

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физико-технический факультет



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по ОД

Е.В. Луков

« 28 » октября 2022г.

**ПРОГРАММА**

**кандидатского экзамена по научной специальности**  
1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Программа кандидатского экзамена по научной специальности  
**1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника** рассмотрена и  
рекомендована к утверждению ученым советом физико-технического факультета  
протокол № 11 от 27/10/2022

**Авторы-разработчики:**

1. Крайнов Алексей Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой математической физики
2. Старченко Александр Васильевич, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования

Руководитель ОП



Крайнов А. Ю.

## 1. Общие положения

На основании постановления Правительства Российской Федерации от 23.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» кандидатские экзамены сдаются в соответствии с научной специальностью (научными специальностями) и отраслью науки, предусмотренными номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утверждаемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (далее – Минобрнауки России), по которым осуществляется подготовка (подготовлена) диссертации.

Кандидатский экзамен по специальной дисциплине в соответствии с темой диссертации на соискание ученой степени кандидата наук представляет собой форму оценки степени подготовленности соискателя ученой степени к проведению научных исследований по научной специальности **1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника** по техническим и физико-математическим отраслям науки (далее – кандидатский экзамен).

Программа кандидатского экзамена разработана на основе Паспорта научной специальности *1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника* (далее – Программа), утвержденного ВАК при Минобрнауки России <https://drive.google.com/drive/folders/1RNYkXhvAzaEF85GqxOH8HhbenJloUMR7>.

Организация и проведение приема кандидатского экзамена осуществляется в соответствии с установленным в НИ ТГУ порядком.

Подготовка по Программе может осуществляться как самостоятельно, так и в рамках освоения соответствующей программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре НИ ТГУ. Сдача аспирантом кандидатского экзамена является обязательным условием обучения и относится к оценке результатов освоения базовой дисциплины (модуля) образовательного компонента программы, осуществляемой в рамках промежуточной аттестации.

## 2. Структура кандидатского экзамена и шкала оценивания уровня знаний

Кандидатский экзамен проводится в форме устного экзамена по билетам продолжительностью один академический час и состоит из следующих частей:

1. Основные вопросы (не более трёх вопросов по содержанию курса «Теплофизика и теоретическая теплотехника»).
2. Дополнительные вопросы (не более трёх вопросов из 2-го раздела содержания Программы).

Оценка уровня знаний по каждому вопросу осуществляется по пятибалльной шкале со следующим принципом перерасчета:

- «отлично» – 5 баллов;
- «хорошо» – 4 балла;



«удовлетворительно» – 3 балла;

«неудовлетворительно» – 1-2 балла.

При оценивании ответов на каждый из вопросов экзаменационного билета учитываются следующие критерии:

Ответ на вопрос исчерпывающий, продемонстрировано понимание и знание сути вопроса в полном объеме. Замечаний нет.	5 баллов
Ответ на вопрос неполный, но раскрывающий основную суть вопроса, продемонстрировано понимание и знание вопроса в достаточном объеме. Замечания незначительные.	4 балла
Ответ неполный с существенными замечаниями, знания по вопросу фрагментарные и частичные, в том числе и по тематике диссертационного исследования.	3 балла
Ответ на вопрос отсутствует или дан неправильный	1-2 балла

Итоговая оценка за кандидатский экзамен выставляется решением экзаменационной комиссии:

«отлично» – при наличии не менее 80% 5-балльных ответов и отсутствии 3-2-1-балльных ответов;

«хорошо» – при наличии не менее 80% 4-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«удовлетворительно» – при наличии более 20% 3-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«неудовлетворительно» – при наличии 1-2 балльного ответа (или отказа отвечать на вопрос).

### 3. Перечень тем и вопросов для подготовки к сдаче экзамена

**Раздел 1. Основные вопросы** (по содержанию курса «Теплофизика и теоретическая теплотехника»).

**Тема 1.** Термодинамика и статистическая физика

Законы термодинамики. Термодинамические функции. Термодинамические неравенства. Распределение Гиббса. Энтропия. Статистическое обоснование закона возрастания энтропии. Распределение Гиббса для систем с переменным числом частиц.

Статистическое описание идеального газа. Распределение Больцмана. Термодинамические свойства двухатомного газа с молекулами одинаковых и разных атомов. Закон равнораспределения.

Квантовая статистика идеального газа. Распределение Бозе. Бозе-конденсация. Термодинамика черного излучения. Распределение Ферми. Теплоемкость вырожденного ферми-газа.

Условие химического равновесия. Закон действующих масс. Теплота реакции. Термическая диссоциация, ионизация, возбуждение.



Неидеальные газы. Разложения по степеням плотности. Вириальные коэффициенты.

Фазовые переходы первого и второго рода. Термодинамическая теория Ландау фазовых переходов второго рода.

Теория флуктуаций. Распределение Гаусса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Корреляция флуктуаций. Флуктуации в критической точке. Корреляция флуктуаций во времени.

Термодинамика поверхности. Поверхностное натяжение и поверхностное давление. Равновесие между поверхностной фазой и газом. Теория образования зародышей при фазовых переходах первого рода.

## **Тема 2. Теория неравновесных процессов**

Уравнения переноса, основы термодинамики необратимых явлений. Соотношение симметрии кинетических коэффициентов Онсагера. Применения методов неравновесной термодинамики к явлениям в сплошных средах с одновременным протеканием различных процессов: диффузии, теплопроводности, вязкости, химических реакций.

Кинетическое уравнение Больцмана. П теорема. Вывод уравнения Больцмана на основе баланса числа частиц. Идеи метода Чепмена-Энскога и Грэда. Вывод гидродинамических уравнений из уравнений Больцмана. Вычисление кинетических коэффициентов. Влияние химических реакций и внутренних степеней свободы на явления переноса.

Случайные блуждания и броуновское движение. Уравнение Ланжевена. Уравнение Фоккера-Планка.

Релаксационные явления. Основное кинетическое уравнение. Колебательная релаксация. Вращательная релаксация. Кинетика диссоциации и ионизации. Газовые лазеры. Столкновительные механизмы создания инверсной населенности.

Распространение звука в газе, дисперсия и затухание звука. Вторая вязкость.

Ударные волны. Законы сохранения на фронте ударной волны. Ударная адиабата. Структура ударной волны в газах. Истечение газа через сопло.

## **Тема 3. Физика газов и плазмы**

Взаимодействие молекул. Источники сведений о межмолекулярных силах. Различные составляющие межмолекулярных сил. Потенциальные функции межмолекулярного взаимодействия. Упругие и неупругие столкновения.

Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Закон соответственных состояний, термодинамическое подобие. Теплоемкость. Сжимаемость. Эффект Джоуля-Томпсона. Методы измерения термодинамических величин.

Явление переноса в газах. Вязкость. Теплопроводность. Диффузия. Термодиффузия. Пристеночные явления в умеренно разреженном газе. Термомолекулярная разность давлений. Кинетические явления в сильно разреженном газе (газ Кнудсена).



Методы исследования явлений переноса. Методы получения сверхнизких и высоких давлений. Диффузионные методы разделения изотопов.

Низкотемпературная плазма. Дебаевский радиус.

Ионизационное равновесие. Формула Саха. Кинетика ионизации.

Явление переноса в плазме. Излучение плазмы.

#### **Тема 4. Физика жидкостей**

Строение жидкости. Радиальная функция распределения. Изучение структуры жидкости методом рассеяния рентгеновских лучей.

Уравнения состояния жидкости и плотных газов. Плотность, сжимаемость, теплоемкость.

Статистическая теория жидкостей. Частичные функции распределения, методы интегральных уравнений. Модельные теории. Компьютерное моделирование.

Явление переноса и релаксации в жидкости. Вязкость, теплопроводность, диффузия и самодиффузия.

Сопротивление и теплопередача в ламинарном потоке.

Конвективный теплообмен.

Турбулентное движение и турбулентный теплообмен.

Кризис сопротивления.

Модели турбулентности. Методы расчета турбулентных явлений в газе, жидкости и плазме.

Радиационный теплообмен и радиационная газовая динамика.

Изучение теплового движения в жидкостях по рассеянию света и медленных нейтронов. Пространственно-временная корреляционная функция.

Поверхностные явления. Поверхностное натяжение, смачивание. Осмотическое давление.

Экзотические жидкости, жидкие кристаллы, жидкие металлы. Квантовые жидкости. Сверхтекучесть гелия.

#### **Тема 5. Фазовые переходы**

Диаграммы состояния. Условия равновесия фаз. Закон Клапейрона-Клаузиуса. Критическая точка и физические свойства системы в окрестности критической точки. Соотношения между критическими показателями. Экспериментальные методы исследования критических состояний. Методы термостатирования и получения низких температур.

Кипение. Кризис кипения. Методы расчета.

Метастабильные состояния. Перегрев, переохлаждение. Давление насыщенных паров над раствором.

Плавление, кристаллизация. Возгонка и сублимация.

Теплообмен и сопротивление в многофазных средах.

#### **Тема 6. Физика твердого тела**



Строение твердых тел: кристаллические и аморфные твердые тела. Пространственная решетка кристалла. Трансляционная симметрия. Дефекты в кристаллах: точечные дефекты и дислокации.

Колебание решетки, спектральная плотность колебаний решетки. Ангармонизм и тепловое расширение. Теплоемкость кристаллов. Модели Эйнштейна и Дебая.

Электронные состояния кристаллов. Модели свободных электронов. Зонная структура энергетического спектра кристаллов. Проводники, полупроводники и диэлектрики. Электронная теплоемкость.

Термодинамика твердых тел. Уравнение состояния твердых тел. Термодинамическое описание термоупругих свойств.

Теплопроводность и вязкость твердых тел. Уравнение теплопроводности в твердых телах, теплопроводность кристаллов. Механизмы теплопроводности в диэлектриках и металлах. Вязкость и ее проявление при поглощении звука в твердых телах.

Взаимодействие молекул с поверхностью твердого тела. Адсорбция и хемосорбция. Мономолекулярная и полимолекулярная адсорбция.

#### **Рекомендуемая литература**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 2001.
2. Квасников И.А. Теория равновесных систем. Т. 1: Термодинамика; Т. 2: Статистическая физика. М.: Изд-во УРСС, 2002.
3. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000.
4. Исихара А. Статистическая физика. М.: Мир, 1973.
5. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Изд-во ФИАН, 1998.
6. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. Л.; М., 1961.
7. Ступоченко Е., Лосев С.А., Осипов А.И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., 1965.
8. Гордиев Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М.: Наука, 1980.
9. Физика простых жидкостей: Сб. М.: Мир, 1971.
10. Стенли Г. Фазовые переходы и кинетические явления. М.: Мир, 1973.
11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
13. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.

**Раздел 2. Дополнительные вопросы** (по области исследования паспорта научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника, в рамках которой определена тема подготавливаемой кандидатской диссертации).

Область исследования 1. **Основы теории тепло- и массообмена.**



1. Способы передачи тепла. Поле температур и тепловых потоков. Физическая картина теплообмена между телом и окружающей средой. Внутренняя задача. Краевые условия. Коэффициент теплоотдачи.

2. Кондуктивный механизм теплоотдачи. Закон Фурье. Уравнение теплопроводности. Виды источников тепла. Решение стационарного уравнения теплопроводности в некоторых простейших случаях.

3. Основные положения теории размерностей. Критерии подобия. Автоколебательные явления. Анализ нестационарного уравнения теплопроводности с постоянным источником тепла и граничными условиями. Методики теории размерностей. Критерии подобия в теории тепло- и массообмена.

4. Теория регулярного режима. Методы определения теплофизических характеристик вещества и коэффициента теплоотдачи. Понятие термического сопротивления.

5. Нестационарные процессы теплопроводности.

6. Связь между полями температур и полями скорости в движущейся среде. Обобщенное уравнение распространения тепла в вещественной среде. Ламинарное и турбулентное движение.

7. Свободная и вынужденная конвекция. Теплоотдача при движении жидкости в трубах. Теплообмен при обтекании тел, погруженных в жидкость.

8. Пограничный слой. Теория Прандтля. Определение коэффициента теплообмена при течении жидкости вдоль пластинки.

9. Теплообмен при турбулентном течении жидкости в пограничном слое.

10. Теплообмен при фазовых превращениях. Плавление. Испарение, Кипение.

11. Теплообмен при конденсации чистого пара на стенках. Капельная конденсация. Интенсификация конденсации.

12. Кипение однокомпонентной жидкости. Теплообмен при кипении.

13. Теплообмен при химических превращениях. Основные уравнения тепло- и массообмена при химических превращениях.

14. Тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена. Тепло- и массоотдача. Критерии подобия. Тройная аналогия.

15. Тепловое излучение. Абсолютно черное тело. Закон Стефана - Больцмана. Излучение серого тела. Излучение газов и паров. Излучение факела пламени.

16. Закон поглощения излучения. Источники тепла, обусловленные поглощением излучения.

17. Теплообмен излучением между твердыми телами, расположенными в прозрачной среде. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах.

18. Подобие процессов теплообмена и массообмена. Молекулярная и конвективная диффузия. Термодиффузия.

19. Теплоотдача при течении газа с большой скоростью.



## 20. Теплоотдача разреженных газов.

### Область исследования 2. **Устройство и работа теплообменных аппаратов.**

1. Типы теплообменников. Варианты движения теплоносителей в теплообменниках.
2. Виды теплообменного оборудования.
3. Кожухотрубные теплообменники с однофазными потоками.
4. Конденсаторы
5. Испарители.
6. Парогенераторы.
7. Тепловые трубы.
8. Камеры сгорания и печи.
9. Градирни
10. Сушильные установки.
11. Кондиционеры

### Область исследования 3. **Гидро- и газодинамика.**

1. Идеальная жидкость. Уравнения движения идеальной жидкости. Уравнение Бернулли. Потенциальное движение.
2. Вязкая жидкость. Уравнения движения вязкой жидкости. Диссипация энергии в несжимаемой жидкости. Течение в трубе.
3. Элементарная теория ударных волн. Закон сохранения массы, импульса и энергии и вывод основных соотношений между параметрами ударной волны.
4. Одномерное движение сжимаемого газа. Истечение газа через сопло. Вязкое движение сжимаемого газа в трубе.
5. Нестационарные газодинамические процессы. Уравнения Эйлера.
6. Основы гидродинамической теории детонации. Законы сохранения массы, импульса и энергии и вывод основных соотношений между параметрами детонационной волны.

### Область исследования 4. **Элементы вычислительных методов. Принципы построения разностных схем.**

1. Численные и асимптотические методы решения задач тепло и массопереноса.
2. Методы построения разностных схем. Понятие консервативности, однородные разностные схемы. Постановка разностных краевых задач. Исследование устойчивости разностных схем.
3. Основы организации пакетов прикладных задач. Технология разработки комплекса программ. Принципы организации блоков данных, хранение и поиск информации.
4. Численный эксперимент в теплофизике.





### Рекомендуемая литература.

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. - М.: Атомиздат, 1979, 415 с.
2. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука.- 1982.-280с.
3. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.И. Теория тепло- и массообмена. М.: Госэнергоиздат, 1961, 602 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953, 788 с.
5. Лыков А.В. Теплообмен (справочник). М.: Энергия. 1978. 480.
6. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И., Леонтьев А.И. и др. Теория теплообмена. Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа. 1979. 495с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия. 1975. 488с.
8. Себеси Т., Брэдшоу. Конвективный теплообмен. М.: Мир. 1987.
9. Юдаев Б.Н. Теплопередача. М.: Высшая школа. 1981, 319 с.
10. Сергеев Г.Т. Основы тепло- и массообмена в реагирующих средах. Минск: Изд-во Наука и техника. 1977. 232 с.
11. Петухов Б.С. Вопросы теплообмена. М.: Наука. 1987. 280 с.
12. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967. 600с.
13. Горбис З.Г. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия. 1970. 423 с.
14. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т.1, 2. М.: Наука. 1987.
15. Кутателадзе С.С., Накоряков Е.Н. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука. 1984. 302 с.
16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1987. 840 с.
17. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука. 1987. 491 с.
18. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа. 1984, 463 с.
19. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М.: изд-во МГУ, 1957. 442 с.
20. Зельдович Я.Б., Компонеец А.С. Теория детонации. М.: Гостехиздат. 1955. 268 с.
21. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука. 1977. 388 с.
22. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- массообмена. М.: Наука. 1984. 288 с.
23. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. ( В двух томах). Т.1. Основные положения и общие методы. М.: Мир. 1991.
24. Андерсон Д., Таннехилл Дм., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. (В двух томах). М.: Мир. 1990.

**3. Пример экзаменационного билета**  
**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ**  
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**Кандидатский экзамен по специальности**  
**1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника**  
**Экзаменационный билет № 1**

---

**Основные вопросы**

1. Термодинамика поверхности. Поверхностное натяжение и поверхностное давление. Равновесие между поверхностной фазой и газом.
2. Ударные волны. Законы сохранения на фронте ударной волны. Ударная адиабата.
3. Методы исследования явлений переноса. Методы получения сверхнизких и высоких давлений. Диффузионные методы разделения изотопов.

**Дополнительные вопросы:**

1. Свободная и вынужденная конвекция. Теплоотдача при движении жидкости в трубах. Теплообмен при обтекании тел, погруженных в жидкость.
2. Типы теплообменников. Варианты движения теплоносителей в теплообменниках.
3. Методы построения разностных схем. Понятие консервативности, однородные разностные схемы. Постановка разностных краевых задач. Исследование устойчивости разностных схем.

Председатель экзаменационной комиссии

*ФИО*