

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

С. Ю. Лукьянов      Н. Г. Ковальский

# ГОРЯЧАЯ ПЛАЗМА И УПРАВЛЯЕМЫЙ ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

*Допущено*

*Государственным комитетом РФ  
по высшему образованию  
в качестве учебника  
для студентов вузов,  
обучающихся по специальности  
"Ядерная физика"*

**МИФИ**

Москва 1999

УДК 539.19

Л84

Лукьянов С. Ю., Ковальский Н. Г. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: МИФИ, 1999. — 432 с.

Настоящий учебник содержит описание вопросов физики горячей плазмы в связи с наиболее важным и интересным применением этой науки — управляемым синтезом легких ядер. В книге опущены громоздкие выводы формул, основное внимание уделено описанию экспериментальных фактов, позволяющих получить ясное и полное представление об этой стремительно развивающейся области знаний. Приводимые методы исследования плазмы в достаточной мере универсальны и находят широкое применение далеко за пределами проблем, которым посвящен учебник.

Последовательно изложены общие сведения о плазме, классификация видов плазмы в природных и лабораторных условиях, основные идеи реализации управляемого термоядерного синтеза и его место в энергетике будущего. Рассмотрены главные пути исследования и подходы к осуществлению термоядерного синтеза с положительным энергетическим выходом как с использованием принципа магнитной термоизоляции плазмы, так и в системах с инерционным удержанием.

Учебник адресован студентам старших курсов, аспирантам и преподавателям высших учебных заведений физического и физико-технического профиля, а также специалистам, работающим в области физики плазмы и проблем энергетики.

Рецензенты: В. Е. Голант, В. Д. Шафранов

ISBN 5-7262-0234-1

Л 1604080000-035 без объявл.  
1К9(03)-95

© Лукьянов С. Ю.,  
Ковальский Н. Г., 1999 г.

© Московский  
государственный  
инженерно-физический  
институт (технический  
университет), 1999 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Общие сведения о плазме . . . . .</b>	<b>5</b>
§ 1. Что такое плазма. Параметры плазмы. Квазинейтральность, дебаевский радиус, плазменная частота . . . . .	5
§ 2. Классификация видов плазмы. Плазма в природных условиях . . . . .	12
§ 3. Демографический взрыв и энергетические ресурсы Земли. Место управляемого синтеза в решении проблем энергетики будущего . . . . .	21
§ 4. Управляемый синтез легких ядер . . . . .	27
§ 5. Критерии реализации термоядерного синтеза с положительным энергетическим выходом . . . . .	47
<b>Глава II. Плазма в одночастичном приближении. Процессы переноса . . . . .</b>	<b>62</b>
§ 6. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Дрейфовое приближение . . . . .	62
§ 7. Поперечный и продольный адиабатический инвариант . . . . .	67
§ 8. Радиационные пояса планет. Геофизический эксперимент . . . . .	73
§ 9. Кулоновское взаимодействие частиц в плазме . . . . .	84
§ 10. Проводимость полностью ионизованной плазмы . . . . .	94
§ 11. Диффузия и теплопроводность плазмы в магнитном поле . . . . .	105
<b>Глава III. Колебания и волны в плазме . . . . .</b>	<b>124</b>
§ 12. Ленгмюровские колебания плазмы. Затухание Ландау . . . . .	124
§ 13. Колебания и волны в плазме при наличии магнитного поля. Альфвеновские волны . . . . .	140
<b>Глава IV. Вопросы устойчивости плазмы . . . . .</b>	<b>156</b>
§ 14. Магнитогидродинамические неустойчивости . . . . .	156
§ 15. Кинетические неустойчивости плазмы . . . . .	167
<b>Глава V. Диагностика плазмы. Электротехнические методы исследования горячей плазмы . . . . .</b>	<b>175</b>
§ 16. Общие вопросы плазменной диагностики. Требования к пространственному и временному разрешению . . . . .	175
§ 17. Регистрация токов и напряжений в плазме . . . . .	181
§ 18. Электрические зонды . . . . .	186
§ 19. Магнитные зонды . . . . .	195
<b>Глава VI. Спектроскопия горячей плазмы . . . . .</b>	<b>200</b>
§ 20. Интегральное излучение плазмы. Радиационные потери . . . . .	200
§ 21. Регистрация и анализ непрерывного спектра. Определение электронной температуры, плотности и эффективного заряда плазмы . . . . .	206
§ 22. Линейчатый спектр. Определение $T_e$ из относительной интенсивности спектральных линий . . . . .	215
§ 23. Анализ контура спектральной линии . . . . .	225
<b>Глава VII. Зондирование плазмы электромагнитным излучением . . . . .</b>	<b>248</b>
§ 24. Сверхвысокочастотная диагностика горячей плазмы . . . . .	248
§ 25. Лазерные методы исследования плазмы . . . . .	257
<b>Глава VIII. Открытые магнитные ловушки . . . . .</b>	<b>275</b>
§ 26. Основные этапы и перспективы исследований . . . . .	275
§ 27. Удержание плазмы в открытых ловушках. Равновесие и устойчивость . . . . .	280
§ 28. Результаты важнейших экспериментов . . . . .	292

Глава IX. Замкнутые магнитные системы	304
§ 29. Тороидальные магнитные системы. Общие вопросы	304
§ 30. Эксперименты на токамаке в режиме омического нагрева	313
§ 31. Альтернативные методы нагрева плазмы в тороидальных системах	324
§ 32. Стелларатор	333
Глава X. Импульсные системы	349
§ 33. Прямые самостягивающиеся разряды	349
§ 34. Нейтронное и жесткое рентгеновское излучение Z-пинчей	367
§ 35. Импульсные системы с пинчевыми плазменными структурами	379
Глава XI. Системы с инерционным удержанием плазмы	391
§ 36. Основные идеи и возможности реализации управляемого термоядерного синтеза при инерционном удержании плазмы	391
§ 37. Физика взаимодействия мощных лазерных пучков с мишенями	397
§ 38. Результаты и перспективы экспериментальных исследований	414