

---

# Оглавление

|                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Авторы . . . . .                                                                                                                  | 10        |
| Введение . . . . .                                                                                                                | 11        |
| <br>                                                                                                                              |           |
| <b>1. Типы экспериментальной комплексной плазмы . . . . .</b>                                                                     | <b>15</b> |
| <i>В. Е. Фортков, А. Г. Храпак, В. И. Молотков, Г. Е. Морфилл, О. Ф. Петров,<br/>Х. М. Томас, О. С. Ваулина, С. В. Владимиров</i> |           |
| 1.1. Комплексная плазма в ВЧ-разрядах . . . . .                                                                                   | 17        |
| 1.1.1. Стандартная газоразрядная камера . . . . .                                                                                 | 18        |
| 1.1.2. Симметрично возбуждаемый ВЧ-разряд для экспериментов в усло-<br>виях микрогравитации . . . . .                             | 25        |
| 1.1.3. Комплексная плазма в индукционных разрядах . . . . .                                                                       | 29        |
| 1.2. Комплексная плазма в разрядах постоянного тока . . . . .                                                                     | 31        |
| 1.2.1. Лабораторные эксперименты . . . . .                                                                                        | 31        |
| 1.2.2. Эксперименты в условиях микрогравитации . . . . .                                                                          | 43        |
| 1.3. Термическая пылевая плазма . . . . .                                                                                         | 48        |
| 1.3.1. Источник термической плазмы с макрочастицами . . . . .                                                                     | 49        |
| 1.3.2. Диагностика плазмы . . . . .                                                                                               | 49        |
| 1.3.3. Диагностика частиц . . . . .                                                                                               | 50        |
| 1.3.4. Пространственно упорядоченные структуры в термической плазме . . . . .                                                     | 51        |
| 1.4. Другие виды пылевой плазмы . . . . .                                                                                         | 52        |
| 1.4.1. Пылевая плазма при криогенных температурах . . . . .                                                                       | 52        |
| 1.4.2. Эксперименты в пылевой плазме, индуцированной УФ-излучением . . . . .                                                      | 56        |
| 1.4.3. Ядерно-возбуждаемая и трековая пылевая плазма . . . . .                                                                    | 59        |
| 1.4.4. Структуры частиц в разряде постоянного тока при наличии магнит-<br>ного поля . . . . .                                     | 63        |
| 1.4.5. «Малые» пылевые структуры: кулоновские или юкавские кластеры<br>и шары . . . . .                                           | 68        |
| 1.4.6. Комплексная плазма с несферическими частицами . . . . .                                                                    | 75        |
| 1.5. Формирование и рост пылевых частиц . . . . .                                                                                 | 83        |
| 1.5.1. Причина и механизмы роста пыли в плазме силана . . . . .                                                                   | 84        |
| 1.5.2. Рост пыли в углеводородной плазме . . . . .                                                                                | 87        |
| 1.5.3. Рост пылевых частиц в плазме фторуглеродов . . . . .                                                                       | 90        |
| 1.5.4. Рост пылевых частиц в установках плазменного напыления . . . . .                                                           | 92        |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>2. Основы плазменно-пылевых взаимодействий</b>                          | 108 |
| <i>С. А. Храпак и А. В. Ивлев</i>                                          |     |
| 2.1. Зарядка частиц в пылевой плазме                                       | 108 |
| 2.1.1. Зарядка в бесстолкновительной плазме                                | 110 |
| 2.1.2. Влияние столкновений электронов и ионов плазмы на зарядку частиц    | 119 |
| 2.1.3. Экспериментальное определение заряда частиц                         | 128 |
| 2.1.4. Эмиссионные процессы                                                | 132 |
| 2.1.5. Квазинейтральность комплексной плазмы                               | 134 |
| 2.1.6. Флуктуации заряда частиц                                            | 135 |
| 2.2. Распределение электрического потенциала в окрестности частицы         | 137 |
| 2.2.1. Изотропная плазма                                                   | 137 |
| 2.2.2. Анизотропная плазма                                                 | 144 |
| 2.3. Взаимодействия между частицами                                        | 147 |
| 2.3.1. Изотропная плазма                                                   | 147 |
| 2.3.2. Анизотропная плазма                                                 | 149 |
| 2.3.3. Эксперименты                                                        | 149 |
| 2.4. Обмен импульсами                                                      | 152 |
| 2.4.1. Сечение передачи импульса                                           | 152 |
| 2.4.2. Частоты передачи импульса                                           | 158 |
| 2.4.3. Диаграмма обмена импульсом                                          | 160 |
| 2.5. Силы, действующие на частицы                                          | 164 |
| 2.5.1. Сила ионного увлечения                                              | 164 |
| 2.5.2. Другие силы                                                         | 178 |
| 2.6. Температура поверхности частиц                                        | 180 |
| <b>3. Динамика частиц</b>                                                  | 195 |
| <i>А. В. Ивлев</i>                                                         |     |
| 3.1. Вертикальные колебания в приэлектродном слое высокочастотного разряда | 195 |
| 3.2. Негамильтонова динамика                                               | 197 |
| 3.2.1. Роль вариаций заряда                                                | 197 |
| 3.2.2. Роль кильватерного потенциала                                       | 200 |
| 3.3. Кинетика ансамблей частиц с переменным зарядом                        | 203 |
| <b>4. Волны и неустойчивости</b>                                           | 209 |
| <i>А. В. Ивлев, С. А. Храпак</i>                                           |     |
| 4.1. Методика возбуждения колебаний                                        | 210 |
| 4.2. Волны в идеальной (газообразной) комплексной плазме                   | 211 |
| 4.2.1. Основные ветви колебаний                                            | 213 |
| 4.2.2. Затухание и неустойчивости                                          | 216 |

|                                                                                                                        |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 4.3. Волны в сильно неидеальной (жидкостной) комплексной плазме . . . . .                                              | 221     |
| 4.3.1. Продольные волны . . . . .                                                                                      | 223     |
| 4.3.2. Поперечные волны . . . . .                                                                                      | 224     |
| 4.4. Волны в плазменных кристаллах . . . . .                                                                           | 225     |
| 4.4.1. Одномерные цепочки . . . . .                                                                                    | 225     |
| 4.4.2. Двухмерная треугольная решетка . . . . .                                                                        | 225     |
| 4.4.3. Трехмерные плазменные кристаллы . . . . .                                                                       | 230     |
| 4.4.4. Неустойчивости в плазменных кристаллах . . . . .                                                                | 231     |
| 4.5. Нелинейные волны . . . . .                                                                                        | 232     |
| 4.5.1. Ионные солитоны и ударные волны . . . . .                                                                       | 233     |
| 4.5.2. Пылевые солитоны и ударные волны . . . . .                                                                      | 234     |
| 4.5.3. Конусы Маха . . . . .                                                                                           | 237     |
| <br><b>5. Исследование кинетических процессов в конденсированных средах<br/>с помощью комплексной плазмы . . . . .</b> | <br>248 |
| <i>А. В. Ивлев, Г. Е. Морфилл и С. А. Храпак</i>                                                                       |         |
| 5.1. Фазовая диаграмма комплексной плазмы . . . . .                                                                    | 249     |
| 5.2. Сильно неидеальные жидкости . . . . .                                                                             | 254     |
| 5.2.1. Атомарная динамика в жидкостях . . . . .                                                                        | 254     |
| 5.2.2. Кинетика стабильных сдвиговых потоков . . . . .                                                                 | 258     |
| 5.2.3. Кинетика теплопереноса . . . . .                                                                                | 262     |
| 5.2.4. Гидродинамика в пределе дискретности . . . . .                                                                  | 265     |
| 5.2.5. Жидкости в ограниченном пространстве . . . . .                                                                  | 270     |
| 5.2.6. Электрореологические жидкости . . . . .                                                                         | 274     |
| 5.3. Твердые тела . . . . .                                                                                            | 278     |
| 5.3.1. Динамика кристаллов на атомарном уровне . . . . .                                                               | 278     |
| 5.3.2. Скейлинговые соотношения при двумерной кристаллизации . . . . .                                                 | 280     |
| 5.3.3. Динамика дислокаций . . . . .                                                                                   | 284     |
| 5.3.4. Трехмерная кристаллизация . . . . .                                                                             | 287     |
| <br><b>6. Пылевая плазма в Солнечной системе . . . . .</b>                                                             | <br>301 |
| <i>М. Хораньи, О. Хавнес, Г. Е. Морфилл</i>                                                                            |         |
| 6.1. Введение . . . . .                                                                                                | 301     |
| 6.2. Серебристые облака . . . . .                                                                                      | 301     |
| 6.3. Кольца планет . . . . .                                                                                           | 306     |
| 6.3.1. Упрощенная динамика . . . . .                                                                                   | 306     |
| 6.3.2. Кольцо Е Сатурна . . . . .                                                                                      | 309     |
| 6.3.3. Спицы . . . . .                                                                                                 | 312     |
| 6.4. Поверхность Луны . . . . .                                                                                        | 317     |

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.1. Визуализация                                                             | 318        |
| 6.4.2. Измерения плазмы и электрического поля                                   | 319        |
| 6.4.3. Измерения пыли                                                           | 322        |
| 6.4.4. Пылевое окружение Луны                                                   | 324        |
| 6.5. Заключение.                                                                | 325        |
| <b>7. Численное моделирование комплексной плазмы</b>                            | <b>334</b> |
| <i>Б. А. Клунов, О. С. Ваулина</i>                                              |            |
| 7.1. Метод молекулярной динамики: базовые понятия                               | 334        |
| 7.1.1. Методы моделирования динамики пылевых частиц                             | 334        |
| 7.1.2. Уравнения движения пылевых частиц                                        | 335        |
| 7.1.3. Параметры масштабирования уравнений движения                             | 338        |
| 7.2. Численное моделирование пространственной корреляции пылевых частиц         | 339        |
| 7.2.1. Парные и трехчастичные корреляционные функции                            | 339        |
| 7.2.2. Парные корреляционные функции и фазовое состояние пылевой подсистемы     | 345        |
| 7.3. Транспортные свойства комплексной плазмы: численный анализ                 | 347        |
| 7.3.1. Микроскопический транспорт частиц в неидеальных средах                   | 347        |
| 7.3.2. Диффузия                                                                 | 350        |
| 7.3.3. Вязкость                                                                 | 354        |
| 7.4. Комплексная плазма в узких каналах                                         | 356        |
| 7.4.1. Двумерная комплексная плазма в узких каналах                             | 356        |
| 7.4.2. Трехмерная комплексная плазма в узких каналах                            | 360        |
| 7.5. Волны кристаллизации в комплексной плазме                                  | 368        |
| 7.5.1. Определение локального порядка для трехмерных систем                     | 373        |
| 7.5.2. Трехмерная комплексная плазма в разряде постоянного тока                 | 376        |
| 7.5.3. Трехмерная комплексная плазма на борту международной космической станции | 378        |
| 7.5.4. Особенности плавления двумерных систем на примере системы Юкавы          | 381        |
| 7.6. О роли микрочастиц в кометной комплексной плазме                           | 393        |
| 7.7. Электроотрицательная комплексная плазма                                    | 400        |
| <b>8. Оптическая диагностика комплексной плазмы</b>                             | <b>412</b> |
| <i>О. Ф. Петров и О. С. Ваулина</i>                                             |            |
| 8.1. Введение.                                                                  | 412        |
| 8.2. Измерения рассеяния и поглощения света                                     | 412        |
| 8.2.1. Теория Ми                                                                | 413        |
| 8.2.2. Определение размера, концентрации и показателя преломления частиц        | 414        |
| 8.3. Спектральные методы определения параметров частиц.                         | 418        |

|                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.1. Температура частиц . . . . .                                                             | 418        |
| 8.3.2. Спектрометрический метод определения размера и показателя преломления частиц . . . . .   | 422        |
| 8.3.3. Одновременное определение размера, показателя преломления и температуры частиц . . . . . | 423        |
| 8.3.4. Влияние частиц на определение температуры газа . . . . .                                 | 424        |
| <b>9. Приложения пылевой плазмы . . . . .</b>                                                   | <b>427</b> |
| <i>В. Е. Фортон, А. Г. Храпак, С. В. Владимиров</i>                                             |            |
| 9.1. Технологические и промышленные аспекты . . . . .                                           | 427        |
| 9.2. Пыль в термоядерных реакторах . . . . .                                                    | 431        |
| 9.3. Ядерные фотогальванические электрические элементы (батареи) . . . . .                      | 433        |
| Предметный указатель . . . . .                                                                  | 439        |