких метательных веществ.

Тема 3. Основы теории горения порохов

Пороха, их виды, свойства и формы. Баллистические и физико-химические свойства порохов. Общая характеристика процесса горения пороха в замкнутом объеме.

Уравнение состояния пороховых газов. Общая формула пиростатики, формула для наибольшего давления. Скорость горения пороха, ее определение. Определение силы пороха и коволюма пороховых газов. Интегральный критерий Шмица. Скорость газообразования при геометрическом законе горения. Дегрессивно и прогрессивно горящие формы пороховых зерен. Физический закон газообразования, Г-функция Серебрякова и ее применение. Конвективное горение пористых топлив, переход горения в детонацию.

Тема 4. Решение основной задачи внутренней баллистики на основе классической модели

Интегрирование уравнений методом Дроздова. Решение для предварительного, первого и второго периодов выстрела. Иллюстрация и свойства аналитического решения. Решение основной задачи при физическом законе газообразования. Численные методы решения для классической схемы орудия.

Тема 5. Газодинамические модели внутренней баллистики

Анализ волновой картины движения продуктов сгорания в классической и нетрадиционных схемах выстрела. Диапазон применимости классической модели внутренней баллистики.

Тема 6. Задача Лагранжа

Система уравнений, начальные и граничные условия. Аналитическое решение для области простой волны. Предельная скорость снаряда. Численное решение и его иллюстрация. Влияние свойств газа и условий заряжания на параметры метания в условиях задачи Лагранжа. Условия применимости полученных решений.

Тема 7. Модель выстрела на основе односкоростной газопороховой смеси

Основные допущения, эффективное уравнение состояния, запись системы уравнений, начальных и граничных условий. Граничные условия при использовании моноблочных метательных зарядов в камере и в стволе установки. Уравнение движения снаряда для классической схемы выстрела и при использовании присоединенного заряда, реактивный подгон снаряда. Примеры расчетов, распределение параметров в заснарядном пространстве, сравнение результатов с классическими решениями внутренней баллистики. Влияние уширения камеры на параметры течения.

Тема 8. Численные методы внутренней баллистики ствольных систем

Общие понятия теории разностных схем. Шаблон, аппроксимация, устойчивость, явные, неявные схемы, однородные, консервативные, двухшаговые схемы. Особенности расчета в подвижных сетках при изменении геометрии расчетной области.

Тема 9. Схема интегрирования системы уравнений для модели односкоростной газопороховой смеси

Консервативная двухшаговая схема типа предиктор-корректор. Выбор схемы для этапа предиктора. Схемы типа Лакса-Вендрофа. Уравнения предиктора в дифференциальной и разностной форме. Использование формулы Грина для записи уравнений корректора в интегральной и разностной форме. Условия устойчивости по правым частям. Общий алгоритм расчета выстрела. Примеры расчетов классических и нетрадиционных схем выстрела.

Тема 10. Численное решение сопряженных задач внутренней баллистики ствольных систем

Постановка задачи зажигания метательного заряда. Критерии зажигания. Неявная схема интегрирования уравнения теплопроводности

Тема 11. Модель выстрела на основе двухскоростной газопороховой смеси

Основная система газодинамических уравнений. Описание массового, силового и теплового взаимодействия фаз, межгранулярных напряжений. Уравнение зажигания поверхности пороха, учет диссипативных эффектов, критерии зажигания. Граничные условия для классической схемы выстрела и схемы с двумя моноблоками. Частные случаи применения модели, выстрел с трубчатым зарядом. Сравнение результатов расчетов с результатами односкоростной модели и термодинамическим решением.

Тема 12. Модель выстрела с полидисперсным пороховым зарядом и диспергирующимися моноблоками

Основные допущения и общая система уравнений. Модель диспергирования моноблоков, условия динамической совместности на поверхности горения моноблочного топлива. Примеры расчетов схем выстрелов с моноблочными зарядами. Анализ картины течения газопороховой смеси при использовании присоединенного заряда и моноблока в камере.

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости и теста по лекционному материалу и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» - <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

Зачет в девятом семестре проводится в письменной форме. Продолжительность зачета 1 час.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» - <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## **11. Учебно-методическое обеспечение**

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «iDO» - <https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=24679>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

в) План практических занятий по дисциплине.

г) Методические указания по проведению лабораторных работ.

д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

## **12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет**

а) основная литература:

1. Баллистика ствольных систем / РАРАН; В.В. Бурлов и др.; под ред. Л.Н. Лысенко и А.М. Липанова; редкол. серии: В.П. Киреев (пред.) и др. - М.: Машиностроение, 2006. - 461 с.

2. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет: Учебник для втузов / М. Е. Серебряков; Науч. ред. А. Г. Демусьяк. - 3-е изд., доп. и перераб. - М. : Оборонгиз, 1962. – 703 с.

3. Русяк И. Г. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах / И. Г. Русяк, В. М. Ушаков; Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, М-во образования Рос. Федерации. - Екатеринбург : УРО РАН, 2001. - 259 с.: ил.

4. Хоменко Ю. П. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах / Ю. П. Хоменко, А. Н. Ищенко, В. З. Касимов; Томский гос. ун-т, Научно-исслед. ин-т прикладной математики и механики; Под ред. Ю. П. Хоменко. - Новосибирск : Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 1999. – 255

5. Ищенко А. Н. Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах / Ищенко А.Н., Касимов В.З. - Москва : Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2015. - . URL: <https://e.lanbook.com/book/91958>

б) дополнительная литература:

1. Термогазодинамические основы внутренней баллистики ствольных систем. - Пенза, 1974. - 295 с.

2. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. - М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1974. - 344 с.

3. Роуч П. Д. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч; Пер. с англ. В. А. Гущина, В. Я. Митницкого; Под ред. П. И. Чушкина. - М. : Мир, 1980. - 616 с.: рис.

4. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. ; Под ред. С. К. Годунова. - М. : Наука, 1976. - 400 с.: ил.

в) ресурсы сети Интернет:

– Общероссийская Сеть КонсультантПлюс Справочная правовая система.  
<http://www.consultant.ru>

### 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

### 14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий практического типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

### **15. Информация о разработчиках**

Ищенко Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, Физико-технический факультет НИ ТГУ, кафедра Баллистики и гидроаэродинамики, профессор

Рогаев Константин Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Физико-технический факультет НИ ТГУ, кафедра Баллистики и гидроаэродинамики, доцент