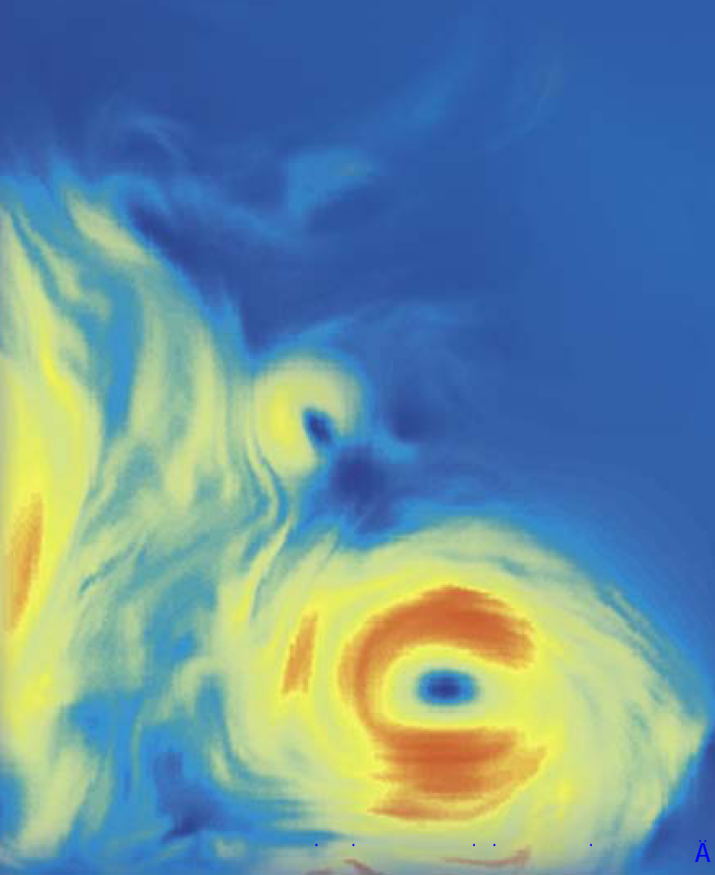


С. Ф. Гаранин

Физические процессы в системах МАГО-МТФ



ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики»

С. Ф. Гаранин

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В СИСТЕМАХ МАГО-MTF**

Саров
2012

УДК 533.95
ББК 22.333
Г20

Гаранин С. Ф.

Физические процессы в системах МАГО-МТФ. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. – 343 с.: ил.

ISBN 978-5-9515-0184-4

Монография посвящена теоретическому рассмотрению физических эффектов, наиболее существенных для альтернативного подхода к решению проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС): подхода МАГО-МТФ. Книга содержит описание самого подхода, его отличия от основных систем УТС с магнитным и инерционным удержанием. Рассмотрены общие физические методы расчетов процессов в этом подходе, включая явления переноса и излучение плазмы, теория поперечных бесстолкновительных ударных волн, теория поверхностных разрядов, важная в этом направлении исследований. Рассмотрены также различные течения и магнитогидродинамические неустойчивости плазмы, возникающие в рамках этого подхода. В силу общефизического смысла рассматриваемых явлений представленные результаты могут быть применены к широкому кругу явлений в физике плазмы и гидродинамике.

Книга рассчитана на специалистов в области физики плазмы и гидродинамики, аспирантов и студентов-физиков старших курсов.

ISBN 978-5-9515-0184-4

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Список литературы к введению	12
Глава 1. Системы МАГО-МТГ	14
1.1. Схемы формирования плазмы	14
1.1.1. Z-пинч на криогенных нитях	14
1.1.2. Плазменная камера МАГО	15
1.1.3. Конфигурации с обращенным полем (FRC)	27
1.2. Драйверы для разгона лайнеров	29
Список литературы к главе 1	31
Глава 2. Физические процессы и методы расчетов	35
2.1. Основные физические процессы	35
2.2. Кинетический подход	38
2.3. Магнитогидродинамический (МГД) подход	39
2.3.1. Уравнения и условия применимости магнитной гидродинамики	39
2.3.2. Уравнения состояния	45
2.3.3. Кинетические коэффициенты плазмы. Электропроводность многократно ионизованной неидеальной плазмы	48
2.4. Излучение плазмы	53
2.4.1. Скорость обмена энергией между планковским излучением и водородной термодинамически равновесной плазмой	54
2.4.2. Рекомбинационное и тормозное излучение многократно ионизованной плазмы	60
2.4.3. Линейчатое излучение многократно ионизованной термодинамически равновесной плазмы	62
2.4.4. Линейчатое излучение многозарядных примесей плазмы по корональной модели. Статистическое рассмотрение	70
Список литературы к главе 2	83

Глава 3. Поперечные бесстолкновительные ударные волны (БУВ) и нагрев плазмы в них	87
3.1. Одномерное гибридное моделирование	90
3.1.1. Физическая модель	92
3.1.2. Результаты расчетов	94
3.2. Неустойчивость функции распределения ионов за фронтом БУВ. Эволюция функции распределения	101
3.2.1. Дисперсионное соотношение для колебаний вдоль магнитного поля	102
3.2.2. Квазилинейная диффузия функции распределения	105
3.3. Двумерное гибридное моделирование	107
3.3.1. Физическая модель	107
3.3.2. Постановка задачи	108
3.3.3. Результаты расчетов	109
3.4. Трехмерное моделирование	119
3.5. БУВ с двумя сортами ионов	120
3.5.1. Решение стационарной задачи	121
3.5.2. Результаты одномерных расчетов в гибридной модели	130
Список литературы к главе 3	134

Глава 4. Эффект Холла, дрейфовые потоки и приэлектродные плазменные течения	137
4.1. Динамика проникновения магнитного поля в замагниченную плазму	137
4.2. Отрывающие прианодные течения замагниченной плазмы	143
4.2.1. Прианодное течение плазмы, возникающее под действием магнитного поршня	145
4.2.2. Прианодное течение, возникающее под действием жесткого идеально проводящего поршня	149
4.3. Приэлектродные слои, возникающие при ускорении замагниченной плазмы	152
4.3.1. МГД подход	153

4.3.2. Кинетический подход в случае бесстолкновительной замагниченной плазмы	169
4.4. Роль дрейфов в замагниченной плазме системы МАГО	175
4.4.1. Роль бесстолкновительных потерь в плазме МАГО	176
4.4.2. Удержание α -частиц в магнитном поле	177
Список литературы к главе 4	178

Глава 5. Поверхностные разряды в сильных

магнитных полях	181
5.1. Диффузия сильного магнитного поля в плазму или изолятор	183
5.1.1. Диффузия магнитного поля в водородную плазму при малых временах	187
5.1.2. Стадия стационарного разряда	191
5.1.3. Диффузия магнитного поля, сопровождаемая лучистой теплопроводностью	195
5.2. Диффузия мегагауссных полей в металл	198
5.2.1. Постановка одномерной задачи	201
5.2.2. Результаты расчетов открытой системы для постоянного магнитного поля на границе	205
5.2.3. Влияние граничных условий по излучению на структуру скин-слоя	208
5.2.4. Влияние плавного нарастания магнитного поля на структуру скин-слоя	209
5.3. Разряд, возникающий при вытекании магнитного потока из плазмы в изолятор	212
5.4. Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой	219
5.4.1. Остывание плотной плазмы	221
5.4.2. Шунтирующий разряд по парам металла	226
5.5. Стационарный разряд при выходе магнитного потока через поверхность изолятора	230
5.5.1. Разряд, поддерживаемый излучением	234

5.5.2. Разряд, поддерживаемый электронной теплопроводностью	243
Список литературы к главе 5	254

Глава 6. Магнитогидродинамические (МГД)

неустойчивости и их влияние на плазму и ее сжатие

6.1. Развитие неустойчивости согласно линейной теории ...	256
6.1.1. Неустойчивость тангенциального разрыва в холодной плазме с магнитным полем, перпендикулярным скачку скорости	256
6.1.2. Конвективная неустойчивость в азимутальном магнитном поле при наличии ускорения	266
6.2. Нелинейное развитие неустойчивостей	270
6.2.1. Нелинейная стадия неустойчивости Z-пинча	271
6.2.2. Движение периферийной плазмы за перетяжкой Z-пинча	282
6.2.3. Автомодельное развитие неустойчивости Рэлея – Тейлора в районе угловых точек	288
6.3. МГД турбулентность и МГД турбулентные механизмы остывания плазмы	301
6.3.1. Поведение двумерных МГД вихревых течений поперек магнитного поля в ограниченной области	301
6.3.2. Конвективное охлаждение плазмы при ее двумерном турбулентном движении в магнитном поле	317
6.3.3. Смытие плазмой вещества со стенок в камере МАГО	322
6.3.4. Моделирование сжатия плазмы МАГО схлопывающимся лайнером с учетом конвекции	331
Список литературы к главе 6	338

10. Герлах Н. И., Зуева Н. М., Соловьев Л. С. О развитии МГД неустойчивости в z -пинче. Препринт № 83. М.: ИПМ, 1979.
11. Трубников Б. А. О неустойчивости цилиндра плазмы // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. С. 289–298.
12. *Kruskal M., Schwarzschild M.* Some instabilities of a completely ionized plasma // *Proc. Roy. Soc. A.* 1954. Vol. 223. P. 348–360.
13. Шафранов В. Д. Об устойчивости цилиндрического газового проводника в магнитном поле // Атомная энергия. 1956. № 5. С. 38.
14. Вихрев В. В., Брагинский С. И. Динамика Z -пинча // Вопросы теории плазмы: Сб. статей / Под ред. М. А. Леонтовича. М.: Атомиздат, 1980. Вып. 10. С. 243–318.
15. Дьяченко В. Ф., Имшенник В. С. Двумерная магнитогидродинамическая модель плазменного фокуса Z -пинча // Там же. 1974. Вып. 8. С. 164–246.
16. *Book D. L., Ott E., Lampe M.* Nonlinear evolution of the sausage instability // *Phys. Fluids.* 1976. Vol. 19. P. 1982.
17. Трубников Б. А., Жданов С. К. Обрыв перетяжек на плазменных пинчах с током // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 292.
18. Гаранин С. Ф., Чернышев Ю. Д. Нелинейная стадия неустойчивости Z -пинча // Физика плазмы. 1987. Т. 13, № 8. С. 974–980.
19. *Lewis D. J.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. II // *Proc. Roy. Soc. A.* 1950. Vol. 202. P. 81–96.
20. *Garabedian P. B.* On steady-state bubbles generated by Taylor instability // *Ibid.* 1957. Vol. 241. P. 423–431.
21. *Baker G. R., Meiron D. I., Orszag S. A.* Vortex simulations of the Rayleigh–Taylor instability // *Phys. Fluids.* 1980. Vol. 23. P. 1485.
22. Жданов С. К., Трубников Б. А. К теории ускорительных явлений, сопровождающих обрыв перетяжек плазменного пинча // ЖЭТФ. 1986. Т. 90, № 4. С. 1380–1391.
23. Гаранин С. Ф., Мамышев В. И. Движение периферийной плазмы за перетяжкой Z -пинча // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1989. Вып. 1. С. 23–26.

24. *Taylor G. I.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // *Proc. Roy. Soc. A.* 1950. Vol. 201, N 1065. P. 192–196.

25. *Birkhoff G., Carter D.* Rising plane bubbles // *J. Math. Mech.* 1957. Vol. 6, N 6. P. 769.

26. *Gardner C. L., Glimm J., McBryan O. et al.* The dynamics of bubble growth for Rayleigh-Taylor unstable interfaces // *Phys. Fluids.* 1988. Vol. 31, N 3. P. 447–465.

27. *Haan S. W.* Onset of nonlinear saturation for Rayleigh-Taylor growth in the presence of a full spectrum of modes // *Phys. Rev.* 1989. Vol. A39, N 11. P. 5812–5825.

28. *Волченко О. И., Жидов И. Г., Мешков Е. Е., Розачев В. Г.* Развитие локализованных возмущений на неустойчивой границе ускоряемого жидкого слоя // *Письма в ЖТФ.* 1989. Т. 15, № 1. С. 47–51.

29. *Гаранин С. Ф., Старцев А. И.* Численное моделирование нелинейного роста локализованных возмущений с углами при неустойчивости Рэлея – Тейлора // *ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика.* 1992. № 3. С. 6–9.

30. *Garanin S. F.* Self-similar evolution of Rayleigh-Taylor instability in the corner-point regions // *Proc. Fifth International Workshop on Compressible Turbulent Mixing* (R. Young, J. Glimm, and B. Boston, eds.). Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific. 1995. P. 33–39.

31. *Гаранин С. Ф.* Автомодельное развитие неустойчивости Рэлея – Тейлора в районе угловых точек // *ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика.* 1995. Вып. 3/1. С. 12–17.

32. *Вихрев В. В., Иванов В. В., Розанова Г. А.* Развитие перетяжек при наличии коротковолнового возмущения границы z -пинча // *Физика плазмы.* 1989. Т. 15, № 1. С. 77–82.

33. *Брагинский С. И.* Явления переноса в плазме // *Вопросы теории плазмы: Сб. статей / Под ред. М. А. Леонтовича.* М.: Атомиздат, 1963. Вып. 1. С. 183–272.

34. *Данилов С. Д., Гурарий Д.* Квазидвумерная турбулентность // *УФН.* 2000. Т. 170, № 9. С. 921–968.

35. *Garanin S. F., Burenkov O. M., Ivanova G. G. et al.* Relaxation of a 2D MHD flow transvers to a magnetic field in a bounded domain // Dig. Tech. Papers, Pulsed Power Plasma Science – 2001 (R. Reinovsky and M. Newton, eds.). Las Vegas, Nevada, USA. 2001. Vol. 1. P. 512–515.

36. *Гаранин С. Ф., Амеличева О. А., Буренков О. М. и др.* Релаксация двумерного магнитогидродинамического течения поперек магнитного поля (двумерного гидродинамического течения) в ограниченной области // ЖЭТФ. 2003. Т. 124, № 1(7). С. 70–79.

37. *Гаранин С. Ф., Кравец Е. М., Пронина О. Н. и др.* Поведение двумерного вихревого течения в ограниченной области // Доклад на XI Харитоновских тематических научных чтениях «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». г. Саров, Нижегородская обл., Россия, 2009.

38. *Kraichnan R. H.* Inertial ranges in two-dimensional turbulence // Phys. Fluids. 1967. Vol. 10, N 7. P. 1417–1423.

39. *Chertkov M.* Phenomenology of Rayleigh-Taylor turbulence // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91, N 11. P. 115001(4).

40. *Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Городничев А. В. и др.* Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 1. С. 20–28.

41. *Garanin S. F., Ivanova G. G., Mamyshev V. I., Sofronov V. N.* Convective cooling of plasma during its 2D turbulent flow in magnetic field // Proc. X Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, 2004. (M. von Ortenberg, ed.). Humboldt University, Berlin, Germany – VNIIEF, Sarov, Russia. 2005. P. 380–383.

42. *Clercx H. J. H., van Heijst G. J. F.* Dissipation of kinetic energy in two-dimensional bounded flows // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 65. P. 066305(4).

43. *Lindemuth I. R., Pettibone J. S., Stevens J. C. et al.* Unstable behavior of hot, magnetized plasma in contact with a cold wall // Phys. Fluids. 1978. Vol. 21, N 10. P. 1723–1734.

44. *Garanin S. F., Mamyshev V. I., Yakubov V. B.* Assessment of effects resulting in plasma pollution with wall material in MAGO cham-

ber // Proc. IX Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Moscow-St. Petersburg, 2002. (V. D. Selemir and L. N. Plyashkevich, eds.). Sarov: VNIIEF, 2004. P. 684–688.

45. *Garanin S. F., Mamyshev V. I., Palagina E. M.* Calculations of wall-material washout by plasma in MAGO chamber // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. Vol. 34, N 5. P. 2268–2273.

46. *Бахрах С. М., Мохов В. Н., Певницкий А. В. и др.* Движение продуктов взрыва и стенок цилиндрического канала при сильном взрыве // ФГВ. 1977. Т. 13, № 2. С. 302–305.

47. *Garanin S. F., Mamyshev V. I., Palagina E. M.* Wall material washout by plasma during its 2D flow in magnetic field // Proc. X Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. (M. von Ortenberg, ed.). Humboldt University, Berlin, Germany – VNIIEF, Sarov, Russia. 2004. P. 409–412.

48. *Chernyshev V. K., Mokhov V. N., Buzin V. N. et al.* Study of high energy liner compression in HEL-1 experiment // Dig. Tech. Papers, Proc. XI IEEE Int. Pulsed Power Conf. (G. Cooperstein and I. Vitkovitsky, eds.). 1997. P. 566–572.

49. *Buyko A. M., Garanin S. F., Ivanova G. G. et al.* Modeling of MAGO plasma compression by imploding liner // Dig. Tech. Papers, XII IEEE Int. Pulsed Power Conf. (C. Stallings and H. Kirbie, eds.). Monterey, California, USA, 1999. Vol. 2. P. 1052–1055.

50. *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

Научное издание

Гаранин Сергей Флорович

**Физические процессы
в системах МАГО-MTF**

Редактор *Л. В. Мазан*

Корректор *Н. Ю. Костюничева*

Компьютерная подготовка оригинала-макета

М. С. Мещерякова

Подписано в печать 01.02.2012. Формат 60×84/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. ~20. Уч. изд. л. ~20.

Тираж 300 экз. Зак. тип. 1647-2011

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, г. Саров Нижегородской обл.