

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ПРОГРАММА КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА  
по научной специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»  
по физико-математическим наукам**

Ставрополь, 2022

## Введение

Программа-минимум кандидатского экзамена по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по физико-математическим наукам предназначена для определения практической и теоретической подготовленности аспиранта к выполнению профессиональных научно-исследовательских (экспериментальных, теоретических, расчетных) и педагогических задач, а также степени сформированности профессиональных компетенций.

Аспирант подтверждает степень освоения подготовкой и защитой реферата. Без сдачи рефератов аспирант (соискатель) не допускается к кандидатскому экзамену.

### **Порядок сдачи кандидатского экзамена по Теплофизике и теоретической теплотехнике**

Порядок организации приема кандидатских экзаменов определяется соответствующими нормативными документами и предусматривает обязательное написание реферата по соответствующей научной специальности.

Цель экзамена - установить глубину профессиональных и научных знаний аспиранта или соискателя ученой степени.

В экзаменационный билет включаются 3 вопроса.

Для подготовки по билету отводится 45 минут. При подготовке к ответу аспиранту или соискателю предоставляется право пользования программой кандидатского экзамена.

### **Подготовка реферата по научной специальности**

Отдельным этапом является подготовка аспирантом или соискателем реферата по научной специальности. Аспирант на базе самостоятельного изучения материала готовит реферат по научной специальности, соответствующей направлению его научного исследования. Проверку подготовленного реферата проводит научный руководитель. При наличии оценки «зачтено» по реферату аспирант или соискатель допускается к сдаче кандидатского экзамена.

### **Критерии оценивания**

Оценка «**отлично**» выставляется аспиранту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал современной литературы, правильно обосновывает принятое решение.

Оценка «**хорошо**» выставляется аспиранту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.

Оценка «**удовлетворительно**» выставляется аспиранту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения в применении теоретических положений на практике.

Оценка «**неудовлетворительно**» выставляется аспиранту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, не может увязывать теорию с практикой.

## СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

### Раздел 1. **Формирование представлений о природе теплоты и строении вещества**

- 1.1. Развитие представлений о природе теплоты.
- 1.2. Термодинамика – наука о формах обмена энергией.
- 1.3. Феноменологический характер термодинамики.
- 1.4. Развитие статистических идей.
- 1.5. Становление молекулярно-кинетической теории вещества.
- 1.6. Вклад отечественной науки в ее формирование.

### Раздел 2. **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ**

- 2.1. Термодинамическая система и окружающая среда.
- 2.2. Термодинамическое равновесие.
- 2.3. Термодинамические параметры, функции состояния.
- 2.4. Основные постулаты.
- 2.5. Понятие о термодинамических процессах, процессы равновесные и неравновесные.

### Раздел 3. **ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ**

- 3.1. Внутренняя энергия системы. Основные термодинамические процессы. Теплота и работа как формы обмена энергией – функции процессов. Первый закон термодинамики, его формулировки. Теплоемкости. Уравнение состояния термодинамических систем, термические и калорические уравнения состояния. Вириальная форма уравнений состояния, термические и калорические уравнения состояния. Уравнения Клапейрона-Менделеева и Ван-дер-Ваальса.
- 3.2. Обратимые и необратимые процессы. Формулировки второго закона
- 3.3. термодинамики. Условие взаимного превращения тепла и работы в прямом и обратном термодинамических циклах. Принцип адиабатической недостижимости. Голономность пфаффовых форм. Энтропия и термодинамическая температура. Основные уравнения термодинамики для равновесных процессов. Вычисление энтропии. Парадокс Гиббса.
- 3.4. Неравенство Клаузиуса. Изменение энтропии в неравновесных процессах.
- 3.5. Основное термодинамическое неравенство. Цикл и теоремы Карно.
- 3.6. Характеристические термодинамические функции и термодинамические потенциалы. Внутренняя энергия как термодинамический потенциал. Преобразования Лежандра. Выражения для термодинамических потенциалов в интегральной и дифференциальной формах. Соотношение Максвелла. Уравнение Гиббса-Гельмгольца.
- 3.7. Тепловая теорема Нернста. Следствия тепловой теоремы: недостижимость абсолютного нуля температур, особенности поведения термических коэффициентов при низких температурах, вырождение идеального газа.

### Раздел 4. **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

- 4.1. Динамические и статистические, феноменологические молекулярно-кинетические зависимости.
- 4.2. Статистические ансамбли, фазовое пространство, функции распределения.
- 4.3 Теорема Лиувилля. Описание квантовых систем.

### Раздел 5. **МЕТОДЫ РАВНОВЕСНОЙ КЛАССИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ**

- 5.1. Микроскопическое распределение.
- 5.2. Каноническое распределение Гиббса.
- 5.3. Статистический интеграл.
- 5.4. Большое каноническое распределение Гиббса для систем с переменным числом частиц. Большая статистическая сумма.

## **Раздел 6. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

- 6.1. Представление внутренней энергии и других термодинамических величин. Статистический смысл энтропии.
- 6.2. Статистический интеграл и термодинамические функции идеального газа.
- 6.3. Распределение Максвелла-Больцмана. Теорема вириала и закон распределения энергий по степеням свободы. Теплоемкости одно- и многоатомных газов.
- 6.4. Статистический интеграл неидеальных газов, конфигурационный интеграл в приближении парных столкновений. Уравнение состояния.

## **Раздел 7. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ**

- 7.1. Принцип тождественности элементарных частиц. Принцип Паули.
- 7.2. Статистические распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака.
- 7.3. Уравнение состояния и статистика квантового идеального газа.
- 7.4. Теплоемкость кристаллов, модель Дебая.

## **Раздел 8. ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ**

- 8.1. Классификация термодинамических систем. Основные уравнения термодинамики для сложных систем. Химический потенциал. Условия равновесия. Метастабильные состояния.
- 8.2. Равновесие и устойчивость, принцип Ле Шателье-Брауна. Фазовые диаграммы чистого вещества, тройная точка. Равновесие в гомогенной системе. Закон действующих масс.
- 8.3. Равновесие в гомогенных многокомпонентных системах. Правило фаз Гиббса.
- 8.4. Фазовые переходы первого рода, уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовые переходы второго рода, уравнение Эренфеста, теория Ландау.
- 8.5. Критические и закритические явления, критическая точка. Закон соответственных состояний и термодинамическое подобие.

## **Раздел 9. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЦИКЛЫ**

- 9.1. Основные термодинамические процессы и их уравнения, изменение термодинамических функций, теплоты и работы. Исследование диаграмм для расчета процессов. Эффект Джоуля-Томсона.
- 9.2. Силовые термодинамические циклы. Влияние параметров циклов на их термический КПД. Паросиловой цикл Ренкина. Циклы холодильной машины и теплового насоса.

## **Раздел 10. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФЛУКТУАЦИЙ**

- 10.1. Распределение Гаусса. Флуктуации термодинамических величин.
- 10.2. Формула Пуассона. Корреляция флуктуаций. Броуновское движение.
- 10.3. Уравнения Ланже-вена и Фоккера-Планка. Основное кинетическое уравнение для коррелятивных функций.

## **Раздел 11. МЕТОД КОРРЕЛЯТИВНЫХ ФУНКЦИЙ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ**

- 11.1. Реакция системы на внешнее динамическое возмущение. Реакция системы на термическое возмущение.
- 11.2. Условия локального равновесия. Локальная запись законов сохранения массы, импульса и энергии. Уравнение баланса энтропии.
- 11.3. Плотность производства и плотность потока энтропии. Феноменологические соотношения для плотностей потоков тепла, массы и импульса. Соотношения взаимности Онсагера.
- 11.4. Замкнутая система дифференциальных уравнений сохранения энергии, массы и импульса.

## **Раздел 12. КИНЕТИКА ГАЗОПОДОБНЫХ СИСТЕМ**

- 12.1 Уравнение Больцмана. H-теорема и закон возрастания энтропии. Уравнение переноса молекулярных признаков (массы, импульса, энергии).
- 12.2 Идеи методов Чепмена, Энскога и Грэда, вычисление кинетических коэффициентов.

### Раздел 13. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

- 13.1 Модель сплошной среды. Тензор деформации. Тензор напряжений. Термодинамика деформирования. Обобщенный закон Гука.
- 13.2 Плотность потоков массы, импульса и энергии и соответствующие уравнения сохранения.

### Раздел 14. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА МАССЫ И ИМПУЛЬСА В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

- 14.1 Перенос массы – уравнение непрерывности с источниками и стоками. Идеальная жидкость. Уравнение Эйлера. Вихревое движение. Теоремы Гельмгольца и Томсона. Потенциальное движение. Уравнение Бернулли. Парадокс Даламбера. Эффект Магнуса.
- 14.2 Вязкая жидкость. Тензор вязких напряжений. Уравнение Навье-Стокса. Диссипация кинетической энергии в вязкой жидкости. Законы подобия.
- 14.3 Устойчивость стационарного движения жидкости. Уравнение Рейнольдса для турбулентного движения. Теория турбулентности Прандтля.
- 14.4 Движение жидкости в пограничном слое. Уравнение Прандтля. Интегральное уравнение Кармана. Отрыв и турбулизация пограничного слоя. Кризис сопротивления.

### Раздел 15. ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

- 15.1 Динамика разреженного газа. Одномерный поток сжимаемого газа. Формула Сан-Венана-Венцеля. Параметры газа в критической точке. Число Маха.
- 15.2 Прямая ударная волна, ударная адиабата, косая ударная волна, ударная поляра, отсоединенная ударная волна. Изменение скоростей и термодинамические функции в ударных волнах.
- 15.3 Волна разряжения, изменение термодинамических функций и скоростей. Сопло Лаваля.
- 15.4 Взаимодействие газового потока с поверхностью. Формула Кнудсена. Режимы течения газа.
- 15.5 Основные положения теории разделения изотопов: разделительный элемент, коэффициенты разделения и обогащения. Умножение обогащения в каскаде. Идеальный каскад. Потенциал разделения и разделительная мощность. Первичный эффект разделения в поле центробежных сил. Умножение разделения в противоточной центрифуге. Решение уравнения обогащения в приближении Коэна.

### Раздел 16. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

- 16.1 Тепловой поток. Уравнение теплопроводности, краевые условия. Стационарная теплопроводность, решение задачи для простейших тел. Объемные и поверхностные источники тепла.
- 16.2 Нестационарная теплопроводность. Простейшие задачи для бесконечных и конечных областей. Нелинейная теплопроводность. Автомодельные решения. Тепловые волны. Приближенные численные методы решения.

### Раздел 17. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

- 17.1 Общие уравнения переноса тепла. Методы подобия и размерности в теории теплообмена. Критерии подобия, критериальные уравнения теплообмена.
- 17.2 Теплоотдача при свободной и вынужденной конвекции.
- 17.3 Теплообмен в ламинарном пограничном слое, трение и теплообмен при обтекании

пластины несжимаемой жидкостью. Теплообмен и трение при турбулентном обтекании плоской пластины.

## Раздел 18. ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ, КОНДЕНСАЦИИ И КИПЕНИИ

- 18.1 Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при конденсации пара из парогазовой смеси.
- 18.2 Теплообмен при кипении однокомпонентных жидкостей. Режимы кипения. Механизм процесса теплообмена при пузырьковом кипении.
- 18.3 Кризис кипячения. Механизмы теплообмена при пленочном кипении. Теплопередача при ламинарном и турбулентном движении паровой пленки.

## Раздел 19. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

- 19.1 Основные законы теплового излучения. Формула Планка. Закон Стефана-Больцмана. Закон Кирхгофа. Лучистый теплообмен между телами.
- 19.2 Угловые коэффициенты излучения.
- 19.3 Теплообмен в поглощающих и излучающих средах. Особенности излучения газов и паров. Критерий радиационного подобия.

### Вопросы для подготовки к кандидатскому экзамену

1. Развитие представлений о природе теплоты. Термодинамика – наука о формах обмена энергией. Феноменологический характер термодинамики.
2. Развитие статистических идей. Становление молекулярно-кинетической теории вещества. Вклад отечественной науки в ее формирование.
3. Термодинамическая система и окружающая среда. Термодинамическое равновесие.
4. Термодинамические параметры, функции состояния.
5. Основные постулаты. Понятие о термодинамических процессах, процессы равновесные и неравновесные.
6. Внутренняя энергия системы.
7. Основные термодинамические процессы.
8. Теплота и работа как формы обмена энергией – функции процессов. Первый закон термодинамики, его формулировки.
9. Теплоемкости.
10. Уравнение состояния термодинамических систем, термические и калорические уравнения состояния. Вириальная форма уравнений состояния, термические и калорические уравнения состояния. Уравнения Клапейрона-Менделеева и Ван-дер-Ваальса.
11. Обратимые и необратимые процессы. Формулировки второго закона термодинамики.
12. Условие взаимного превращения тепла и работы в прямом и обратном термодинамических циклах.
13. Принцип адиабатической недостижимости. Голономность пфаффовых форм.
14. Энтропия и термодинамическая температура.
15. Основные уравнения термодинамики для равновесных процессов.
16. Вычисление энтропии. Парадокс Гиббса.
17. Неравенство Клаузиуса. Изменение энтропии в неравновесных процессах. Основное термодинамическое неравенство.
18. Цикл и теоремы Карно.
19. Характеристические термодинамические функции и термодинамические потенциалы.

Внутренняя энергия как термодинамический потенциал.

20. Преобразования Лежандра. Выражения для термодинамических потенциалов в интегральной и дифференциальной формах.

21. Соотношение Максвелла. Уравнение Гиббса-Гельмгольца.

22. Тепловая теорема Нернста. Следствия тепловой теоремы: недостижимость абсолютного нуля температур, особенности поведения термических коэффициентов при низких температурах, вырождение идеального газа.

23. Динамические и статистические, феноменологические молекулярно-кинетические зависимости. Статистические ансамбли, фазовое пространство, функции распределения.

24. Теорема Лиувилля. Описание квантовых систем.

25. Микроскопическое распределение. Каноническое распределение Гиббса.

26. Статистический интеграл. Большое каноническое распределение Гиббса для систем с переменным числом частиц. Большая статистическая сумма.

27. Представление внутренней энергии и других термодинамических величин. Статистический смысл энтропии.

28. Статистический интеграл и термодинамические функции идеального газа. Распределение Максвелла-Больцмана.

29. Теорема вириала и закон распределения энергий по степеням свободы.

30. Теплоемкости одно- и многоатомных газов.

31. Статистический интеграл неидеальных газов, конфигурационный интеграл в приближении парных столкновений.

32. Уравнение состояния. Принцип тождественности элементарных частиц.

33. Принцип Паули.

34. Статистические распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака.

35. Уравнение состояния и статистика квантового идеального газа.

36. Теплоемкость кристаллов, модель Дебая.

37. Классификация термодинамических систем. Основные уравнения термодинамики для сложных систем.

38. Химический потенциал. Условия равновесия.

39. Метастабильные состояния. Равновесие и устойчивость, принцип Ле Шателье-Брауна.

40. Фазовые диаграммы чистого вещества, тройная точка. Равновесие в гомогенной системе.

41. Закон действующих масс. Равновесие в гомогенных многокомпонентных системах. Правило фаз Гиббса.

42. Фазовые переходы первого рода, уравнение Кланейрона-Клаузиуса.

43. Фазовые переходы второго рода, уравнение Эренфеста, теория Ландау.

44. Критические и закритические явления, критическая точка. Закон соответственных состояний и термодинамическое подобие.

45. Основные термодинамические процессы и их уравнения, изменение термодинамических функций, теплоты и работы.

46. Исследование диаграмм для расчета процессов. Эффект Джоуля-Томсона.

47. Силовые термодинамические циклы. Влияние параметров циклов на их термический КПД. Паросиловой цикл Ренкина. Циклы холодильной машины и теплового насоса.

48. Распределение Гаусса. Флуктуации термодинамических величин. Формула Пуассона.

49. Корреляция флуктуаций. Броуновское движение. Уравнения Ланжевена и Фоккера-Планка.

50. Основное кинетическое уравнение для коррелятивных функций.

51. Реакция системы на внешнее динамическое возмущение.

52. Реакция системы на термическое возмущение.

53. Условия локального равновесия. Локальная запись законов сохранения массы, импульса и энергии. Уравнение баланса энтропии.

54. Плотность производства и плотность потока энтропии. Феноменологические соотношения для плотностей потоков тепла, массы и импульса.
55. Соотношения взаимности Онсагера. Замкнутая система дифференциальных уравнений сохранения энергии, массы и импульса.
56. Уравнение Больцмана. H-теорема и закон возрастания энтропии.
57. Уравнение переноса молекулярных признаков (массы, импульса, энергии).
58. Идеи методов Чепмена, Энскога и Грэда, вычисление кинетических коэффициентов.
59. Модель сплошной среды. Тензор деформации. Тензор напряжений.
60. Термодинамика деформирования. Обобщенный закон Гука.
61. Плотность потоков массы, импульса и энергии и соответствующие уравнения сохранения.
62. Перенос массы – уравнение непрерывности с источниками и стоками. Идеальная жидкость. Уравнение Эйлера.
63. Вихревое движение. Теоремы Гельмгольца и Томсона. Потенциальное движение. Уравнение Бернулли. Парадокс Даламбера. Эффект Магнуса.
64. Вязкая жидкость. Тензор вязких напряжений. Уравнение Навье-Стокса. Диссипация кинетической энергии в вязкой жидкости. Законы подобия.
65. Устойчивость стационарного движения жидкости. Уравнение Рейнольдса для турбулентного движения. Теория турбулентности Прандтля.
66. Движение жидкости в пограничном слое. Уравнение Прандтля.
67. Интегральное уравнение Кармана. Отрыв и турбулизация пограничного слоя. Кризис сопротивления.
68. Динамика разреженного газа. Одномерный поток сжимаемого газа. Формула Сан-Венана-Венцеля. Параметры газа в критической точке. Число Маха.
69. Прямая ударная волна, ударная адиабата, косая ударная волна, ударная поляра, отсоединенная ударная волна. Изменение скоростей и термодинамические функции в ударных волнах.
70. Волна разряжения, изменение термодинамических функций и скоростей. Сопло Лавала.
71. Взаимодействие газового потока с поверхностью. Формула Кнудсена. Режимы течения газа.
72. Основные положения теории разделения изотопов: разделительный элемент, коэффициенты разделения и обогащения. Умножение обогащения в каскаде. Идеальный каскад. Потенциал разделения и разделительная мощность. Первичный эффект разделения в поле центробежных сил. Умножение разделения в противоточной центрифуге. Решение уравнения обогащения в приближении Коэна.
73. Тепловой поток. Уравнение теплопроводности, краевые условия.
74. Стационарная теплопроводность, решение задачи для простейших тел. Объемные и поверхностные источники тепла.
75. Нестационарная теплопроводность. Простейшие задачи для бесконечных и конечных областей.
76. Нелинейная теплопроводность. Автомодельные решения. Тепловые волны. Приближенные численные методы решения.
77. Общие уравнения переноса тепла. Методы подобия и размерности в теории теплообмена. Критерии подобия, критериальные уравнения теплообмена.
78. Теплоотдача при свободной и вынужденной конвекции.
79. Теплообмен в ламинарном пограничном слое, трение и теплообмен при обтекании пластины несжимаемой жидкостью.
80. Теплообмен и трение при турбулентном обтекании плоской пластины. Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при конденсации пара из парогазовой смеси.
81. Теплообмен при кипении однокомпонентных жидкостей. Режимы кипения.

- Механизм процесса теплообмена при пузырьковом кипении. Кризис кипячения.
82. Механизмы теплообмена при пленочном кипении. Теплопередача при ламинарном и турбулентном движении паровой пленки.
83. Основные законы теплового излучения. Формула Планка. Закон Стефана-Больцмана. Закон Кирхгофа.
84. Лучистый теплообмен между телами. Угловые коэффициенты излучения. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах.
85. Особенности излучения газов и паров. Критерий радиационного подобия.

### **Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины** **Рекомендуемая литература**

#### ***Основная:***

1. Покусаев Б.Г., Вязьмин А. В., Некрасов Д.А., Храмцов Д.П., Захаров Н. С. Нестационарный тепломассоперенос в микроструктурированных средах: Учеб. пособие. — Лань, 2024.-180 с.
2. Цирельман Н. М. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса: Учеб. пособие — Лань, 2019 - 504 с.
3. Цирельман Н. М. Конвективный тепломассоперенос. Моделирование, идентификация, интенсификация - Лань, 2018, -472 с.
4. Бухмиров В.В. Тепломассообмен – ИГЭУ, 2014, - 361 с.

#### ***Дополнительная:***

1. Y. Cengel, A. Ghajar. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, ISBN-13 978-0073398181, 2014, - 992 p.
2. Огурцов А.Н. Основы научных исследований: Учеб.-метод. пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008.
3. Пивоев В.М. Методология и методика научного исследования: Учеб.пособие. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2006.
4. Самойленко П.И. Теория и методика обучения физике. М.: Дрофа, 2010.
5. Sergey Z. SapozhnikovVladimir Yu. MityakovAndrey V. Mityakov. Heatmetry. ISBN978-3-030-40853-4, 2020 – 209 p.

#### ***Интернет-ресурсы***

1. <http://www.vargin.merphi.ru/> – образовательный портал по всем разделам физики и в частности по термодинамике и статистической физике.
2. <http://www.edu.ru/> – федеральный портал Российское образование (содержит материалы по термодинамике и статистической физике)