

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»  
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

Кафедра А9 «Плазмогазодинамика и теплотехника»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР и ИР

БГТУ «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова

С.А. Матвеев

2022 г.



**ПРОГРАММА**  
**вступительного экзамена в аспирантуру**  
**по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы**

---

Санкт-Петербург

2022 г.

Программа содержит перечень вопросов по основным разделам образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантуры), из которых составляются экзаменационные билеты и которые ставятся перед поступающим в ходе экзамена. Состав вопросов достаточен для того, чтобы комиссия установила уровень подготовки, понимание основных положений механики жидкости, газа и плазмы.

## ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ

1. Предмет МЖГ. Газ с точки зрения молекулярных представлений (характерные размеры молекул, атомов, ядер и электронов, их масс, расстояний между молекулами, средней длины свободного пробега молекул). Введение физически бесконечно малого объема в газе (его определение, понятие характерного линейного размера течения, число Кнудсена). Гипотеза сплошности и другие основные постулаты МЖГ.

2. Индивидуальная и локальная производные от газодинамических параметров по времени. Скорость объемного расширения жидкости (определение, вычисление).

3. Понятие жидкого объема. Вывод формул для вычисления производной по времени от интеграла по жидкому объему.

4. Закон сохранения массы (допущения, физическая формулировка, вывод уравнения закона в интегральной форме. Уравнение неразрывности (вывод, рассмотрение частных случаев).

5. Объемные и поверхностные силы в сплошной среде (определение плотности объемных и массовых сил и ее вычисление в случае действия сил тяжести, определение напряжений, вычисление главных векторов объемных и поверхностных сил). Закон изменения количества движения для движущегося жидкого объема (физическая формулировка, интегральная форма записи).

6. Формула Коши (вывод). Тензор напряжений (запись формулы Коши в терминах понятий линейной алгебры, введение линейного оператора  $\|\pi_{ik}\|$  и его физический смысл, определение тензора напряжений).

7. Уравнения динамики сплошной среды в напряжениях (вывод).

8. Орбитальный и внутренний моменты в жидкостях и газах (физический смысл, определение). Вычисление главного момента внешних сил, приложенных к жидкому объему. Закон изменения момента количества движения для жидкого объема (физическая формулировка, уравнение закона в интегральной форме).

9. Доказательство симметрии тензора напряжений в жидкости (газе) без внутренних моментов.

10. Внутренняя, кинетическая и полная энергия жидкости и газа (физический смысл, вычисление). Физические причины изменения полной энергии в движущемся жидком объеме и их математическое описание. Закон изменения полной энергии в движущейся жидкости (газе) (физическая формулировка, интегральная форма записи).

11. Уравнения изменения отдельно внутренней и отдельно кинетической энергии (вывод уравнений в интегральной и дифференциальной формах).

12. Вектор  $\vec{\Omega} = \text{rot } \vec{v}$  и его компоненты в декартовых координатах. Связь  $\vec{\Omega}$  с угловой скоростью вращения жидкой частицы.

13. Поле скоростей сплошной среды в окрестности точки. Теорема Гельмгольца (вывод формулы для  $\vec{v}(\vec{r} + d\vec{r})$ ).



14. Скорость материальной точки  $N$  относительно бесконечно близкой точки  $M$  в деформационном движении среды (формула для  $\vec{v}_{Def}$ ). Тензор скоростей деформаций (определение, выражения для компонент и их физический смысл, линейный инвариант).

15. Модель вязкой ньютоновской жидкости (газа) (определение, свойства, происхождение, физический смысл коэффициентов в выражении тензора напряжений через тензор скоростей деформаций).

16. Выражения для компонент тензора напряжений в вязкой ньютоновской среде (в сжимаемом газе и несжимаемой жидкости). Тензор вязких напряжений (выражения его диагональных и недиагональных компонент через компоненты тензора скоростей деформаций). Коэффициент динамической вязкости (размерность, зависимость от температуры для газов и жидкостей).

17. Модель идеальной жидкости (газа) (определение, выражения для компонент тензора напряжений, уравнения количества движения и энергии).

18. Вектор плотности потока тепла (определение, физические причины теплопроводности в жидкостях и газах). Закон Фурье (математическое выражение, размерность коэффициента теплопроводности и его зависимость от температуры для газов и жидкостей).

19. Термодинамическая модель среды. Калорическое и термическое уравнения состояния. Совершенный газ. Несжимаемая жидкость.

20. Замкнутая система уравнений и постановка задач в гидромеханике вязкого теплопроводного сжимаемого газа (исходные уравнения, искомые функции, известные константы и зависимости, граничные условия для установившихся течений).

21. Замкнутая система уравнений и постановка задач в гидромеханике вязкой теплопроводной несжимаемой жидкости (допущения, преобразование уравнений количества движения и энергии, введение диссипативной функции и ее физический смысл, искомые функции, известные константы и зависимости, граничные условия для установившихся течений).

22. Замкнутая система уравнений и постановка задач в гидромеханике идеальной нетеплопроводной среды (получение из “вязких” уравнений систем для сжимаемого газа и несжимаемой жидкости, искомые функции, граничные условия для установившихся течений).

23. Интеграл адиабаты (определение адиабатического течения, допущения и вывод уравнения адиабаты в общем случае, свойство баротропности).

24. Адиабата Пуассона для совершенного газа (вывод из общего уравнения адиабаты). Адиабата для несжимаемой жидкости (вывод).

25. Интеграл Бернулли (допущения, вывод для общего случая).

26. Уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости в поле сил тяжести (получение уравнения, физическая интерпретация слагаемых). Истечение жидкости из сосуда через малое отверстие (задача Торичелли).

27. Уравнение Бернулли для совершенного газа (получение уравнения из общего интеграла Бернулли, переход к различным формам записи уравнения: через энтальпию, внутреннюю энергию, температуру). Уравнение Бернулли для несжимаемого газа (сравнение со случаем совершенного газа). Определение скорости потока несжимаемого газа с помощью трубки Пито–Прандтля.

28. Скорость звука (определение, вывод формул для скорости звука). Переход в уравнении Бернулли к скорости звука. Критическая скорость звука (определение, вывод соотношения между  $a_*$  и  $a_0$ ). Число Маха  $M$  и коэффициент скорости  $M_*$  (определения, вывод соотношения между этими величинами).

29. Формулы изэнтропического течения (вывод формул  $\tau(M)$ ,  $\varepsilon(M)$  и  $\pi(M)$ ). Оценка влияния сжимаемости газа при расчете давления торможения  $p_0$ .
30. Обобщенные одномерные установившиеся движения (определение и основные соотношения). Задача о течении идеального несжимаемого газа в трубе переменного сечения (система уравнений, исходные и искомые параметры, схема решения).
31. Анализ течения совершенного газа в трубе переменного сечения. (исходная система соотношений, вывод уравнения, связывающего изменение скорости с изменением площади поперечного сечения трубы, и соотношений между дифференциалами газодинамических параметров, рассмотрение типичных ситуаций).
32. Течение газа в сопле Лаваля: расчетный и нерасчетный режимы. Функция приведенного расхода (вывод зависимости  $q(M)$ , ее график, определение геометрического числа Маха сверхзвукового сопла).
33. Сильные и слабые газодинамические разрывы (определения). Условия динамической совместности (УДС) на сильных разрывах (вывод УДС в общем случае). УДС на тангенциальном разрыве.
34. Условия динамической совместности на скачках уплотнения. Интенсивность скачка уплотнения (определение). Изменение энтропии на скачке уплотнения и ее связь с коэффициентом потерь полного давления (вывод формулы).
35. Ударная адиабата – адиабата Рэнкина–Гюгонио (вывод уравнения адиабаты, сравнение с адиабатой Пуассона, теорема Цемплена).
36. Соотношения на прямом и косом скачке уплотнения для давления, плотности и температуры (вывод соотношений, графики зависимостей, область физической реализуемости, пределы изменения, угол Маха).
37. Формула Прандтля для прямого скачка уплотнения (вывод формулы  $M_{1*} \cdot M_{2*} = 1$ ).
38. Число Маха за косым скачком уплотнения (вывод зависимости  $M_2$  от  $M_1$  и  $\sigma$ ).
39. Число Маха за прямым скачком уплотнения (“формула пяти единиц”).
40. Изменение функции  $q(M)$  на прямом скачке уплотнения.
41. Связь между углом наклона скачка уплотнения и отклонением вектора скорости газа (вывод зависимости  $\beta(\sigma)$  и ее анализ, предельный угол разворота потока на скачке уплотнения).
42. Трубка Пито и трубка Пито–Прандтля в сверхзвуковом потоке. Оценка температуры торможения газа при обтекании затупленного тела с большой сверхзвуковой скоростью.
43. Понятие пограничного слоя. Основные допущения и вывод уравнений динамического пограничного слоя для установившегося плоского течения несжимаемого газа. Оценка толщины пограничного слоя в терминах числа Рейнольдса  $Re_\infty$ .
44. Основные допущения и вывод уравнения теплового пограничного слоя для установившегося плоского течения несжимаемого газ. Условия, когда можно пренебречь диссипативной функцией.
45. Постановка задачи о расчете пограничного слоя на продольно обтекаемой плоской пластине (формулировка задачи Блазиуса). Переход к безразмерным переменным.
46. Введение переменной  $\eta = y\sqrt{V_\infty / (\nu x)}$ . Формулировка задачи Блазиуса в терминах безразмерной функции тока  $f(\eta)$ . Вид решения и оценка толщины пограничного слоя  $\delta(x)$  в задаче Блазиуса.



47. Расчет напряжения трения  $\tau_w$  на продольно обтекаемой пластине. Коэффициент местного трения  $c_f$  (определение, вычисление, зависимость от  $x$ ). Сопротивление трения продольно обтекаемой пластины конечных размеров. Закон Блазиуса для коэффициента сопротивления пластины конечного размера  $C_f$ .

48. Приведение уравнений плоского безвихревого течения сжимаемого газа к каноническому виду  $\partial U/\partial x + A \partial U/\partial y = B$ .

49. Определение собственных значений и соответствующих им левых собственных векторов матрицы  $A$ . Условие существования вещественных собственных значений.

50. Основная идея сведения системы уравнений  $\partial U/\partial x + A \partial U/\partial y = B$  в случае вещественных собственных значений матрицы  $A$  к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Понятие характеристик. Уравнения характеристик и условия на них.

51. Характеристики уравнений плоского безвихревого течения сжимаемого газа и условия на них в дифференциальной форме в переменных  $(u, v)$

52. Характеристики уравнений плоского безвихревого течения сжимаемого газа и условия на них в дифференциальной форме в переменных  $(V, \theta)$ .

53. Интегрирование условий на характеристиках. Функция Прандтля–Майера.

54. Решение элементарных подзадач в методе характеристик и схемы расчета основных типов задач (задача Коши, задача Гурса, обтекание твердой стенки, течение около свободной поверхности).

55. Течение Прандтля–Майера: общая теория (определение, свойства).

56. Решение задачи об обтекании выпуклой поверхности равномерным сверхзвуковым потоком.

57. Решение задачи об обтекании выпуклого двугранного угла равномерным сверхзвуковым потоком. Предельный угол разворота потока.

58. Плоские безвихревые установившиеся течения идеальной несжимаемой жидкости: система уравнений; постановка задачи обтекания тела в терминах потенциала скоростей (задача Неймана), условие существования потенциала скоростей.

59. Функции тока, ее свойства, постановка задачи обтекания тела в терминах функции тока (задача Дирихле).

60. Комплексный потенциал и комплексная скорость в теории плоских установившихся течений идеальной несжимаемой жидкости. Примеры комплексных потенциалов простейших течений (однородный поступательный поток, точечный вихрь, определение циркуляции скорости).

61. Комплексный потенциал течения от источника/стока. Диполь: определение, вывод комплексного потенциала, картина линий тока.

62. Поперечное обтекание кругового цилиндра потоком несжимаемой идеальной жидкости: описание задачи, нахождение комплексного потенциала в общем случае.

63. Комплексный потенциал и картина течения при движении цилиндра в покоящейся жидкости.

64. Бесциркуляционное и циркуляционное обтекание неподвижного кругового цилиндра однородным потоком несжимаемой жидкости. Нахождение критических точек.

65. Главный вектор сил, действующих на цилиндр. Выражение для подъемной силы. Парадокс д'Аламбера.

66. Метод конформных отображений. Обтекание эллиптического цилиндра.

67. Постулат Чаплыгина–Жуковского для профиля с острой задней кромкой.
68. Вычисление циркуляции для профиля с острой задней кромкой при выполнении постулата Чаплыгина–Жуковского.
69. Формулы Чаплыгина–Блазиуса для главного вектора и главного момента сил давления, действующих на профиль.
70. Теорема Жуковского о подъемной силе.
71. Решение задачи о безотрывном обтекании плоской пластинки под углом атаки. Парадокс передней острой кромки.
72. Профили Жуковского, их построение и свойства.
73. Решение задачи об обтекании профилей Жуковского.
74. Коэффициент подъемной силы для тонкого слабоизогнутого профиля Жуковского под малым углом атаки. Коэффициент давления. Сравнение теории с опытом.

#### СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I, II. М.: Физматлит, 1963.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. I, II. 5-е изд. М.: Наука, 1994.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд. М.: Наука, 1987.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. 3-е изд. М.: Наука, 1986.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. 5-е изд. М.: Наука, 1978.
6. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988.
7. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. РХД, 2000.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.