

УДК 533.9
ББК 22.253.35
К 432

Интернет-магазин
MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

• **ф и з и к а**
• **м а т е м а т и к а**
• **б и о л о г и я**
• **н е ф т е г а з о в ы е**
т е х н о л о г и и



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 09-08-07003

Кирко И. М., Кирко Г. Е.

Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский Институт компьютерных исследований, 2009. – 632 с.

В настоящей книге авторы попытались расширить традиционные границы применимости магнитной гидродинамики, показать новые направления ее развития.

Особое внимание уделено таким проблемам, как МГД в реакторах на быстрых нейтронах, МГД при производстве алюминия в современных электролизерах, а также вопросам, связанным с созданием озонаторов с турбулентным потоком рабочей среды.

В некоторой степени данную книгу можно рассматривать как программу исследовательских работ. Ее цель – заинтересовать этой областью науки возможно большее число опытных ученых и молодых исследователей.

Издание может оказаться полезным также для аспирантов, инженеров, научных работников и преподавателей, встретившихся с вопросами магнитной гидродинамики в своей научно-исследовательской, практической и педагогической работе.

ISBN 978-5-93972-752-5

ББК 22.253.35

© Г. Е. Кирко, 2009

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009

<http://shop.rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

Предисловие		10
Введение		18
ГЛАВА 1	Основы магнитной гидродинамики	20
§ 1.1.	Определение магнитной гидродинамики	20
§ 1.2.	Уравнения магнитной гидродинамики	22
§ 1.3.	Физическое подобие и размерность	30
§ 1.4.	Критерии подобия магнитной гидродинамики	36
§ 1.5.	Экстремальные области магнитной гидродинамики. Пути поиска новых явлений	42
Приложение.	Вывод уравнения Навье–Стокса в безразмерной форме	49
ГЛАВА 2	Магнитогидродинамические течения проводящих жидких сред в плоских каналах	53
§ 2.1.	Решение уравнений магнитной гидродинамики для некоторых течений с прямыми линиями тока	53
§ 2.2.	Гидравлические характеристики течения Гартмана	59
§ 2.3.	Режимы работы магнитогидродинамического (МГД) канала	61
§ 2.4.	Бегущее магнитное поле в магнитогидродинамическом канале	64
ГЛАВА 3	Явление обтекания тел в магнитной гидродинамике	69
§ 3.1.	Обтекание тел проводящей жидкостью в магнитном поле	69
	3.1.1. Течение вдоль бесконечной плоскости	70
	3.1.2. Обтекание бесконечного цилиндра вдоль его образующей в поперечном магнитном поле	72
	3.1.3. Поступательное движение шара в магнитном поле	74
	3.1.4. Вращательное движение шара в магнитном поле	77
§ 3.2.	Пограничный слой в магнитной гидродинамике	78
	3.2.1. Понятие о пограничном слое	78
	3.2.2. Приложение метода теории размерности к оценке толщины пограничного слоя	79
	3.2.3. Уравнение Прандтля для магнитной гидродинамики	83
	3.2.4. Течение вдоль пластины	87
§ 3.3.	Отрыв пограничного слоя	89

§ 3.4.	«Вязкое ядро» в осесимметричном течении при больших числах Стюарта	91
ГЛАВА 4	Турбулентность при течении жидких металлов в магнитном поле	96
§ 4.1.	Экспериментальные и теоретические факты, положившие начало учению о турбулентности	96
§ 4.2.	Основные свойства и законы установившегося турбулентного движения в канале (круглой трубе)	97
	4.2.1. Законы распределения скоростей для гладкой и шероховатой труб	97
	4.2.2. Законы сопротивления для гладких и шероховатых труб	101
§ 4.3.	Уравнения движения в отсутствии магнитного поля	103
§ 4.4.	Полуэмпирические теории турбулентности	106
	4.4.1. Теория Буссинеска	107
	4.4.2. Полуэмпирическая теория Прандтля	107
	4.4.3. Теория переноса завихренностей, предложенная Тейлором	108
	4.4.4. Гипотеза подобия турбулентных пульсаций – гипотеза Кармана	109
§ 4.5.	Статистическая теория турбулентности	110
§ 4.6.	Неустойчивость ламинарных магнитогидродинамических течений и переход к турбулентности	114
§ 4.7.	Коэффициент сопротивления и распределение осредненных скоростей при турбулентном течении в каналах в магнитном поле	116
	4.7.1. Плоский гладкий непроводящий канал в поперечном магнитном поле (течение Гартмана)	116
	4.7.2. Осесимметричное и плоское течения в продольном поле	118
	4.7.3. Профили скорости	120
§ 4.8.	Уравнение Рейнольдса в магнитном поле и полуэмпирические теории турбулентности	121
ГЛАВА 5	Процессы при значении магнитного числа Рейнольдса много больше единицы	127
§ 5.1.	Явление диффузии магнитного поля	127
§ 5.2.	Теорема Валена	131
§ 5.3.	Волны Альфвена	135
ГЛАВА 6	Технические приложения магнитной гидродинамики жидких металлов	140
§ 6.1.	История кондукционного МГД-насоса и униполярного двигателя	140

§ 6.2.	МГД-канал. Элементарная теория кондукционной машины	143
6.2.1.	Понятия скольжения и относительной скорости течения в кондукционной МГД-машине	145
6.2.2.	Коэффициент полезного действия, « p - Q » характеристика МГД-машины	148
§ 6.3.	Некоторые задачи о бегущем магнитном поле, существенные для прикладной магнитной гидродинамики	154
6.3.1.	Непрерывный индуктор бегущего поля над металлическим полупространством	155
6.3.2.	Воздействие бегущего магнитного поля параллельных индукторов на полосу металла	161
§ 6.4.	Индукционные электромагнитные насосы с бегущим полем	162
ГЛАВА 7	Генерация и самовозбуждение магнитного поля	169
§ 7.1.	Классификация явлений, принятая в данной книге	169
§ 7.2.	Теория индуцирующего действия упорядоченных (ламинарных) течений	178
§ 7.3.	Теория однородного динамо и лабораторный эксперимент	184
§ 7.4.	Электродинамика усредненных магнитных полей. Экспериментальное обнаружение альфа-эффекта	192
§ 7.5.	Термоэлектромагнитогидродинамическая (ТЕМГД) гипотеза происхождения магнитного поля Земли	203
ГЛАВА 8	Усиление магнитного поля при движении проводящих сред	212
§ 8.1.	Методы получения сильного поля за счет движения проводящей среды	212
§ 8.2.	Импульсный электромагнит на принципе пластической деформации проводящих оболочек	217
§ 8.3.	«Магнитный снаряд» как носитель магнитного потока для возбуждения продольного тока в плазменном витке	221
§ 8.4.	Вынос магнитного потока из соленоида медным лайнером. Эксперимент	224
§ 8.5.	Метательные устройства для макротел	228
§ 8.6.	Генерация магнитного поля при конфокальном движении проводящей несжимаемой среды. Гидромагнит Кольма	236
ГЛАВА 9	Реактор на быстрых нейтронах – объект для наблюдения МГД-явлений	243
§ 9.1.	Теоретические предпосылки	243
§ 9.2.	Постановка эксперимента	246

§ 9.3.	Термоэлектрические токи, текущие внутри первого контура реактора БН-600	257
§ 9.4.	Генерация магнитного поля в районе главного циркуляционного насоса	261
9.4.1.	Описание явления	261
9.4.2.	Анализ возможных причин колебаний H_z -компоненты в районе ГЦН	263
9.4.3.	Гипотезы возникновения генерации	266
§ 9.5.	МГД-процессы в напорной камере. Самовозбуждение магнитного поля	272
9.5.1.	Описание явления	272
9.5.2.	Безразмерные параметры, описывающие процессы в первом контуре реактора на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем	278
9.5.3.	Механизм самовозбуждения магнитного поля в напорной камере реактора БН-600	283
9.5.4.	Оценка предельного поля при явлениях самовозбуждения в напорной камере реактора БН-600	289
§ 9.6.	Критические МГД-режимы в объеме жидкого металла первого контура перспективных атомных реакторов большой мощности	298
§ 9.7.	Волны Альфвена и генерация колебаний магнитного поля в реакторе на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Биоинформационная функция волн Альфвена	305
§ 9.8.	Итоги измерений на «холодном» и «горячем» реакторах	310
§ 9.9.	Моделирование в лабораторных условиях МГД явлений, происходящих в реакторе.	314
ГЛАВА 10	Магнитогидродинамические процессы в алюминевом электролизере	318
§ 10.1.	Проблемы современных мощных электролизеров	318
§ 10.2.	Физико-технологическая модель динамики электролизера	327
§ 10.3.	Вихревые течения в жидкометаллическом катоде современного промышленного электролизера	331
§ 10.4.	Явление преломления направления электрического тока на границе электролит–расплав алюминия	337
§ 10.5.	Явления в слое электролита	340
10.5.1.	Двухслойное течение в межполюсном пространстве	340
10.5.2.	Транспортный механизм двухслойного течения в МПР	342
§ 10.6.	Краевой эффект в электролизере	345

§ 10.7.	Закономерности электрических явлений в электролизерах Эру-Холла во временном интервале между двумя анодными эффектами	352
§ 10.8.	Магнитогидростатические и магнитогидродинамические явления в алюминиевом электролизере	358
10.8.1.	Постановка задачи	358
10.8.2.	Расчет явления нелинейного пинча на границе электролит-жидкий алюминий в пространстве под анодом (Плоская МГС-задача)	360
§ 10.9.	Коррекция магнитного поля электролизера Эру-Холла. Индикация анодного эффекта	367
§ 10.10.	Магнитогидродинамические устройства для алюминиевых расплавов	372
10.10.1.	Дозирование жидкого металла при помощи электромагнитных насосов	375
10.10.2.	Индукционные устройства со свободной поверхностью жидкого металла. Электромагнитные перемешиватели и индукционные лотки	382
10.10.3.	МГД – запорное устройство	391
10.10.4.	Применения однофазного электромагнитного поля для управления течением жидкого алюминия	404
§ 10.11.	Электролизер на биполярных электродах для получения алюминия с МГД-управлением процессом	410
10.11.1.	Описание конструкции	410
10.11.2.	Физическая сущность примененных процессов	418
10.11.3.	Гидродинамика электролизера	420
10.11.4.	Влияние МГД-эффектов на режимы течений в электролизере	421
10.11.5.	Выбор параметров создаваемого электролизера	422
	Приложение. Расчет алюминиевого электролизера Кирко–Полякова	425
§ 10.12.	Постановка системы МГД-измерений на действующих электролизерах	440
§ 10.13.	Измерение уровня алюминия в электролизерах	443
ГЛАВА 11	Плазма газового разряда. Озонаторы	453
§ 11.1.	Газовый разряд – источник плазмы	453
§ 11.2.	Использование электрического разряда в газах в науке и технике	454
§ 11.3.	Барьерный разряд	460
§ 11.4.	Выбор электродинамической схемы и оптимальных параметров барьерного озонатора	464
11.4.1.	Озонатор постоянного поля. Конструктивные возможности	467

	11.4.2. Озонатор переменного поля	469
	11.4.3. Озонатор с переменным синусоидальным напряжением	470
	11.4.4. Оптимальные конструкционные соотношения озонаторов	472
§ 11.5.	Самоочищение электродов барьерного электрического озонатора при турбулентном режиме течения газа	474
§ 11.6.	Математическая модель барьерного электрического озонатора в гидродинамическом приближении	478
§ 11.7.	Исследование электрической заряженности озонированного газа при турбулентном режиме работы озонатора	487
§ 11.8.	Использование озонаторов для очистки воды и воздуха	492
§ 11.9.	Применение озонаторов для нейтрализации продуктов сгорания твердого ракетного топлива и получения дисперсного корунда	505
§ 11.10.	Применение озонаторов в производстве алюминия	522
ГЛАВА 12	Физические принципы магнитодинамического накопления энергии	529
§ 12.1.	Анализ различных способов накопления энергии	529
§ 12.2.	Общие положения о способах разгона маховиков и съема запасенной кинетической энергии	542
§ 12.3.	Энергетический спутник космической станции	544
§ 12.4.	Возможности применения гироаккумуляторов в автомобиле	552
§ 12.5.	Инерционный накопитель с жидкометаллическим контактом как источник энергии для получения сильных магнитных полей	557
§ 12.6.	«Магнитный снаряд» как носитель магнитного потока для возбуждения продольного тока в плазменном витке	567
§ 12.7.	Вынос магнитного потока из соленоида медным лентом. Эксперимент	570
ГЛАВА 13	Магнитостабилизированные гетерогенные среды в сильных магнитных полях. Перспективы их использования	574
§ 13.1.	Ферромагнитная суспензия как рабочее тело магнитодинамических устройств	574
§ 13.2.	Магнитосвязная сыпучая среда как магнитодинамический поршень	584
§ 13.3.	Магнитодинамический генератор с рабочим телом в виде газового потока, несущего неоднородную ферромагнитную массу	587

§ 13.4.	Модель элементарного взаимодействия ферромагнитного поршня и соленоида в магнитодинамическом генераторе	599
§ 13.5.	Силовое воздействие магнитного поля на магнитосвязную среду	603
§ 13.6.	Закономерности ориентации ферромагнитного цилиндра с большой относительной длиной в магнитном поле в вязкой среде	607
§ 13.7.	Конгломерат ферромагнитных нитей в вязкой среде с наложенным внешним магнитным полем	611
§ 13.8.	Аналогии в поведении ферромагнитных гетерогенных сред и составляющих элементов биологических жидкостей в однородном магнитном поле	617
	13.8.1. Структурные превращения цепочки из ферромагнитных шариков в однородном магнитном поле, создаваемом кольцами Гельмгольца	617
	13.8.2. Исследование поведения эритроцитарной и ферромагнитной взвесей в однородном магнитном поле	619
	Именной указатель	621