

15

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук**



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИТИМ СО РАН  
чл.-корр. РАН

*А.Н. Шиплюк*  
А.Н. Шиплюк

« 24 » 09 2018 г.

**ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА СТАЦИОНАРНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Рабочая программа дисциплины

Направление подготовки аспирантов Института 01.06.01 – «Математика и механика»,

Направленность: 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Квалификация выпускника**

Исследователь. Преподаватель - исследователь.

**Форма обучения - очная**

Новосибирск 2018

## Содержание

Аннотация	3
1. Цели освоения дисциплины	4
2. Место дисциплины в структуре ООП	4
3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины	4
4. Структура и содержание дисциплины	5
5. Образовательные технологии	6
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов	6
7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания	6
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	7
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины	7
10. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы аспирантов	8
11. Банк контролирующих материалов	10

## Аннотация

Программа курса «Газовая динамика стационарных и нестационарных процессов» составлена в соответствии с требованиями Федеральных государственных образовательных стандартов по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.06.01 «математика и механика».

Цель курса – дать основные понятия и подходы к решению задач дозвуковой и сверхзвуковой аэро-газодинамики, дать практические навыки выполнения качественных и количественных оценок параметров основных газодинамических течений, научить разбираться в физике явлений газовой динамики.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, консультации, самостоятельная работа аспиранта, зачет.

Система контроля включает текущий (по ходу семестра) контроль освоения практического материала, а также зачет.

Текущий контроль по практике осуществляется в ходе семестра путем проведения контрольных работ и приема обязательных заданий.

Окончательная оценка работы аспиранта в течение семестра происходит на зачете.

Зачет проводится в конце семестра по билетам, в устной форме.

Общая трудоемкость курса составляет 2 зачетных единицы, 72 академических часа

- Занятия семинарского типа – 4 часа.
- Занятия лекционного типа – 26 часов.
- Самостоятельная работа обучающегося в течение семестра – 24 часа.
- Промежуточная аттестация (подготовка к сдаче зачета и зачет) – 18 часов.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, семинарского типа, групповые консультации, зачет) составляет 34 часа.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (период сессии) (в часах)	
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем (консультации, зачет)
		Лекции	Семинары	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8
	72	26	4		24	14	4
Всего 72 часа/2 зачетных единицы из них: - контактная работа 34 часа							



## 1. Цели освоения дисциплины

Дисциплина «Газовая динамика стационарных и нестационарных процессов» имеет своей целью: дать основные понятия и подходы к решению задач дозвуковой и сверхзвуковой аэрогазодинамики, дать практические навыки выполнения качественных и количественных оценок параметров основных газодинамических течений, научить разбираться в физике явлений газовой динамики.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПП

Данная дисциплина относится к группе вариативных дисциплин Блока 1 направления подготовки аспирантов Института - 01.06.01 - "Математика и механика" в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) по направленности - механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические, технические науки).

В результате изучения курса аспиранты Института должны усвоить основы теории газодинамических процессов при дозвуковых и сверхзвуковых течениях, а также у них должно сформироваться умение применять математические методы для решения физических задач; умение использовать в познавательной и профессиональной деятельности базовые знания в области математики; умение приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии.

## 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины «Газовая динамика стационарных и нестационарных процессов»

В результате освоения дисциплины должны быть сформированы следующие компетенции:

способность свободно владеть фундаментальными разделами математики и механики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач механики жидкости, газа и плазмы (ПК-1);

способность использовать знания современных проблем и новейших достижений механики жидкости газа и плазмы в своей научно-исследовательской деятельности (ПК-2);

способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области механики жидкости, газа и плазмы, а также решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования, информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-3).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** основы теории газодинамических процессов при дозвуковых и сверхзвуковых течениях.
- **Владеть:** современными методами и подходами в исследовании газодинамических процессов.
- **Уметь:** применять математические методы для решения физических задач; использовать в познавательной и профессиональной деятельности базовые знания в области математики; приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии.

#### 4. Структура и содержание дисциплины «Газовая динамика стационарных и нестационарных процессов»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов, и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (период сессии) (в часах)	
			Всего	Аудиторные часы				Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)
				Лекции и	Семинары	Лабораторные работы		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Стационарные сверхзвуковые течения	1-4	10	6			4	
2.	Нестационарные течения газа. Инварианты Римана.	5-8	10	6			4	
3.	Течения в волнах сжатия и разрежения. Возникновение ударных волн.	9	6	4			2	
4.	Прямые ударные волны. Взаимодействие скачков.	10	4	2			2	
5.	Косые ударные волны. Методы управления обтеканием за счет изменения ударно-волновой структуры.	11	6	2			4	
6.	Взаимодействие скачков, взаимодействие со стенками и свободными границами	12	6	2			4	
7.	Взаимодействие малых возмущений с ударной волной.	13	4	2			2	
8.	Линейные теории дозвукового и сверхзвукового обтекания. Гиперзвуковые приближения. Реальные свойства газов.	14	6	2	2		2	
9.	Прием заданий	15	2		2			
10.	Самостоятельная подготовка обучающегося к зачету		14					14
11.	Групповая консультация		2					2
12.	Зачет		2					2
13.	Всего за семестр		72	26	4		24	18



## **5. Образовательные технологии**

Дисциплина «Газовая динамика стационарных и нестационарных процессов» читается классическим способом: проводятся потоковые лекции, а также семинарские занятия. Все семинарские занятия проводятся в интерактивной форме. Обсуждаются идеи и способы решения поставленных задач, оптимальность предложенных решений. Важнейшим элементом технологии является самостоятельное решение аспирантами и сдача домашних заданий. Это единственная полностью индивидуальная форма обучения. Сдача заданий в устной форме преподавателю направлена на формирование коммуникативных навыков, умения объяснять, логически излагать решение, быстро отвечать на вопросы преподавателя. Аспирант рассказывает свое решение преподавателю, отвечает на дополнительные вопросы на ту же тему. Существенным элементом образовательной технологии является способность доходчиво донести методику и результат решения задачи до всей аудитории, умение ответить на вопросы.

Критерий оценивания компетенций складывается из трех сумм: количество баллов, заработанных аспирантом в семестре, количество баллов, полученных за ответ на билет, количество баллов, полученных за решение качественных задач на зачете.

## **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов.**

1. Маслов А. А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Введение в динамику вязкого газа. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.
2. Маслов А. А., Миронов С.Г. Динамика вязкого газа в примерах и задачах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.

## **7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания**

Освоение компетенций оценивается по двухбалльной шкале «сформирована / не сформирована». Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции сформированы в полном объеме в части, относящейся к содержанию дисциплины.

### **Контролирующие материалы**

Формы контроля

**Итоговый контроль.** Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен зачет.

**Текущий контроль.** Осуществляется контроль посещения лекций. Предусмотрено проведение коллоквиума, который проводится в середине семестра. Часть времени на лекциях отводится обсуждению с аспирантами практических задач.

Для оценки достижений аспирантов в ходе изучения дисциплины применяется балльно-рейтинговая система. Рейтинг определяется как сумма оценки его деятельности в течение семестра и оценки, полученной на зачете.

Максимальное количество баллов, которое может набрать аспирант - 100. Максимальный балл проставляется за качественное и своевременное выполнение работ по всем видам деятельности.

## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **а) Основная литература:**

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука. 1976.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Физматлит. 1973.

### **б) Дополнительная литература:**

1. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986.
2. Маслов А. А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Введение в динамику вязкого газа. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.
3. Маслов А. А., Миронов С.Г. Динамика вязкого газа в примерах и задачах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.

### **в) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы ИТПМ.**

## **9. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Компьютеры, видеопроекторы.

Действующие аэродинамические трубы ИТПМ СО РАН Т-327, Т-325, Т-324, Т-326, Т-313, АТ-303, ИТ-302, модели летательных аппаратов и их элементов.

Плакаты.

Видео-презентации.

## **10. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы аспирантов**

1. Маслов А. А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Введение в динамику вязкого газа. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010, -168с.
2. Маслов А. А., Миронов С.Г. Динамика вязкого газа в примерах и задачах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010, -76с.
3. Осватич К., Шварценбергер Р. Сборник задач и упражнений по газовой динамике. М.: Изд-во Мир. 1967.
4. Давидсон В.Е. Основы газовой динамики в задачах. М.: Высшая школа. 1965.



**Список задач для самостоятельной домашней работы аспирантов по отдельным разделам курса:**

**Задание 1**

1. На чашках весов установлены два одинаковых цилиндрических сосуда с одним и тем же количеством воды. В какой-то момент времени внизу одного из сосудов образуется кольцевая щель, через которую вода начинается выливаться симметрично относительно продольной оси сосуда, не касаясь чашек весов. Качественно показать движения весов.
2. В поверхность жидкости плотностью  $\rho$  под внешним давлением  $P_0$ , в поле тяжести с ускорением  $g$  входит вихревая линия с циркуляцией  $\Gamma$ . Найти форму воронки в жидкости.
3. Водяные часы «клепсидры» имеют форму вертикального сужающегося цилиндрического сосуда с отверстием площадью  $s$  внизу. Найти форму сосуда (зависимость его радиуса от осевой координаты) чтобы уровень воды смещался вниз с постоянной скоростью.
4. Согнутая трубка заполнена водой. Трубка опирается своим углом на поверхность таким образом, что ось одного ее плеча составляет с поверхностью угол  $\alpha$ , а другого –  $\beta$ . Вода залита до высоты  $h$  над поверхностью. Найти период колебаний воды в трубке после отклонения уровней воды от равновесного значения.
5. В вертикально расположенной трубе конической формы с коэффициентом конусности  $\alpha$  вниз стационарно течет жидкость. Верхний уровень жидкости поддерживается постоянным, а через нижний конец трубы радиусом  $r$  жидкость постоянно стекает вниз. Расстояние между верхним уровнем и нижним концом трубы равно  $h$ . Найти распределение давления на стенки трубы в направлении ее оси.
6. В цилиндрическом сосуде налита жидкость до высоты  $h_0$ . Затем сосуд вместе с жидкостью приводится во вращение с частотой  $\omega$  и у его дна открывается небольшое отверстие, через которое жидкость выливается наружу. Найти скорость истечения жидкости из сосуда.
7. В первоначально пустой цилиндрический сосуд с площадью основания  $S$  с высоты  $H$  стекает струя жидкости с секундным расходом  $Q$ . Найти зависимость от времени силы действующей на основание сосуда.
8. В сосуде с круглым отверстием в дне радиуса  $r$  вниз истекает струя жидкости. При этом уровень жидкости в сосуде поддерживается постоянным и равен  $H$ . Найти зависимость радиуса струи от расстояния от дна сосуда.
9. В вертикальном замкнутом цилиндрическом сосуде с площадью основания  $S$  и высотой  $H$  налита жидкость до высоты  $h_0$ . Остальное пространство сосуда заполнено воздухом с давлением  $P_0$ . У дна сосуда открывается отверстие с сечением  $\sigma$  и жидкость начинает выливаться. Найти зависимость скорости истечения жидкости от времени.
10. Вертикальный цилиндр с откаченным от воздуха объемом, площадью основания  $S$  и высотой  $H$  погружен под действием постоянной силы в жидкость на глубину  $h_0$ . Внизу цилиндра открывается отверстие с площадью  $\sigma$  и жидкость начинает поступать внутрь цилиндра. За какое время цилиндр полностью погрузится в жидкость?
11. Показать, что течение типа пограничного слоя является вихревым.
12. Показать, что течение типа вихревой точки является потенциальным.
13. Описать процедуру поиска положения центра вихря с помощью термоанемометра используя теорему Стокса.
14. Получить уравнения для линий тока и потенциала для течения образованного совмещением центров источника с расходом  $Q$  и вихревой точки с циркуляцией  $\Gamma$ , качественно нарисовать их.
15. На источник с расходом  $Q$  натекает равномерный поток со скоростью  $u_\infty$ . Найти положение точки остановки и уравнение нулевой линии тока, исходящей из точки остановки.
16. Дипольный источник величиной  $m$  перпендикулярен натекающему равномерному потоку со скоростью  $u_\infty$ . Найти положение точки остановки.



17. Найти точку остановки при обтекании вихревой точки с циркуляцией  $\Gamma$  равномерным потоком со скоростью  $u_\infty$ .
18. Найти точку остановки при обтекании двух одинаковых источников с расходом  $Q$  потоком со скоростью  $u_\infty$ , если соединяющая их линия перпендикулярна равномерному набегающему потоку, расстояние между источниками  $2h$ .
19. Найти точку остановки при обтекании равномерным потоком со скоростью  $u_\infty$  двух одинаковых противовращающихся вихревых точек с циркуляцией  $\Gamma$ , расположенных на линии перпендикулярной потоку. Расстояние между источниками  $2h$ .
20. Пусть тонкий профиль в виде сегмента круга обтекается равномерным потоком без угла атаки. В приближении малости возмущения потока, с помощью уравнения Бернулли показать, что его подъемная сила описывается формулой Жуковского.
21. Нарисовать качественную зависимость скорости от координаты вдоль поверхности треугольника, обтекаемого потоком идеальной несжимаемой жидкости со скоростью  $u_\infty$ .
22. В безграничной несжимаемой жидкости плотностью  $\rho$  и давлением  $P_0$  имеется сферическая полость начального радиуса  $a$ . В некоторый момент времени она начинает схлопываться с начальной скоростью жидкости на ее границе  $u_1$ . Найти величину максимального давления жидкости при схлопывании сферической полости.

## Задание 2

1. Из бесконечно большого замкнутого объема наполненного газом с параметрами  $P_0, \rho_0$  через отверстие площадью  $S$  газ стационарно вытекает в пространство с давлением  $P$ . Найти зависимость расхода от отношения  $P_0/P$  и нарисовать качественно эту зависимость.
2. Через геометрическое сопло текут два слоя несмешивающихся газов с показателями адиабаты  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . Найти условия на давления торможения для этих газов, когда они оба достигнут сверхзвуковой скорости.
3. Найти связь между углом падения и преломления звука на границе разделяющей две изотермические области с разными скоростями течения, области с нулевой скоростью, но разными температурами.
4. В торце длинного узкого цилиндрического объема находящегося в вакууме мгновенно возникает отверстие и через него начинает истекать газ. Качественно нарисовать график расхода газа от времени.
5. В боковой стенке длинного узкого цилиндрического объема находящего в вакууме мгновенно возникает отверстие и через него начинает истекать газ. Качественно нарисовать график расхода газа от времени, если отверстие смещено относительно поперечной оси симметрии объема.
6. Дать физическое объяснение тому, что максимальная скорость нестационарного истечения больше максимальной скорости стационарного истечения газа.
7. Тупое тело движется в газе с давлением  $P_\infty$  и плотностью  $\rho_\infty$  со скоростью  $U_\infty$ . Найти давление в лобовой точке тела для случая  $M_\infty \ll 1$   $M_\infty \gg 1$ .
8. Преобразовать условия на скачке уплотнения из системы, связанной с ударной волной, в лабораторную систему.
9. Трубка полного давления движется из потока за прямым скачком уплотнения в поток перед ним. Нарисовать качественный график давления  $P'_0$ .
10. Найти отношение давления после и давления перед отраженной от стенки ударной волны для случая  $M_\infty \gg 1$  и  $M_\infty \cong 1$ .
11. На свободную границу падает волна сжатия и волна разрежения. Качественно описать картины течения.
12. Из плоского сопла истекает недорасширенная струя. Качественно описать границу струи, форму и положения ударных волн, объяснить причины их появления и поведения.



13. Из плоского сопла истекает перерасширенная струя. Качественно описать границу струи, форму и положения ударных волн, объяснить причины их появления и поведения.
14. Симметричное ромбовидное крыло под нулевым углом атаки в сверхзвуковом потоке медленно догоняет прямой скачок уплотнения. Показать, что после вхождения задней кромки этого крыла в скачок он будет совершать продольные колебания относительно линии своего движения, не обгоняя и не отставая от него (эффект поплавка).
15. Клин с двумя углами сжатия обтекается сверхзвуковым потоком. Дать качественное описание возникающего поля течения.
16. Торец продольного потока цилиндра обтекается гиперзвуковым потоком. Найти угол наклона ударной волны и продольное распределение давления вблизи торца цилиндра в приближении взрывной аналогии.

## 11. Банк контролируемых материалов

### Билеты:

1. Основные понятия в газовой динамике идеального газа. Взрывная аналогия гиперзвукового обтекания тел.
2. Уравнения сохранения. Нестационарная аналогия гиперзвукового обтекания тел.
3. Типы движений сплошной среды. Первая теорема Гельмгольца.
4. Теорема Стокса о циркуляции, вторая теорема Гельмгольца. Уравнение Бернулли.
5. Метод ТФКП в газовой динамике. Линейная теория дозвукового обтекания крыла.
6. Элементарные двумерные течения. Линейная теория сверхзвукового обтекания крыла.
7. Обтекание цилиндра без - и с циркуляцией. Соотношения на скачке.
8. Теорема Жуковского о подъемной силе крыла. Зависимости газодинамических параметров от числа Маха за скачком уплотнения.
9. Подъемная сила крыла, гипотеза Чаплыгина-Жуковского. Изэнтропические соотношения.
10. Бесконечно малые и конечные возмущения, инварианты Римана. Элементарная теория сопла Лавваля.
11. Возникновение ударной волны. Нестационарное течение в центрированных волнах разрежения.
12. Косые скачки уплотнения, ударная поляра. Взаимодействие скачков друг с другом и границей.
13. Течение Прандтля-Майера. Метод характеристик.
14. Взаимодействие возмущений со скачком уплотнения. Ударная труба и трубка Пито.
15. Изменение энтропии в скачках уплотнения. Основные свойства ударной адиабаты.

### Дополнительные вопросы на зачете:

- Что такое идеальный, совершенный газ, какой физической реальности это соответствует?  
 Применимо ли уравнение Бернулли к вихревому движению?  
 Что такое правило Прандтля – Глауэрта?  
 Что такое соотношение Эккерета?  
 Почему крыло бесконечного размаха не имеет сопротивления, а конечного имеет?  
 Какого типа могут быть сопла, позволяющие разогнать газ?



Зачем было необходима гипотеза Чаплыгина – Жуковского?  
Зачем Риманом была введена функция давления?  
Какое преимущество дает применение метода ТФКП по сравнению с прямым решением уравнений Эйлера?  
Как построить угол наклона ударной волны на клине с помощью ударной поляры?  
Почему максимальная скорость нестационарного движения больше максимальной скорости стационарного?  
Как графически показать, что энтропия в ударной волне возрастает?  
Как рассчитать параметры потока в течении Прандтля-Майера для начального числа Маха больше 1 пользуясь таблицами, где все приведено для начального числа Маха равном 1?  
Как с помощью циркуля и линейки построить угол Маха для заданной скорости звука и скорости движения тела?  
Почему в реальном полете при скорости близкой к скорости звука аэродинамические коэффициенты не уходят в бесконечность, как предсказывает линейная теория?  
Как графически проиллюстрировать образование ударной волны в задаче о поршне?  
Что такое теорема Цемплена и что она говорит о форму ударной адиабаты?  
Как ведет себя линии тока в течении Прандтля-Майера?  
В каком соотношении делится работа сжатия газа в ударной волне между кинетической и внутренней энергией?

**Программа составлена в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:**

1. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ;
2. Приказ Министерства образования и науки РФ от 19.11.2013 года № 1259 «Об утверждении порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)»;
3. Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования по направлениям подготовки кадров высшей квалификации: 01.06.01 - "Математика и механика" - приказ Минобрнауки России от 30.07.2014 г. № 866.

Разработчик:  
докт. физ.-мат. наук, проф.



С. Г. Миронов

