

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	10
Предисловие к первому изданию	11
Введение	15
В.1. Что такое плазма?	15
В.2. Область разреженных нерелятивистских плазм в координатах n, T	21
В.3. Об истории плазменных исследований	24
В.3.1. Исследования до 30-х годов XX века (24). В.3.2. Исследования и разработка 30-х и 40-х годов (27). В.3.3. Исследования 50–60-х годов. Проблема УТС (29). В.3.4. Исследования 50-х, 60-х годов. Проблема электрореактивных двигателей (34). В.3.5. Другие истоки плазмодинамики (36).	
В.4. Особенности плазменных исследований.	36
Глава 1. Поля, частицы, блоки (нуль-мерные модели)	40
1.1. Электромагнитные поля	40
1.1.1. Уравнения Максвелла (40). 1.1.2. Законы сохранения (43). 1.1.3. Морфология магнитных полей (46). 1.1.4. Метрические характеристики магнитных полей (53). 1.1.5. Возмущение морфологии поля (54).	
1.2. Движение частиц в электромагнитных полях	56
1.2.1. Законы сохранения (56). 1.2.2. Движение частицы в однородных постоянных электрическом и магнитном полях (57). 1.2.3. Динамика частиц в постоянном магнитном и переменном электрическом полях (59). 1.2.4. Движение частицы в неоднородном высокочастотном поле (60). 1.2.5. Дрейфовое приближение (62). 1.2.6. Ионно-оптическое приближение (64).	
1.3. Блочные (“нуль-мерные”) модели плазменных систем	64
1.3.1. Однокомпонентная модель магнитоэлектрического рельсотрона (65). 1.3.2. Падение “тяжелого бруска” плазмы в магнитном поле (66).	
1.4. Элементы классической корпускулярной оптики (ККО)	67
1.4.1. Ионные источники (68). 1.4.2. Примеры систем вакуумной корпускулярной оптики (70).	
1.5. Диэлектрическая проницаемость и волны в однородной холодной плазме.	76
1.5.1. Диэлектрическая проницаемость (77). 1.5.2. Уравнения для волн в однородной плазме (77). 1.5.3. Волны в холодной плазме без магнитного поля (79).	
1.6. Блочные модели импульсных плазменных систем (импульсные плазменные пушки и Z-пинчи)	80
1.6.1. Двухкомпонентная модель магнито-электрического рельсотрона (А. И. Морозов) (80). 1.6.2. Электродинамическая модель рельсотрона (Л. А. Арцимович) (82). 1.6.3. Z-пинчи (83).	
1.7. Простейшие модели статических магнитных ловушек.	87

1.7.1. Пробочная ловушка Будкера–Поста (88).	1.7.2. Тороидальные ловушки (91).	
Глава 2. Одножидкостные модели плазмы		96
2.1. Особенности гидродинамических моделей		96
2.1.1. Уравнения Эйлера (96).	2.1.2. Обеспечение автономности капель (98).	
2.1.3. Два закона сохранения при течении идеального газа (99).		
2.2. Примеры задач гидродинамики Эйлера		101
2.2.1. Гидро(газо)-статика (101).	2.2.2. Линейные волны в однородном газе (102).	
2.2.3. Течение идеального газа в тонкой трубке переменного сечения (105).	2.2.4. Ударные волны в идеальном газе (108).	
2.3. Одножидкостная магнитная гидродинамика (МГД)		110
2.3.1. Уравнения МГД (111).	2.3.2. “Вмороженность” магнитного поля в плазму (112).	
2.4. МГД-статика		114
2.4.1. Общие свойства равновесных МГД-конфигураций (114).	2.4.2. Одномерные равновесные МГД конфигурации (116).	
2.4.3. Двумерные (симметричные) конфигурации. Уравнение Грэда–Шафранова (117).		
2.5. Линейные МГД волны в однородной плазме		121
2.5.1. Исходные уравнения (121).	2.5.2. Энтропийная волна (122).	
2.5.3. Альфвеновские волны (123).	2.5.4. Магнитозвуковые волны (МЗВ) (125).	
2.6. Стационарные течения плазмы в поперечном магнитном поле.		127
2.6.1. Течения в узких каналах (127).		
2.7. О численном моделировании МГД течений		131
2.7.1. Расчёты течения идеальной плазмы в осесимметричном канале (131).		
2.7.2. Об ударных волнах в МГД (132).	2.7.3. О роли омического сопротивления в динамике хорошо проводящей плазмы (133).	
Глава 3. Двухжидкостные гидродинамические модели плазмы		135
3.1. Уравнения двухжидкостной гидродинамики		135
3.1.1. Формулировка уравнений (135).	3.1.2. Редукция системы (3.1.5) (137).	
3.1.3. Связь компонент плазмы с магнитным полем (139).	3.1.4. Закон сохранения энергии при стационарных течениях двухкомпонентной плазмы (140).	
3.2. Электронная магнитная гидродинамика. Обобщённый закон Ома		140
3.2.1. Безразмерные характеристики обобщенного закона Ома (140).	3.2.2. Бездиссипативная электронная компонента: “вырожденный закон Ома”, “лоренцовы поля” (142).	
3.2.3. Динамика электронной компоненты с $\sigma \neq \infty$, “тензорная проводимость” (149).	3.2.4. Электродинамика плоских течений несжимаемой плазмы в поперечном магнитном поле (151).	
3.3. Холловские структуры		155
3.4. Статические конфигурации в двухжидкостной гидродинамике		157
3.5. Линейные волны в однородной плазме (двухжидкостная модель)		160
3.5.1. Волны в отсутствии внешнего магнитного поля при $p_i, p_e \neq 0$ (160).		
3.5.2. Линейные волны в однородной плазме при $H_0 \neq 0$ (холодная плазма) (164).	3.5.3. Линейные волны в однородной нагретой плазме при $\mathbf{H} \neq 0$ (169).	
3.5.4. Простейшая двухжидкостная модель пучковой неустойчивости (169).		
3.6. Бездиссипативные аксиально-симметричные течения в двухкомпонентной гидродинамике		171
3.6.1. Вывод законов сохранения (172).	3.6.2. Качественный анализ системы уравнений (3.6.17) (175).	
3.6.3. Метод “плавных” течений (179).	3.6.4. Анализ системы (3.6.17) методом узкого канала (182).	

3.7. Численные и экспериментальные исследования (квази)стационарных течений в коаксиальных системах с собственным магнитным полем.	183
3.7.1. Численное моделирование течений плазмы в коаксиалах со сплошными электродами (183). 3.7.2. Экспериментальные исследования ускорителей со сплошными электродами (184). 3.7.3. Коаксиальный сильноточный плазменный ускоритель с ионным токопереносом (КСПУ) (188). 3.7.4. Квазистационарные компрессионные течения (193).	
3.8. Динамика плазменных потоков в магнитных полях	194
3.8.1. Движение автополяризованного плазменного потока (сгустка) в поперечном магнитном поле (195). 3.8.2. Одномерная классическая диффузия плазмы в магнитном поле (197). 3.8.3. Вход плазменного потока в магнитное поле (198).	
Глава 4. Бесстолкновительные кинетические модели процессов в плазме. Уравнения Власова–Максвелла	201
4.1. Исходные понятия	202
4.1.1. Фазовое пространство и функция распределения (ФР) (202). 4.1.2. Уравнение Лиувилля (203). 4.1.3. Соотношение кинетического и гидродинамического описаний (205).	
4.2. Уравнения Власова–Максвелла	207
4.2.1. Формулировка системы уравнений (207). 4.2.2. Является ли система уравнений Власова точной? (208). 4.2.3. Гибридное приближение (209).	
4.3. “Статические” кинетические конфигурации	210
4.3.1. Одномерные статические кинетические конфигурации (210). 4.3.2. Обратная задача Бернштейна–Грина–Крускала (212). 4.3.3. “Одноларморовские” структуры (215).	
4.4. Кинетика волн в плазме при $\mathbf{H}_0 = 0$	218
4.4.1. Исходные уравнения. Нестационарные ленгмюровские волны (218). 4.4.2. Преобразование Лапласа (220). 4.4.3. Затухание и раскачка ленгмюровских волн (222). 4.4.4. Экспериментальные исследования резонансных затуханий (224).	
4.5. О колебаниях двухкомпонентной плазмы	226
4.5.1. Ионный звук (226). 4.5.2. Колебания в токнесущей плазме (при $\mathbf{H}_0 = 0$) (227).	
4.6. Квазилинейное приближение	228
4.6.1. Вывод основного уравнения (228). 4.6.2. Несколько замечаний о кинетике ленгмюровских волн (229).	
Глава 5. Кинетика двухкомпонентной плазмы при классических столкновениях	231
5.1. Введение	231
5.2. Кинетика сталкивающихся заряженных частиц	235
5.2.1. Основные понятия (235). 5.2.2. Кулоновские столкновения: сила, действующая на пробную частицу (237). 5.2.3. Кулоновские столкновения: диффузионные коэффициенты (241). 5.2.4. Столкновительный член Ландау (243).	
5.3. Уравнения переноса в двухжидкостной гидродинамике	244
5.3.1. Схема решения кинетического уравнения при частых столкновениях (244). 5.3.2. Уравнения переноса. Общий вид (245). 5.3.3. Модель идеальной плазмы (246). 5.3.4. Уравнения Брагинского (246). 5.3.5. Замечания к уравнениям Брагинского (249).	
5.4. Примеры столкновительной релаксации в кулоновской плазме	249

5.4.1. Парадокс Беляева–Будкера (249).	5.4.2. Релаксация редкого потока быстрых ионов в изотропной плазме (250).	5.4.3. Убегающие электроны (252).	5.4.4. Времена релаксации функций распределений в двухкомпонентной плазме (252).
5.5. Влияние термосилы на равновесие и теплоперенос в плазменной конфигурации	254		
5.5.1. Равновесная конфигурация магнитной оболочки миксины (254).			
5.5.2. Теплопроводность в МОМ (255).			
5.6. Кинетика ухода частиц плазмы из ловушек.	257		
5.6.1. Уход частиц из ловушек антипробочного типа (258).	5.6.2. Уход частиц из пробочной ловушки (260).	5.6.3. Неоклассическая диффузия в тороидальных системах (262).	5.6.4. Удержание энергии и плазмы в реальных ловушках. Скейлинги (264).
5.7. Плазмооптика (гибридные модели).	265		
5.7.1. Общие принципы плазмооптики (266).	5.7.2. Некоторые особенности плазмооптических систем (271).	5.7.3. Распирение квазинейтрального пучка под действием электронного давления (272).	
5.8. Кинетическое уравнение Больцмана–Давыдова для электронов в слабо ионизованной плазме.	275		
Глава 6. Плазменные процессы с трансформацией частиц и излучением	277		
6.1. Введение	277		
6.2. Скорости трансформационных процессов	280		
6.2.1. Энергетические уровни (280).	6.2.2. Упругое рассеяние электронов на атомах (281).	6.2.3. Возбуждения и ионизация атомов электронным ударом (283).	6.2.4. Процессы рекомбинации ионов (285).
6.2.5. Отрицательные ионы (287).	6.2.6. Возбуждение и ионизация молекул электронным ударом (288).	6.2.7. Взаимодействия тяжёлых частиц (290).	
6.3. Элементарные процессы излучения	291		
6.3.1. Линейчатые спектры излучения (291).	6.3.2. Сплошной спектр излучения (292).	6.3.3. Механизмы уширения спектральных линий (294).	6.3.4. Коэффициент поглощения в спектральных линиях (297).
6.4. Уравнение переноса излучения (кинетика фотонов)	298		
6.4.1. Формулировка уравнения переноса (298).	6.4.2. Перенос излучения в условиях, близких к равновесным (302).		
6.5. О схемах описания динамики частиц трансформирующейся плазмы	306		
6.5.1. Общая характеристика моделей (306).	6.5.2. Два подхода к упрощению реальных ситуаций (307).	6.5.3. Пролётные системы (309).	6.5.4. Корональное равновесие (310).
6.5.5. Динамика квазиравновесной трансформирующейся плазмы (311).	6.5.6. Диффузионное приближение (317).	6.5.7. Уравнения динамики квазиравновесной плазмы (317).	
6.6. Радиационная цена иона в корональной модели.	319		
6.7. Объёмные процессы в стационарных плазменных двигателях и их законы подобия	320		
6.7.1. Общая характеристика процессов в СПД (321).			
6.8. Ударные волны с излучением.	327		
6.8.1. Особенности УВ с излучением (327).	6.8.2. Итоги расчётов (329).	6.8.3. Схема расчёта УВ с реальным спектром (332).	
6.9. Течения ионизирующейся плазмы в коаксиале	332		
6.10. О тлеющих и дуговых разрядах.	335		
6.10.1. Общая характеристика тлеющего и дугового разрядов (336).	6.10.2. Положительный столб дугового стационарного разряда (340).	6.10.3. Квазистационарные сильноизлучающие Z-пинчи (341).	

6.11. Системы, использующие выделенные уровни возбуждения частиц.	342
6.11.1. Газоразрядные и плазменные лазеры (342). 6.11.2. Особенности плаз- мохимии (345).	
Глава 7. Взаимодействие плазмы с поверхностями твёрдых тел.	350
7.1. Введение	350
7.1.1. Пограничный слой Прандтля–Блазиуса (гидродинамика Навье– Стокса) (350). 7.1.2. Общая структура переходного слоя плазма–твёрдое тело (355). 7.1.3. Функции эмиссии (356).	
7.2. Процессы на поверхности твёрдого тела	359
7.2.1. Адсорбция “тёплых” частиц (359). 7.2.2. Взаимодействие частиц надтеп- ловой энергии с поверхностями (362). 7.2.3. Распыление поверхностей (366). 7.2.4. Эмиссия электронов с поверхностей (370).	
7.3. Электронные пограничные слои.	377
7.3.1. Дебаевские слои на диэлектрических стенках (379). 7.3.2. Диффузион- ный пограничный слой. Пристеночная проводимость (384). 7.3.3. Дрейфовые электронные пограничные слои (388).	
7.4. Примеры пограничных процессов с участием тяжелых частиц	390
7.4.1. Рециклинг (390). 7.4.2. Разряды, скользящие по поверхности диэлектри- ка (392). 7.4.3. Кинематика распыления поверхности моноскоростным ионным потокom (394).	
7.5. Поверхностно-детерминированные разряды (на примере СПД)	397
7.5.1. Функция распределения электронов в канале СПД (398). 7.5.2. Аналити- ческие модели фрагментов ФРЭ (400). 7.5.3. Экспериментальные исследова- ния пристеночной проводимости в СПД (403). 7.5.4. СВЧ-колебания в канале СПД (404). 7.5.5. Эрозия изоляторов в СПД (406).	
7.6. Примеры приэлектродных процессов	407
7.6.1. Формула Маккоуна (407). 7.6.2. Приэлектродные слои в тлеющих и дуговых разрядах (408). 7.6.3. Окрестность дугового термокатода (412). 7.6.4. Пятна на холодном катоде (415). 7.6.5. О прианодных слоях в ТР и ДР (417). 7.6.6. Эрозия электродов и процессы в коаксиальных (ква- зи)стационарных ускорителях (418).	
7.7. Пылевая плазма.	419
7.7.1. Зарядка макрочастиц и их взаимодействие друг с другом (420). 7.7.2. Ли- нейные колебания в однородной пылевой плазме при $H = 0$ (421).	
Глава 8. Неустойчивости и самоорганизация плазмодинамических си- стем.	423
8.1. Примеры аналогичных между собой гидродинамических и плазменных неустойчивостей.	425
8.1.1. Перегревные (“джоулевы”) неустойчивости (425). 8.1.2. Конвектив- ные неустойчивости (426). 8.1.3. Гидродинамический резонанс Рэлея– Тимофеева (429). 8.1.4. Трансформация волн (431).	
8.2. Примеры специфических МГД возмущений плазменных систем	435
8.2.1. Анализ устойчивости МГД конфигураций энергетическим мето- дом (435). 8.2.2. Перезамыкание магнитных силовых линий в плазме. Тиринг- неустойчивость (438). 8.2.3. Холловская неволюционность плоских течений идеальной плазмы (440). 8.2.4. Дрейфовые течения поперёк магнитного поля (443).	
8.3. Модельные уравнения “автономных” плазменных структур (“автоструктур”)	445

8.3.1. Уравнение Кортевега–де Фриза. Солитоны (445).	8.3.2. Учет затухания в уравнении КдФ (450).	8.3.3. Неустойчивости типа Чаплыгина–Трубникова (450).	8.3.4. Уравнение Чарни–Обухова (452).
8.4. О стохастичности процессов в плазме	457		
8.4.1. Стохастичность и турбулентность (457).	8.4.2. Турбулентность (459).	8.4.3. Некоторые особенности плазменных турбулентностей (461).	8.4.4. Аномальное сопротивление плазмы (462).
8.5. Активные методы стабилизации плазменных неустойчивостей	464		
Г л а в а 9. Процессы в космосе и плазмодинамика			
9.1. Планетарные вихри. Спиральные туманности	469		
9.1.1. Циклоны и антициклоны. Зональные течения (469).	9.1.2. Аналогия Лармора (471).	9.1.3. Двумерная гидродинамика тонких слоев (472).	9.1.4. Параметр Россби (472).
9.1.5. Аналоговые эксперименты М. В. Незлина (473).	9.1.6. Спиральные структуры в галактиках (475).	9.1.7. Установки для моделирования спиральных структур галактик и результаты экспериментов (477).	
9.2. Магнитосфера Земли	478		
9.2.1. Понятие “магнитосферы” (479).	9.2.2. Характерные особенности магнитосферы (481).	9.2.3. Радиационные пояса (485).	9.2.4. Активные эксперименты в магнитосфере (488).
9.2.5. Моделирование магнитосферы (491).			
9.3. Солнце	491		
9.3.1. Интегральные характеристики Солнца (493).	9.3.2. Строение видимой области Солнца (494).	9.3.3. Квазиравновесные структуры, связанные с фотосферой (496).	9.3.4. Катастрофические процессы, видимые на Солнце (вспышки, выбросы корональной массы) (502).
9.3.5. Цикличность солнечной активности (503).	9.3.6. Стандартная модель макроструктуры Солнца (506).		
9.4. Об эволюции звезд главной последовательности	508		
Г л а в а 10. Примеры современных плазменных технологий			
10.1. Генераторы плазмы	512		
10.1.1. Типы генераторов плазмы (513).			
10.2. Плазма в быту	516		
10.2.1. Лампы “дневного света” (люминесцентные лампы) (516).	10.2.2. Плазменные телевизионные панели (517).	10.2.3. Плазменный скальпель (518).	10.2.4. Люстра Чижевского (519).
10.3. Формирование структур на твёрдых телах методами плазменной технологии	521		
10.3.1. (521).	10.3.2. Примеры технологий покрытий (523).	10.3.3. Формирование схем микроэлектроники (527).	10.3.4. Модификация металлических поверхностей под действием энергичных плазменных сгустков (528).
10.4. Ионные и плазменные космические двигатели	530		
10.4.1. Принципиальный недостаток термохимических двигателей (530).	10.4.2. О разновидностях ЭРД (531).	10.4.3. Стационарные плазменные двигатели (СПД) (533).	10.4.4. Перспективные схемы ЭРД (535).
10.5. Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС).	536		
10.5.1. Исходные принципы (537).	10.5.2. Кривые Лоусона (538).	10.5.3. Схемы ловушек (540).	10.5.4. Токамаки (547).
10.6. От генераторов многозарядных ионов к острову стабильности и черным дырам в эксперименте	554		
10.6.1. Источники многозарядных ($Z \gg 1$) ионов (554).	10.6.2. На пути к острову стабильности (559).	10.6.3. “Черные дыры” в лаборатории (561).	

Приложение А. Замечания о топологии магнитного поля (В. И. Ильгисонис)	564
Приложение Б. Об инерциальном УТС с помощью лайнеров	570
Приложение В. Перезамыкание силовых линий в плазме	571
Приложение Г. Ионные магнетроны и двигатели с анодным слоем....	576
Приложение Д. Токамак как потенциально возможный реактор Д-Т синтеза (С. В. Мирнов).....	581
Д.1. Введение	581
Д.2. Пределы устойчивости плазмы токамака	582
Приложение Е. О больших β в больших токамаках (В. Д. Пустовитов)	590
Приложение Ж. Ионизация атомов и ионов электронным ударом (Г. С. Воронов)	597
Список литературы	603