

**Программа кандидатского экзамена по научной специальности**  
**2.5.10 «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника,  
гидро- и пневмосистемы»**

**1. Вопросы кандидатского экзамена**

**Общетеоретические основы расчета и исследования машин и агрегатов вакуумной и компрессорной техники**

1. Основные термодинамические процессы, происходящие в машинах вакуумной и компрессорной техники.
2. Физическое обоснование основных гипотез молекулярно-кинетической теории газов. Расчет количества молекул, соударяющихся в равновесном состоянии со стенкой.
3. Основные уравнения течений несжимаемых и сжимаемых сред. Методы расчета при переменной массе газа. Установившееся и неустановившееся течение газа в трубопроводах. Методы расчета проточных элементов пневматических и вакуумных систем.
4. Режимы течения газа в трубопроводах и элементах компрессорных и вакуумных машин: турбулентный, инерционно-вязкостный, вязкостный, молекулярно-вязкостный, молекулярный. Физические принципы определения режимов течения газа. Расчет проводимости каналов при различных режимах течения.
5. Типы щелей в напорных и вакуумных машинах. Классификация протечек по их влиянию на объемные и энергетические характеристики. Методы расчета протечек через щели при ламинарном и турбулентном режимах течения газа при наличии смазки. Расчет компрессорных, вакуумных машин и пневмоагрегатов при не стационарности движения газа и колебаниях в трубопроводах.
6. Особенности различных условий массообмена в пневматических и вакуумных системах.
7. Методы расчета многоступенчатых вакуумных и компрессорных установок. Основные характеристики. Расчет оптимальных параметров и компоновки многоступенчатой вакуумной установки. Основные параметры вакуумных систем. Особенности конструкций систем низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума. Основные элементы вакуумных систем.
8. Динамика элементов пневматических и вакуумных систем. Методы совершенствования и оптимизации, критерии оценки. Минимизация и согласование силовых характеристик элементов систем. Вопросы надежности, прочности и долговечности элементов.
9. Методы расчета уплотнений валов и опор.
10. Методы экспериментального исследования элементов систем вакуумной и компрессорной техники. Расчет погрешности измерений. Измерение основных газодинамических параметров.

11. Автоматизация вакуумных и пневматических установок. Вопросы регулирования объемных и лопаточных машин.

12. Системы автоматической защиты и блокировки пневмосистем с различными типами компрессорных и вакуумных машин.

13. Основы математического моделирования элементов систем вакуумной и компрессорной техники. Основные этапы разработки модели.

### **Вакуумная техника**

14. Критерии, определяющие разрежение газа. Уравнение Больцмана. Закон Максвелла распределения молекул газа по тепловым скоростям. Средняя длина свободного пути молекул, влияние на нее различных факторов.

15. Уравнение переноса в вакууме. Вязкость, теплопроводность, диффузия. Взаимодействие частиц с поверхностью твердых тел. Коэффициенты аккомодации. Термо-молекулярное течение газов.

16. Молекулярные пучки. Пространственно-угловое распределение молекул в высоком вакууме при движении по каналам. Методы расчета проводимости элементов вакуумных систем.

17. Физическая и химическая сорбция газов. Силы и энергия связи между частицами. Коэффициент прилипания, скорость адсорбции. Особенности физических процессов криосорбции. Основные уравнения адсорбции. Моно- и полимолекулярная адсорбция. Теплота сорбции. Газопроницаемость. Растворимость газа в твердых телах. Десорбция. Газовыделение вакуумных материалов. Основные факторы, влияющие на процесс.

18. Объемные насосы. Классификация и области применения. Конструктивные схемы поршневых, роторных, ротационно-пластинчатых, жидкостно-кольцевых, пластинчато-статорных и плунжерных вакуум-насосов с масляным уплотнением. Определение коэффициента откачки и его составляющих. Влияние различных факторов на объемные характеристики насосов. Расчет теоретических индикаторных диаграмм и максимальной индикаторной мощности. Действительные характеристики. Основы математического моделирования процессов в объемных насосах.

19. Конструктивные схемы турбомолекулярных вакуум-насосов. Теоретические модели процесса переноса молекул газа межлопаточными каналами рабочих колес насоса. Их сравнительный анализ. Влияние геометрических размеров канала на основную характеристику колеса. Расчет откачных параметров рабочих колес турбомолекулярного вакуумного насоса. Методы определения оптимальных геометрических размеров проточной части насоса. Расчет откачной характеристики турбомолекулярного вакуум-насоса на заданные параметры. Оптимизация турбомолекулярного вакуум-насоса по откачным параметрам.

20. Расчетное определение характеристики насоса при молекулярно-вязкостном режиме течения газа. Материалы, применяемые для изготовления основных узлов насоса, особенности технологии их изготовления.

21. Пароструйные вакуумные насосы. Особенности механизма откачки в эжекторных, бустерных и диффузионных насосах. Расчет скорости истечения и расхода пара в дозвуковом и сверхзвуковом соплах. Метод расчета откачных параметров эжекторных вакуумных насосов. Теория процессов в диффузионных насосах в режимах предельного вакуума и обеспечения полезной быстроты откачки. Расчет многоступенчатых высоковакуумных пароструйных насосов.

22. Адсорбционные насосы. Основные характеристики сорбентов, их сравнительный анализ. Расчет необходимого количества адсорбента для обеспечения заданной откачной характеристики.

23. Криоконденсационные вакуумные насосы. Процессы конденсации на криопанели. Криозахват и криосорбция. Расчет вакуумных параметров крионасоса и тепловой нагрузки на охлаждаемые панели. Практические рекомендации по конструированию и расчету вакуумных криосистем. Особенности расчета форвакуумных крионасосов.

24. Магнитно-разрядные вакуум-насосы. Газовый разряд при низких давлениях. Разряд в приборах с горячим катодом. Виды ионной откачки газов. Геометрия ячейки. Критический режим работы ячейки насоса. Уравнение для определения тока разряда ячейки. Метод расчета откачных параметров магнитно-разрядного вакуум-насоса. Оптимизация магнитноразрядных вакуум-насосов по откачным параметрам.

25. Ионно-геттерные вакуумные насосы. Виды испарителей. Расчет параметров испарительных титановых насосов. Особенности конструктивных схем ионно-геттерные вакуумные насосов.

26. Расчет многоступенчатых низковакуумных установок по размерным и безразмерным параметрам с оптимизацией по весовым, объемным и энергетическим параметрам. Расчет характеристики установки, вопросы регулирования основных параметров.

27. Работа, затрачиваемая при откачке, КПД установки. Расчет теоретической индикаторной работы откачки.

28. Расчет высоковакуумной многоступенчатой установки. Схемы высоковакуумных и сверхвысоковакуумных систем откачки. Расчет времени откачки из замкнутого объема с учетом внутренних газовыделений, натеканий и сопротивления соединительных коммуникаций.

29. Определение эффективной быстроты откачки и давления газа в установке и выбор откачной системы.

30. Имитационные вакуумные установки.

31. Технологические вакуумные системы. Конструкции вакуумных напылительных установок. Влияние вида вакуумной откачной системы на процесс напыления, практические рекомендации.

32. Вакуумные камеры и трубопроводы. Расчет на прочность.

33. Особенности конструкций элементов в системах низкого, высокого и сверхвысокого вакуума. Виды разъемных и неразъемных соединений. Вакуумные уплотнители.

34. Запорная арматура. Виды вакуумных клапанов, затворов. Вакуумные натекатели.

35. Вакуумные ловушки. Классификация. Основные характеристики. Расчет охлаждаемых ловушек.

36. Вакуумные вводы. Сравнительные характеристики.

37. Классификация вакуумных манометров для измерения давления газа. Принцип их действия. Расчет градуировочной кривой теплоэлектрических манометрических преобразователей. Определение постоянной ионизационного манометра.

38. Особенности измерения сверхвысокого вакуума. Практические рекомендации по эксплуатации преобразователей. Влияние рода газа. Методы автоматического регулирования откачных параметров вакуумных систем с помощью манометрических датчиков.

39. Измерение парциальных давлений. Классификация приборов, принцип их действия. Диапазон применимости различных методов измерения парциальных давлений, их сравнительная характеристика.

40. Оценка точности измерения давлений. Практические рекомендации по выбору метода измерения и расположения датчиков в вакуумной системе.

41. Методы экспериментального определения откачных параметров различных средств откачки, их сравнительный анализ, область применения. Оценка погрешности измерений.

42. Течеискание. Классификация методов течеискания. Требования, предъявляемые к различным вакуумно-плотным соединениям.

43. Классификация приборов для определения негерметичности, принцип их действия, область применения. Сравнительная характеристика различных течеискателей. Рекомендации по выбору метода определения течей и натеканий. Испытание откачных устройств и элементов вакуум-систем в замкнутом контуре.

### **Компрессорная техника**

44. Идеальный и действительный объемные компрессоры. Влияние мертвого пространства, потерь давления, теплообмена, несовершенства изготовления и износа компрессора на объемные потери. Коэффициент подачи компрессора. Метод определения производительности. Индикаторная диаграмма действительного одноступенчатого компрессора. Индикаторная мощность. Мощность трения. Особенности газодинамических и термодинамических явлений в объемных компрессорах.

45. Процессы теплообмена в объемных компрессорах.

46. Теоретический многоступенчатый компрессор. Действительный многоступенчатый компрессор.

47. Работа, затраченная в компрессоре для сжатия реального газа. Объемный коэффициент и мощность компрессора, сжимающего реальный газ.

48. Уравновешивание инерционных сил в компрессорах.

49. Способы изменения производительности поршневых компрессоров. Особенности рабочих процессов при регулировании производительности многоступенчатых компрессоров. Особенности изменения производительности компрессоров.

50. Природа пульсирующих потоков в трубопроводах поршневых компрессоров. Волновые и инерционные явления. Способы гашения пульсаций давления. Расчет ресиверов-успокоителей.

51. Особенности рабочих циклов и процессов в различных типах роторных компрессоров. Теоретические и расчетные индикаторные диаграммы. Действительные индикаторные диаграммы различных типов роторных компрессоров. Особенности определения энергетических характеристик.

52. Особенности расчета роторных вакуум-компрессоров.

53. Теоретическое профилирование роторов и корпусов роторных компрессоров.

54. Особенности работы роторных вакуум-компрессоров при откачке паров жидкостей.

55. Рабочий процесс и гидродинамика течения жидкости в жидкостно-кольцевом компрессоре и вакуум-насосе. Определение формы жидкостного кольца.

56. Современные методы повышения эффективности роторных компрессоров и вакуум-насосов различных типов.

57. Рабочие процессы в ступени центробежных компрессоров и нагнетателей. Основные уравнения газодинамики для ступени центробежного компрессора. Анализ основных коэффициентов и параметров ступени. Потери в ступени. КПД ступени и элементов ступени.

58. Особенности процесса сжатия в многоступенчатых центробежных машинах. Характеристики многоступенчатых центробежных компрессорных машин. Теплообмен в турбокомпрессоре. Методы расчета центробежных компрессорных машин.

59. Методы расчета центробежных вентиляторов. Характеристики вентиляторов.

60. Газодинамические основы теории осевого компрессора. Основные газодинамические уравнения движения воздуха в компрессоре. Безразмерные параметры: коэффициент напора, коэффициент расхода. Течение газа в плоских решетках. Основные параметры, КПД решетки, обтекание профиля, силы, действующие на профиль. Основное аэродинамическое уравнение для расчета элементарной ступени.

61. Ступень осевого компрессора. Принципы профилирования ступени (по закону постоянства циркуляции, степени реакции и с переменным напором по радиусу). Влияние различных факторов (сжимаемости, числа Маха, вязкости, числа Рейнольдса) на КПД и напор ступени. Сверхзвуковые ступени.

62. Многоступенчатые осевые компрессоры. Типы проточной части компрессора. Распределение КПД, степени реактивности напора и осевых скоростей по ступеням. Методы расчета осевых компрессоров.

63. Характеристики осевого компрессора. Физические основы и методы построения и расчета характеристик компрессора. Регулирование осевых компрессоров.

64. Работа осевого компрессора в режиме вакуум-насоса. Теоретические исследования возможности работы осевого компрессора в режиме низкого вакуума. Теоретические и экспериментальные исследования работы осевого компрессора в режиме глубокого вакуума.

65. Вихревые компрессоры и вакуум-насосы. Теория и расчет рабочего процесса вихревых машин.

66. Основные уравнения для расчета оптимальных параметров компрессорных станций. Расчет параметров и выбор компрессорного оборудования. Основные методы расчета вспомогательного оборудования компрессорных станций.

### **Пневмоагрегаты вакуумной и компрессорной техники**

67. Основные закономерности статического и динамического расчета движения элементов конструкций пневмоагрегатов.

68. Особенности течения газа через различные виды сопротивлений в пневмоагрегатах.

69. Анализ влияния различных видов трения на рабочие характеристики пневмоагрегатов и исполнительных устройств.

70. Методы конструирования пневмоагрегатов. Критерии оценки.

71. Регулирующие и перекрывающие исполнительные устройства. Пневмоинструмент. Методы конструирования, расчета, испытания и оценки совершенства исполнительных устройств. Особенности статического и динамического расчета пневматических исполнительных устройств.

72. Методы конструирования, расчета и испытания уплотнений исполнительных устройств.

73. Пневматические приводы. Методы конструирования, расчета и испытания.

74. Элементы непрерывного и дискретного действия. Усилительные, преобразующие и логические элементы пневмоавтоматики. Методы конструирования, расчета и испытания элементов пневмоавтоматики.

75. Основные методы расчета и конструирования пневматических систем.

76. Испытания пневмоагрегатов.

77. Основные типы испытаний пневмоагрегатов. Статические и динамические измерения параметров пневмоагрегатов. Методы измерения газодинамических, термодинамических, тепловых и механических параметров пневмоагрегатов.

78. Основные типы датчиков для замера параметров пневмоагрегатов. Параметры датчиков. Чувствительность и инерционность датчиков.

## 2. Учебно-методическое и информационное обеспечение

### 2.1. Литература

- Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.1. Инженерно-физические основы: учебное пособие / М.Х. Хаблянян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. – 232 с.
- Бурмистров А.В. Бесконтактные вакуумные насосы: учеб. пособие / Казан. гос. технол. ун-т. — Казань, 2010. — 102 с.
- Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. - 590 с., ил.
- Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высш. шк., 2007. - 392 с.
- Теоретические основы вакуумной техники: Учебное пособие Демихов К.Е., Никулин Н.К., Калинин Д.А.. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 64 с.
- Палладий А.В. Газовая динамика в турбокомпрессорах : учеб. пособие / А.В. Палладий; Казан. гос. технол. ун-т. — Казань, 2010. — 90, [2] с.
- Техника измерения вакуума. Аляев В.А., Кузьмин В.В. Казань, Изд-во КГТУ, 2009.-374 с.
- Вакуумные системы: учебное пособие / Демихов К.Е., Никулин Н.К. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 76 с.
- Эрастов В.Е. Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие / В.Е. Эрастов. – М.: ФОРУМ, 2010. – 208 с.
- Роторные вакуумные насосы [Методические пособия] : метод. указ. к лаб. работам / Казан. гос. технол. ун-т ; сост. А.В. Бурмистров. — Казань : Изд-во КГТУ, 2004. — 61 с. : ил. — Библиогр.: с.40 (9 назв.).
- Роторные вакуумные насосы [Методические пособия] : метод. указ. к лабор. работам / Казан. гос. технол. ун-т ; сост. С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров. — Казань, 2007. — 44 с. : ил., табл. — Библиогр.: с.35 (8 назв.).
- Рукавишников, В.А. Введение в систему автоматизированного проектирования Solid Edge: учеб. пособие / Казан. гос. технол. ун-т. — Казань, 2008. — 132 с.
- Фомина М.Г. Испытания вакуумного оборудования: учеб. пособие / М.Г. Фомина; Казан. гос. технол. ун-т. — Казань, 2006-136 с.
- Бурмистров, А.В. Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах : монография / Казан. гос. технол. ун-т. — Казань, 2009. — 232 с.
- Методы расчета сложных вакуумных систем/ С.Б. Нестеров, А.В. Бурмистров и др. М.: ОМР.ПРИНТ, 2010. - 370 с.

- Демихов К.Е. Вакуумные системы : учебное пособие / Демихов К.Е., Никулин Н.К. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 76 с.
- Райков, А.А. Рабочий процесс безмасляного кулачково-зубчатого вакуумного насоса. Монография / А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров // Казань: Издательство КНИТУ, 2013. - 184 с.
- Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.1. Инженерно-физические основы: учебное пособие / М.Х. Хаблянян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. – 232с.
- Система автоматизированного проектирования ППП "WinMachine". Моделирование и расчет трехмерных конструкций в программе "WinStructure3D": метод. пособие / Казан. гос. технол. ун-т ; сост. Д.Г. Тукманов, Н.Н. Зиятдинов, А.А. Хоменко, А.Р. Бикмурзин. - Казань, 2006 .-101.
- Роторные вакуумные насосы: методические указания к лабораторным работам / сост. А.В. Бурмистров; Казан. гос. технол. ун-т. - Казань, 2007. – 61 с.
- Бурмистров А.В. Бесконтактные вакуумные насосы: учеб. пособие / А.В. Бурмистров; Казан. гос. технол. ун-т .— Казань, 2010 .— 102 с.
- Еременко Л.Г. Работа с программным комплексом ANSYS : учеб. пособие / Л.Г. Еременко ; Донской гос. техн. ун-т.- Ростов-на-Дону, 2012 .- 72 с.
- Кузнецов П.Н. Лабораторный практикум по дисциплине "Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования" / П.Н. Кузнецов, М.М. Мишин. — Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2008. — 152 с.
- Ситников А.В. Физические основы вакуумной техники:: учеб. пособие /А.В. Ситников; Воронежский гос. техн. ун-т.— Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2011 .— 81 с.
- Лаптев А.Г. Компьютерная графика и основы автоматизированного проектирования: учеб. пособие / А.Г. Лаптев; Казан. гос. технол. ун-т. - Казань, 2000 -108 с.
- Панфилович К.Б. Теоретические основы вакуумной техники: учебное пособие/ К.Б. Панфилович, П.И. Бударин, А. Х. Садыков. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та; Казань, 2009. 150 с.



## 2.2. Программное обеспечение и Интернет-ресурсы

Современные профессиональные базы данных (в том числе международные реферативные базы данных научных изданий) и информационные справочные системы:

1. Российский информационный портал в области науки, технологии, медицины и образования eLIBRARY.RU: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
2. Реферативная база данных журналов и конференций Web of Science: [www.apps.webofknowledge.com](http://www.apps.webofknowledge.com)
3. Издательство «Springer»: [www.link.springer.com](http://www.link.springer.com)
4. Единая база данных Scopus: [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
5. Научная электронная библиотека КиберЛенинка: <https://cyberleninka.ru>

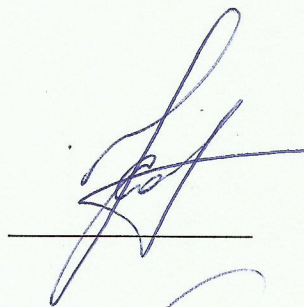
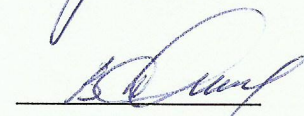
Рекомендуется использовать лицензированное свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Офисные и деловые программы: MS Office 2007 Russian
2. Офисные и деловые программы: MS Office 2007 Professional Russian
3. Офисные и деловые программы: MS Office 2010-2016 Standart
4. Архиватор 7 Zip
5. Блокнот Notepad
6. Яндекс Браузер

Разработчик программы:

Ст. преп. каф. ВТЭУ

Зав. каф. ВТЭУ, проф.

Косенков Д.В.

Аляев В.А.