

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.П. ФОМИЧЕВ

МАГНИТОГИДРОДИНАМИКА

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2011

УДК 537.84(075.8)
Ф 766

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук *А.П. Шашкин*
канд. физ.-мат. наук *Ю.А. Гостеев*

Работа подготовлена на кафедре аэрогидродинамики

Фомичев В.П.

Ф 766 Магнитогидродинамика : учеб. пособие / В.П. Фомичев. –
Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 150 с.

ISBN 978-5-7782-1802-4

Учебное пособие представляет собой курс лекций для магистрантов Новосибирского государственного технического университета, обучающихся на кафедре аэрогидродинамики. Цель пособия – доступно в краткой форме изложить основные физические законы, входящие в раздел физики «Магнитная гидродинамика». В пособии описаны также основные технические применения магнитогазодинамических эффектов и кратко освещены современные задачи магнитоплазменной аэродинамики.

Пособие предназначено для студентов, научных сотрудников, инженеров, преподавателей и аспирантов, специализирующихся в области магнитной газодинамики.

УДК 537.84(075.8)

ISBN 978-5-7782-1802-4

© Фомичев В.П., 2011
© Новосибирский государственный
технический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	7
Введение.....	9
1. МАГНИТНАЯ ГАЗОДИНАМИКА В ТЕОРИИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ	19
1.1. Описание электропроводного газа как сплошной среды.....	19
1.2. Основные параметры и свойства электропроводной среды.....	21
2. ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ ГАЗА В ТЕОРИИ СТОЛКНОВЕНИЙ.....	23
2.1. Основные понятия теории столкновений.....	23
2.2. Скорость процесса, частота столкновений, средняя длина свободного пробега	24
2.3. Скорость электронной рекомбинации.....	27
2.4. Молекулярная структура газа.....	29
2.5. Типы столкновений, учитываемые в магнитной газодинамике.....	30
2.6. Равновесное состояние газа.....	32
3. ТРАНСПОРТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ СЛАБОИОНИЗОВАННОГО ГАЗА.....	35
3.1. Определение вязкости.....	35
3.2. Определение теплопроводности	36
3.3. Определение электропроводности.....	37
4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА	41
4.1. Элементы электродинамики применительно к ионизованному газу.....	41
4.2. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях	42

4.3. Скорость дрейфа заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях с учетом их столкновений	45
4.4. Проводимость частично ионизованной плазмы в магнитном поле.....	46
5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОТОКА ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА	49
5.1. Частично ионизованный газ как сплошная среда. Закон Кирхгофа	49
5.2. Электрическая проводимость частично ионизованного газа в электрическом и магнитном полях	50
5.3. Обобщенный закон Ома для частично ионизованного газа	53
6. УРАВНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ.....	59
6.1. Уравнения Максвелла	59
6.2. Закон индукции Фарадея	60
6.3. Закон Ампера	61
6.4. Закон сохранения электрического заряда	62
6.5. Закон непрерывности магнитного поля	64
6.6. Система уравнений магнитной гидродинамики с учетом магнитогидродинамического взаимодействия	64
7. КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ В МАГНИТНОЙ ГАЗОДИНАМИКЕ	67
7.1. Критерии подобия в уравнениях Максвелла	67
7.2. Критерии подобия в уравнении движения.....	70
7.3. Критерии подобия в уравнениях энергии	73
7.4. Соотношение параметров плазменных потоков некоторых объектов	74
8. ПРОСТЕЙШИЕ ИНТЕГРАЛЫ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ.....	75
8.1. Уравнение индукции магнитного поля	75
8.2. Простейшие интегралы движения при $Re_m \rightarrow \infty$	76
8.3. Сохранение энергии в трубке тока	79

8.4. Простейшие интегралы движения при $Re_m \approx 1$	81
8.5. Уравнение Бернулли	82
9. ОДНОМЕРНЫЕ МГД-ТЕЧЕНИЯ	83
9.1. Система уравнений одномерного установившегося потока.....	83
9.2. Закон обращения воздействия в ионизованном газе.....	84
10. ОДНОРОДНОЕ МГД-ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ.....	91
10.1. Однородные течения ионизованного, нетеплопроводного, невязкого газа в электрическом и магнитном полях.....	91
10.2. Характеристики линейного фарадеевского МГД-генератора, $\beta_e \ll 1$	92
10.3. Характеристики линейного МГД-генератора при $\beta_e \approx 1$	97
10.4. Характеристики линейного МГД-генератора при $\beta_e > 1$	98
10.5. Характеристики линейного МГД-генератора при $\beta_e \gg 1$	101
10.6. Типы МГД-генераторов	101
11. НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ.....	103
11.1. Неустойчивости плазменных потоков.....	103
11.2. Гидродинамические неустойчивости	106
11.2.1. Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца.....	106
11.2.2. Неустойчивость Релея–Тейлора.....	107
11.3. Ионизационные неустойчивости плазмы в электростатическом поле	109
11.4. Ионизационно-перегревная (тепловая) неустойчивость	110
11.4.1. Феноменологический признак неустойчивости в слабоионизованной плазме.....	110
11.4.2. Контракция (шнурование) плазмы с током.....	111
12. НЕОДНОРОДНЫЕ МГД-ТЕЧЕНИЯ.....	113
12.1. Течения с T -слоем.....	113
12.2. Эффект T -слоя как развитие перегревной неустойчивости.....	113

12.3. Экспериментальное исследование течения в дисковом МГД-канале.....	116
12.4. Инициирование T -слоя.....	119
12.5. Дисковый МГД-генератор с T -слоем.....	124
13. ПРОМЫШЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МГД-ГЕНЕРАТОРЫ.....	127
13.1. Примеры реализаций МГД-генераторов в технике и научных исследованиях.....	127
13.2. МГД-генераторы на углеводородном топливе.....	127
13.3. Импульсные МГД-генераторы на ВВ.....	128
13.4. Импульсные МГД-генераторы.....	133
13.5. Использование МГД-генераторов в геофизических исследованиях.....	135
14. СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ МАГНИТНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ.....	138
14.1. Прямое МГД-преобразование тепловой энергии в электрическую.....	138
14.2. Магнитоплазменная аэродинамика.....	140
14.3. МГД-метод в аэрокосмических приложениях.....	143
Библиографический список.....	148