

только омического нагрева плазмы, при котором P_H изменяется незначительно. Эта особенность допускает, однако, простую физическую интерпретацию. Учитывая, что $\tau_E = W/P_H$, где W — тепловая энергия плазмы, можно исключить P_H из правой части выражения для $\tau_{E,98}$ и получить его в новой записи:

$$\tau_{E,98} \sim \left(\frac{1}{\beta_T}\right)^{1,7} V^{1/2} B_T^{0,6},$$

где V — объём плазмы, β_T — отношение давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля $B_T^2/8\pi$ — второй важнейший параметр, характеризующий удержание горячей плазмы в токамаке. Скорее всего, возрастание именно этого параметра, т.е. энергии нагреваемой плазмы, является ответственным за деградацию $\tau_{E,98}$ по мере увеличения P_H . Очевидно, что оптимизация этого параметра станет одной из основных задач экспериментальной программы ИТЭР, тем более, что от этого прямо зависит коммерческая привлекательность токамака как реактора.

Если же β_T оставить на запланированном уровне (1,5%), то коммерчески эффективным может оказаться использование токамака как реактора-бридера — "дожигателя" отходов традиционной атомной энергетики. Расчёты показывают, например, что введение в термоядерный реактор, аналогичный ИТЭРу, ториевого (^{232}Th) blankets позволило бы получить электрическую мощность до 1 ГВт и вырабатывать в год до 2 т ^{233}U — горючего для атомной энергетики. Такого количества ^{233}U могло бы хватить для производства ещё 2 ГВт электрической мощности. (Заметим, что электрическая мощность 3 ГВт примерно соответствует половине мощности Красноярской ГЭС.) Таковы ставки. При этом очевидно — путь от ИТЭРа до коммерчески эффективных энергосистем потребует усилий и времени не меньшего, чем, скажем, переход от первых атомных реакторов Ферми и Курчатова до современных промышленных гигантов. Но сделан первый, психологически самый трудный, шаг: установлено — это физически возможно.

Мы горды тем, что первая физическая термоядерная реакция была осуществлена в конце 1960-х — начале 1970-х годов в нашей стране, на наших токамаках. Что мировая наука подхватила и развила эту идею (см. рис. 1, 5). Что теория поведения термоядерной плазмы в токамаках была в основном создана нашими учёными и с энтузиазмом была также воспринята и развита за рубежом. Одна из лидирующих ролей в этом общемировом процессе принадлежала Борису Борисовичу Кадомцеву.

Список литературы

1. Кадомцев Б Б *Избранные труды* (М.: Физматлит, 2003)
2. Кадомцев Б Б *Динамика и информация* 2-е изд. (М.: Редакция журнала "Успехи физических наук", 1999)
3. Кадомцев Б Б *УФН* **173** 1221 (2003) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **46** 1183 (2003)]
4. Кадомцев Б Б, Питаевский Л П *УФН* **167** 1133 (1997) [Kadomtsev B B, Pitaevskii L P *Phys. Usp.* **40** 1081 (1997)]
5. Кадомцев Б Б, Кадомцев М Б *УФН* **167** 649 (1997) [Kadomtsev B B, Kadomtsev M B *Phys. Usp.* **40** 623 (1997)]
6. Кадомцев Б Б, Кадомцев М Б *УФН* **166** 651 (1996) [Kadomtsev B B, Kadomtsev M B *Phys. Usp.* **39** 609 (1996)]
7. Кадомцев Б Б *УФН* **165** 967 (1995) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **38** 923 (1995)]

8. Кадомцев Б Б *УФН* **164** 449 (1994) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **37** 425 (1994)]
9. Кадомцев Б Б *УФН* **91** 381 (1967) [Kadomtsev B B *Sov. Phys. Usp.* **10** 127 (1967)]
10. Арцимович Л А *УФН* **91** 365 (1967) [Artsimovich L A *Sov. Phys. Usp.* **10** 117 (1967)]
11. Кадомцев Б Б, Погуде О П *ЖЭТФ* **53** 2025 (1967) [Kadomtsev B B, Pogutse O P *Sov. Phys. JETP* **26** 1146 (1967)]
12. Janicki C et al. *Nucl. Fusion* **30** 950 (1990)
13. Kadomtsev B B, Pogutse O P, in *Proc. of the 6th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 1973*, Vol. 1, p. 59

PACS numbers: **01.65. + g**, **28.52. – s**, 52.55.Hc
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200907g.0772

Современный статус стеллараторной программы

Л.М. Коврижных

1. Введение

В этом докладе даётся краткий обзор мировой стеллараторной программы, т.е. программы исследований, ставящей целью создание управляемого термоядерного реактора на базе магнитной ловушки стеллараторного типа. Обсуждаются основные этапы её развития, современное состояние и планы дальнейших исследований. Желая сделать излагаемый материал более доступным для широкого круга слушателей (читателей), автор позволил себе, по возможности, не приводить каких-либо математических формул и экспериментальных графиков. Это не могло не сказаться на точности некоторых утверждений и формулировок, за что автор приносит извинения специалистам.

2. Возникновение стеллараторной программы и основные этапы ее развития

Исследования возможности использования управляемого термоядерного синтеза (УТС) в качестве источника энергии начались практически одновременно в Советском Союзе и в США примерно в 1951 г. Однако до 1958 г. эти работы велись под грифом "секретно", и их результаты стали известны научной общественности только после II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, сентябрь 1958 г.). В СССР исследования велись (в основном) на установках типа токамак, предложенных И.Е. Таммом и А.Д. Сахаровым, а в США — на системах стеллараторного типа, разработанных астрофизиком Л. Спитцером (L. Spitzer), профессором Принстонского университета.

Согласно легенде Л. Спитцер находился в отпуске, катаясь на горных лыжах, когда прочёл отчёт, в котором сообщалось, что в Аргентине некий Р. Рихтер успешно продемонстрировал возможность управляемого термоядерного синтеза. Естественно, подобная новость возбудила научное сообщество, и вскоре после возвращения в Принстон Л. Спитцер с коллегами разработал программу работ по изучению возможности осуществления УТС и предложил экспериментальную установку для его реализации. Эта установка, представляющая собой, так же как и токамак, тороидальную магнитную ловушку, получила название "стелларатор" (от англ. stellar — звёздный). Предлагаемая подобную систему, Спитцер исхо-

дил, по-видимому, из следующих соображений: 1) магнитные силовые линии не должны выходить из замкнутого объёма (топологического тора); 2) они должны лежать на поверхностях вложенных друг в друга тороидов; 3) угол прокручивания силовой линии не должен быть слишком мал (углом прокручивания, или углом вращательного преобразования, называют угол, на который поворачивается силовая линия по малому азимуту тора при её полном обороте вокруг главной оси тора); 4) система должна допускать возможность работы в стационарном режиме.

Обе указанные установки (токамак и стелларатор) удовлетворяют этим требованиям, за исключением последнего пункта, но в токамаке магнитные поверхности, являющиеся поверхностями постоянного давления плазмы, возникают из-за наличия омического тока, протекающего по плазме, а в стеллараторе они создаются с помощью системы внешних проводников с током, специальным образом уложенных на вакуумной камере. Эти токи и создают вращательное преобразование, необходимое для компенсации тороидального дрейфа частиц и удержания их внутри замкнутого объёма (тороида). Заметим, что последнее требование весьма существенно, так как промышленный источник электроэнергии должен, очевидно, работать в непрерывном режиме, а для токамака обеспечение стационарного режима представляется довольно сложной задачей, поскольку омический ток, создающий магнитное поле, которое обеспечивает равновесие плазмы, создаётся вихревым электрическим полем. Для стелларатора этой проблемы нет, так как его магнитное поле создаётся внешними проводниками, которые могут быть сверхпроводящими и питаться от обычного генератора тока.

В Принстонской лаборатории физики плазмы (PPPL) была разработана и создана серия стеллараторов — установок, получивших названия моделей А, В, С, а также был разработан (но не осуществлён!) проект модели D, на котором предполагалось продемонстрировать управляемую термоядерную реакцию.

Но эксперименты на последней модели, стеллараторе С, к сожалению, закончились неудачей. Вопреки ожиданиям и теоретическим оценкам время жизни плазмы в системе оказалось очень коротким, тогда как эксперименты на советском токамаке Т-3 продемонстрировали весьма эффективный нагрев плазмы и её достаточно хорошее удержание. В результате в 1969 г. стеллараторные исследования в США были прекращены, стелларатор С был переделан в токамак и началось триумфальное шествие токамаков по миру (как шутил тогдашний директор PPPL Г. Фюрс (H. Furth), "каждая домашняя хозяйка в Америке захотела иметь в доме свой маленький токамак").

Такое интенсивное развитие токамаков отрицательно сказалось на финансировании и общем развитии стеллараторной программы. Однако, несмотря на возросший скептицизм в отношении стеллараторных систем и некоторое падение интереса к ним со стороны мирового термоядерного сообщества, в СССР (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФАН), Харьковский физико-технический институт (ХФТИ)¹), ФРГ и

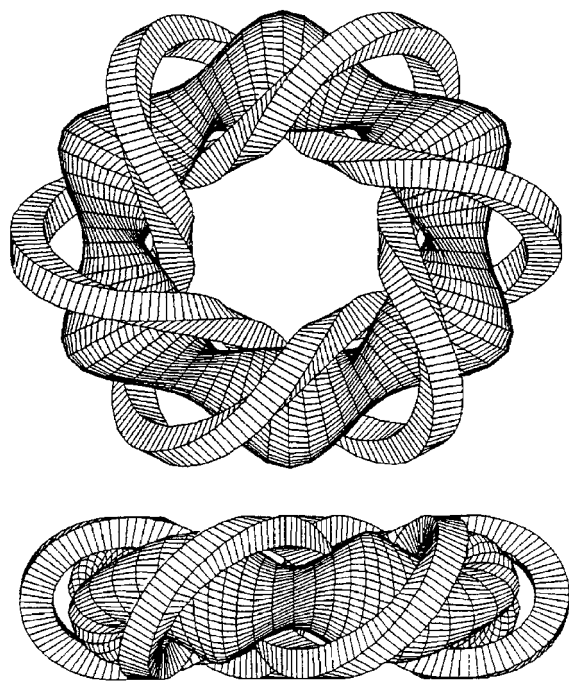


Рис. 1. Винтовые проводники, создающие магнитное поле, и форма магнитных поверхностей стелларатора ATF.

Японии стеллараторные исследования продолжались и вскоре привели к интересным и обнадеживающим результатам и, как следствие, к возобновлению в США стеллараторной программы и сооружению в Холифилдской национальной лаборатории² стелларатора ATF (Advanced Toroidal Facility) (Oak Ridge, 1988–1994 гг.). В то время это был самый крупный стелларатор с мощными источниками нагрева, позволявший непрерывно поддерживать разряд в течение одного часа, т.е. работать практически в стационарном режиме. Однако по не очень понятным причинам через шесть лет эксперименты на нём были прекращены, а установка была демонтирована, несмотря на целый ряд полученных на ней интересных результатов. Представление об этом стеллараторе можно получить из рис. 1, на котором показаны винтовые проводники, создающие магнитное поле, и форма удерживаемой плазмы, и рис. 2, на котором изображён общий вид установки.

Результаты исследований, проведённых в СССР, ФРГ и Японии, оказались весьма впечатляющими, что позволяет, на мой взгляд, рассматривать сейчас стеллараторную программу как вполне реальную альтернативу программе токамака. Эти результаты, как теоретические, так и экспериментальные, кратко можно сформулировать следующим образом.

3. Основные результаты теоретических работ

1. Разработаны основы неоклассической теории процессов переноса (Галеев, Сагдеев; Коврижных, 1967–1969 гг. [1, 2]). Эта теория предсказывает, что при высоких температурах, характерных для термоядерного реактора, время жизни плазмы в стеллараторах оказывается меньшим, чем в токамаках. Однако измеренные времена

¹ Приводятся современные названия этих научных учреждений.

² До 1975 г. — Ок-Риджская национальная лаборатория.

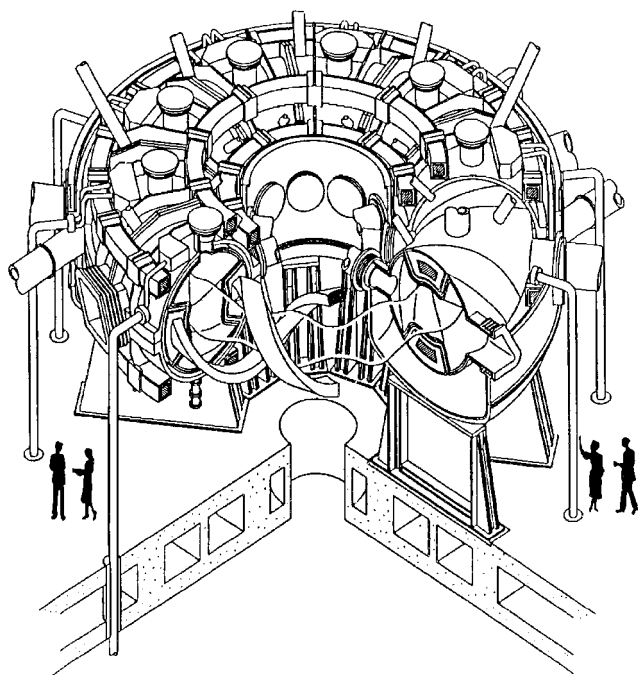


Рис. 2. Общий вид установки ATF.

жизни в токамаках и стеллараторах оказываются весьма близкими между собой, что указывает на существование ещё какого-то механизма потерь, общего для обеих этих систем.

II. Теоретически показана возможность уменьшения неоклассических коэффициентов переноса в стеллараторах (оптимизация) путём специального выбора внешних проводников, создающих винтовое магнитное поле (Коврижных, 1982 г. [3]). В последние годы идея оптимизации получила широкое распространение и для её разработки создаются специальные математические коды и используются мощные современные компьютеры (Nuhrenberg и др.).

III. Исследовано влияние возмущений магнитного поля на структуру магнитных поверхностей и показана возможность образования "магнитных островов", которые при определённых условиях могут приводить к сильному разрушению магнитных поверхностей (Коврижных, Морозов, Соловьев, 1961–1963 гг. [4, 5]). Эти работы показали, что для получения хороших магнитных поверхностей необходимо изготавливать токовые проводники с весьма высокой степенью точности.

IV. Получена упрощённая (усреднённая по винтовым гармоникам) система магнитогидродинамических уравнений для стеллараторов, обладающая, как и в случае токамаков, аксиальной симметрией, что позволило применить для стеллараторов методы, развитые ранее для токамаков (Коврижных, Шенетов; Strauss, 1980 г. [6, 7]).

V. Обнаружен эффект самостабилизации, позволяющий удерживать плазму в стеллараторах при достаточно высоких значениях β , достигающих 10 % ($\beta = 8pNT/B^2$, где N — плотность плазмы, T — её температура, B — индукция магнитного поля) (Коврижных, Шенетов, 1981 г. [8]). Этот результат весьма существен, поскольку одним из основных недостатков стелларатора, не позволявших ему претендовать на прообраз термоядерного реактора, являлось слишком малое по тогдашним представлениям критическое зна-

чение β , при превышении которого плазма становилась неустойчивой.

VI. Разработаны математические коды для расчёта магнитных поверхностей, равновесия плазмы и её устойчивости в различных весьма сложных магнитных конфигурациях (в основном зарубежными учёными).

Замечу, что, на мой взгляд, период конца 1970-х — начала 1980-х годов был особенно продуктивным для развития теории стеллараторов. Это были годы острых дискуссий и принципиальных споров, проходивших иногда в довольно резкой форме, весьма далёкой от "политкорректности", царящей на нынешних конференциях. Однако эти споры носили чисто научный характер и практически никогда не сказывались на личных взаимоотношениях учёных.

4. Важнейшие экспериментальные результаты

I. Разработаны методы измерения магнитных поверхностей, позволившие выяснить причины неудач на стеллараторе С. Скорее всего, они были связаны с плохим качеством (разрушением) магнитных поверхностей (ФИАН).

II. Показана возможность создания, нагрева и удержания плазмы в стеллараторах без омического тока.

III. Подтверждён эффект самостабилизации плазмы и осуществлён переход во вторую зону устойчивости (ATF).

IV. Разработаны и опробованы различные методы нагрева плазмы. Осуществлен режим стационарного удержания плазмы (длительность более 1 ч, ATF, LHD (Large Helical Device)).

V. На стеллараторе LHD достигнуты субтермоядерные параметры плазмы (но не одновременно!): $\beta = 4,5\%$, $N(0) = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T_i(0) = 13,5 \text{ кэВ}$, $T_e = 10 \text{ кэВ}$, $NT\tau = 4,4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3} \text{ с кэВ}$, $\tau > 0,02 \text{ с}$ (τ — время жизни горячей плазмы), длительность разряда 1 ч. Заметим, что для зажигания термоядерной реакции "тройное" произведение $NT\tau$ должно быть на полтора-два порядка больше.

5. Преимущества и недостатки стеллараторов

Сформулируем теперь преимущества и недостатки стеллараторов в сравнении с токамаками.

Преимущества стеллараторов:

- возможность работы в стационарном режиме;
- отсутствие весьма опасных для токамаков неустойчивостей срыва, причиной которых является омический ток;
- наличие естественного дивертора (специальной системы для удаления примесей из плазмы и снижения тепловой нагрузки на камеру);
- возможность оптимизации магнитной конфигурации с целью уменьшения неоклассических процессов переноса (диффузии и теплопроводности);
- отсутствие предела по плотности плазмы. Скорее всего, такой предел существует, но, как показывают эксперименты, он превышает 10^{15} см^{-3} , что представляется вполне приемлемым для будущего термоядерного реактора.

Недостатки стеллараторов:

- повышенные, по сравнению с таковыми для токамака, неоклассические коэффициенты переноса в области малых частот соударений. Тем не менее, как уже отмечалось, существуют методы оптимизации, позволяющие

Таблица. Список стеллараторов, работающих в различных странах мира

Установка	Страна	Год запуска	$V_p B$, м ³ Тл*
LHD	Япония	1998	80
Heliotron J	Япония	1999	1,4
TJ-II	Испания	1997	1,4
HSX	США	1999	0,66
У-3М	Украина	1981	0,6
H-1	Австралия	1998	0,7
Л-2М	Россия	1975 (1993)	0,4
WEGA	Германия	1975 (2001)	0,16
STH	США	2005	0,2

* Указано произведение объёма плазмы V_p на модуль индукции магнитного поля, определяющее время жизни горячей плазмы: чем больше эта величина, тем лучше удерживается плазма и тем выше её температура.

уменьшить неоклассические коэффициенты переноса. Однако если аномальные потери сравнимы с неоклассическими или превышают их, то оптимизация вряд ли окажется эффективной;

— более сложная, по сравнению с таковой в токамаках, система обмоток магнитного поля и необходимость высокой точности их изготовления;

— меньшая база экспериментальных данных, что связано с отмеченными выше успехами на токамаках и неудачами на стеллараторах в конце 1970-х – начале 1980-х гг.

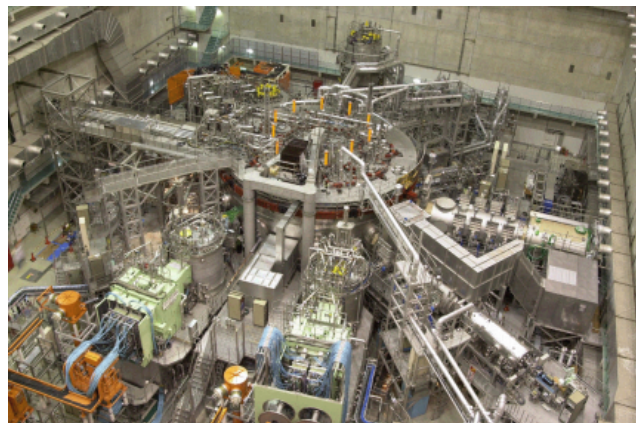
В настоящее время прототип термоядерного реактора предполагается сооружать на основе токамака (проект ИТЭР (Международный термоядерный экспериментальный реактор)). Однако будущие исследования покажут, насколько отмеченные преимущества стеллараторов весомее их недостатков и на основе какой из этих двух систем будет построен коммерческий термоядерный реактор. Пока успешно развиваются обе эти программы, дополняя друг друга, поскольку, несмотря на различие этих систем, многие процессы, протекающие в них, оказываются весьма схожими и, по-видимому, имеют одинаковую природу.

Сейчас в мире имеется девять работающих стеллараторов (см. таблицу).

Мы не будем представлять результаты, полученные на всех указанных стеллараторах, а приведём лишь их основные параметры и фотографии некоторых из них, наиболее, на наш взгляд, любопытные.

1. *Стелларатор LHD (Large Helical Device)*. LHD является сейчас самым большим стелларатором в мире, сравнимым по размерам с такими крупными токамаками, как, например, Tore-Supra (Франция), JT-60 (Япония), DIII-D (США), TFTR (США, установка демонтирована), и по общему объёму плазмы уступает лишь токамаку JET (Великобритания). Специально для LHD в Японии был построен Национальный институт термоядерных исследований (NIFS), а сама установка была сооружена за сравнительно короткое время.

LHD является в принципе классическим стелларатором, подобным по конструкции упомянутой выше установке ATF (см. рис. 1), но со сверхпроводящими проводниками, хотя наши японские коллеги предпочитают называть его гелиотроном или торсотроном. Для того чтобы оценить размеры этого устройства, приведём некоторые значения.

**Рис. 3.** Общий вид помещения, в котором находится установка LHD и вспомогательное оборудование.

Большой радиус плазмы $R = 3,6$ м, малый радиус $r = 0,6$ м, индукция магнитного поля $B = 3$ Тл, объём плазмы ~ 30 м³, энергия магнитного поля порядка 1 ГДж. Установка снабжена различными источниками нагрева плазмы: мощными сверхвысокочастотными (СВЧ) и высокочастотными генераторами для нагрева при электронном циклотронном резонансе (ЭЦР) и ионном циклотронном резонансе, инжекторами высокоэнергичных пучков нейтральных атомов, а также широким набором систем современных диагностик. Дальнейшее повышение плазменных параметров требует дальнейшего увеличения мощностей нагрева. Уже достигнутые температуры близки к тем, которые требуются для зажигания термоядерной реакции, однако плотность плазмы меньше необходимой для зажигания примерно на полтора-два порядка. Очевидно, что достичь зажигания на LHD не удастся, но подойти к этому пределу достаточно близко представляется вполне возможным, хотя это потребует существенного увеличения мощности нагрева. Общий вид установки LHD и вспомогательного оборудования представлен на рис. 3.

2. *Стелларатор TJ-II*. Несмотря на то, что эта установка по конструкции и методам создания магнитного поля существенно отличается от так называемого классического стелларатора, принципиально она принадлежит к классу стеллараторов, поскольку магнитное поле в ней создаётся системой внешних проводников, а не током, текущим по плазме. Этот стелларатор имеет сравнительно небольшие размеры: большой радиус плазмы $R = 1,5$ м, её средний малый радиус $r = 0,22$ м, индукция магнитного поля $B = 1,2$ Тл. Из источников нагрева имеется СВЧ-нагрев на электронном циклотронном резонансе и пучки нейтральных атомов; достигнутая температура электронов плазмы порядка 1 кэВ, плотность — несколько единиц $[10^{13} \text{ см}^{-3}]$. Хотя параметры плазмы, достигнутые на подобных относительно небольших установках, значительно уступают параметрам, полученным на LHD, на таких сравнительно недорогих стеллараторах может быть получена новая и весьма полезная информация как о различных физических процессах, протекающих в горячей плазме, так и о влиянии структуры магнитного поля на процессы переноса. Схематический вид проводников, создающих магнитное поле, и общий вид TJ-II приведены на рис. 4 и 5.

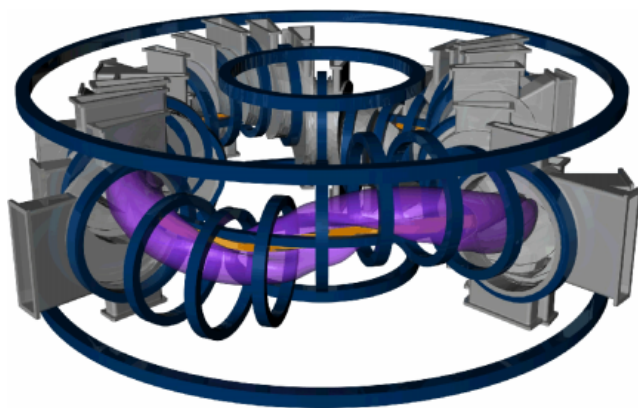


Рис. 4. Схематический вид проводников, создающих магнитное поле, вакуумной камеры и плазмы в стеллараторе TJ-II.

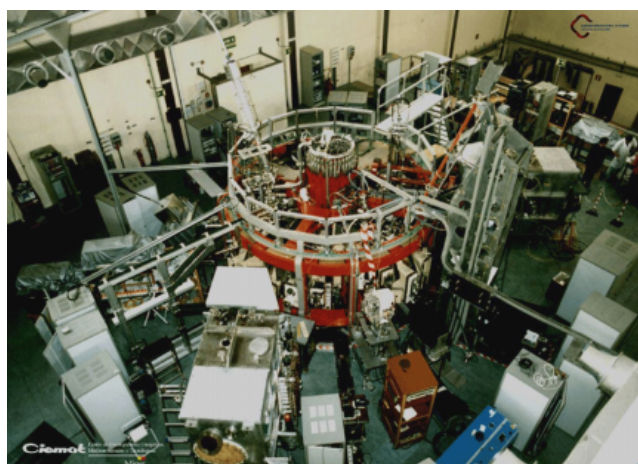


Рис. 5. Общий вид установки TJ-II и дополнительного оборудования.

3. *Стелларатор Л-2М*. Не могу не сказать несколько слов об этой, также небольшой, установке, во-первых, потому что она находится в моем институте (ИОФАН), а во-вторых, потому что в настоящее время она является единственным стелларатором в России. Параметры Л-2М таковы: большой радиус 1 м, малый — 11,5 см, индукция магнитного поля 1,3 Тл. Максимальная достигнутая электронная температура 1,5 кэВ, ионная — 150 эВ при плотности плазмы $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В настоящее время проводится монтаж и наладка нового мощного СВЧ-комплекса из двух высокоэкономичных гиротронов с мощностью 0,8 МВт каждый, которые обеспечат рекордно высокую плотность мощности нагрева (более 5 МВт м^{-3}). Следует отметить, что коллектив Л-2М дважды разрабатывал и предлагал проекты новых более крупных установок, но из-за отсутствия финансирования проекты так и остались на бумаге, хотя этими материалами воспользовались в других странах и там были сооружены подобные установки. Общий вид Л-2М изображен на рис. 6.

4. *Стелларатор HSX (Helically Symmetric eXperiment)*. Это установка с весьма сложной системой проводников, которые подобраны таким образом, чтобы выполнялось условие квазивинтовой симметрии и, таким образом, достигалась минимизация (оптимизация) процессов переноса. Иначе говоря, структура магнитного поля подбиралась так, чтобы свести к минимуму влияние

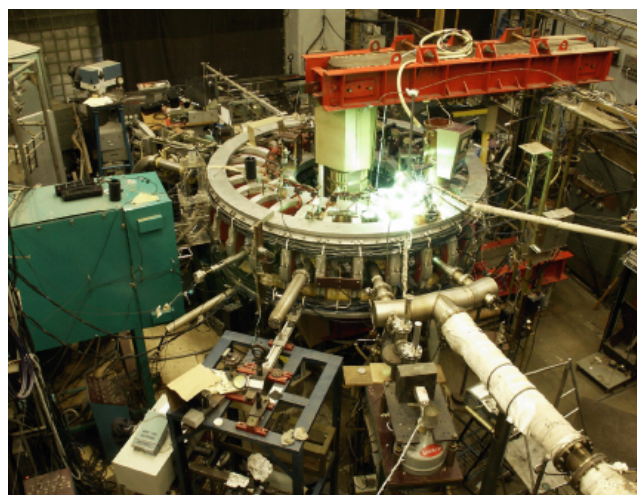


Рис. 6. Российский стелларатор Л-2М.

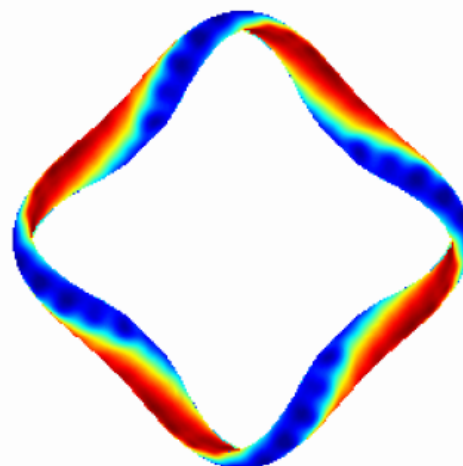


Рис. 7. Форма плазменного шнура в HSX (численное моделирование).

тороидальности, которая и является в стеллараторах ответственной за повышенные по сравнению с таковыми в токамаках диффузию и теплопроводность. Заметим, что приставка "квази" означает, что полной симметрии в стеллараторах добиться не удастся; можно только сделать систему близкой к симметричной и, таким образом, не полностью устранить, а лишь уменьшить влияние тороидальности. Не считая целесообразным демонстрировать здесь фотографию реальной установки, которая, к сожалению, мало информативна, покажем лишь рассчитанную теоретически форму плазменного шнура (рис. 7) и приведем основные параметры HSX: большой "радиус" 1,2 м, малый — 0,12 м, индукция магнитного поля 0,5 Тл, мощность ЭЦР-нагрева не более 100 кВт. Несмотря на довольно длительный срок эксплуатации установки, работающему на ней коллективу пока так и не удалось ответить на главный вопрос: является ли использованная процедура оптимизации эффективной и, если да, то в какой степени?

6. Проектируемые и сооружаемые установки

Наряду с текущими теоретическими и экспериментальными исследованиями в нескольких институтах ведется

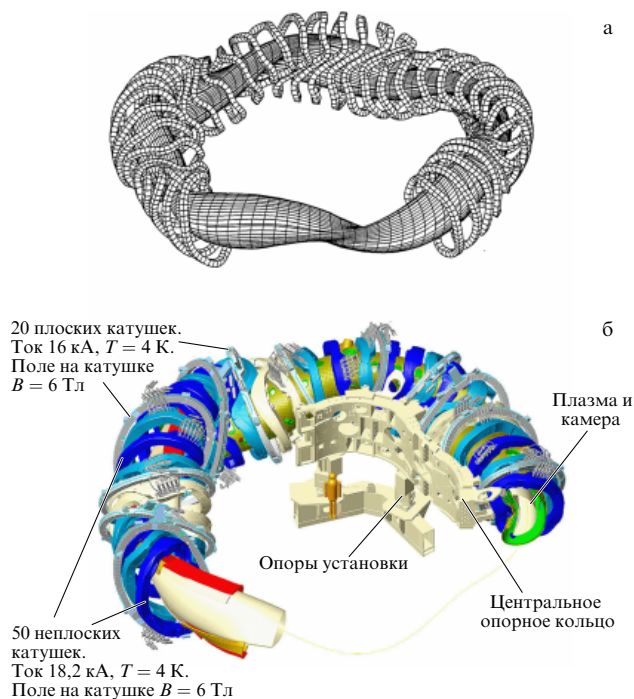


Рис. 8. (а) Модульные катушки и форма плазменного шнура в стеллараторе W-7X. (б) Макет стелларатора W-7X в сборе.



Рис. 9. Фрагмент вакуумной камеры W-7X (половина модуля).

работа по проектированию и сооружению новых установок, а также по разработке проектов будущего термоядерного реактора на базе стелларатора. Мы не будем здесь обсуждать проблемы реакторов, поскольку это увело бы нас далеко в сторону, однако о вновь сооружаемых установках, несомненно, стоит сказать несколько слов.

В Институте физики Макса Планка (Грайфсвальд, ФРГ) уже с начала 1980-х годов началась разработка проекта нового сверхпроводящего, частично оптимизированного стелларатора с модульными катушками (заметим, что создавать стеллараторное магнитное поле можно не только непрерывными винтовыми проводниками, но и модульными катушками со специальной формой, впервые это предложили *Попов и Попядухин* в 1966 г. [9]).

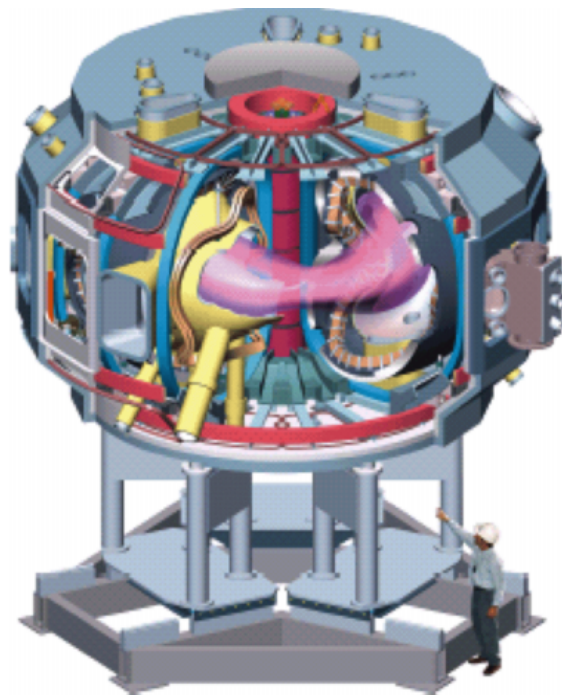


Рис. 10. Стелларатор NCSX в натуральную величину (макет).

После тщательной, но, на мой взгляд, чрезмерно длительной подготовительной работы с 2000 г. началось сооружение установки, получившей название W-7X. Окончание строительства и начало предварительных экспериментов вначале планировалось на 2005 г. Однако из-за технических сложностей, возникших при изготовлении модульных катушек с весьма сложным профилем, завершение строительства было перенесено сначала на 2009 г., а затем на 2012 г. Хотелось бы надеяться, что на этот раз работы будут завершены в срок.

Основные параметры W-7X таковы: большой радиус $R = 5,5$ м, малый радиус плазмы $r = 0,5$ м, индукция магнитного поля в центре плазмы $B = 3$ Тл, энергия магнитного поля $W = 620$ МДж. Более наглядное представление об этой грандиозной установке можно получить из рис. 8, 9.

Другим стелларатором, который спроектировали в Принстонской лаборатории физики плазмы, но за гораздо более короткое время, была установка NCSX (National Compact Stellarator eXperiment). Целью сооружения NCSX была демонстрация возможности работы при больших β с бутстрэп-током, но без неустойчивости срыва, уменьшение неоклассических потерь путём создания квазисимметрии и выяснение возможных ограничений на величину β . По размерам NCSX уступает как LHD, так и W-7X, однако он имеет всё же достаточно большие размеры, в его конструкцию заложен ряд новых идей, и эксперименты на нём могли бы привести к новым интересным результатам. Макет установки представлен на рис. 10. Средний большой радиус плазмы равен 1,42 м, малый — 0,33 м, индукция магнитного поля 2 Тл, а мощность источников нагрева должна составить 3–12 МВт. Завершение строительства и начало экспериментов планировалось на 2009 г., однако в 2008 г. работы были приостановлены (по-видимому, из-за существенного превышения финансовых затрат), а установка законсервирована.

7. Задачи и планы

Цели дальнейших исследований я бы сформулировал следующим образом.

I. Изучение природы аномальных потерь и возможности их подавления. Эксперименты, проведенные как на стеллараторах, так и на токамаках, показали, что наблюдаемые коэффициенты теплопроводности/диффузии заметно превышают их значения, предсказываемые неоклассической теорией. Причину этого видят в существовании некоего, пока не очень ясного, дополнительного механизма потерь, названного аномальными потерями. Поэтому необходимо выяснить физическую природу этого механизма и понять, можем ли мы влиять на него с целью полного или частичного уменьшения аномального переноса. Если да, то разработку систем, оптимизированных по переносу, следует продолжать. В противном случае оптимизация представляется мало перспективной.

II. Моделирование процессов переноса и разработка более адекватных численных кодов для изучения переноса, равновесия и устойчивости плазмы. Тут есть два пути. Один из них предполагает более или менее точное численное решение исходных уравнений, а затем и уравнений переноса. В принципе он представляется весьма привлекательным, но требует составления сложных программ, мощных компьютеров и достаточно большого времени счета. Другой путь заключается в создании некоторой сравнительно простой аналитической модели, феноменологически учитывающей аномальные потери и допускающей достаточно простое и быстрое решение. Скорее всего, теоретики будут развивать как тот, так и другой путь.

III. Выяснение вопроса о существовании предельной плотности в стеллараторах. До сих пор предел плотности в стеллараторах не обнаружен, но это не означает, что его вообще нет. Ответ на этот вопрос весьма существен, поскольку достичь зажигания термоядерной реакции при больших плотностях можно при меньших температурах.

IV. Проверка эффективности работы дивертора. Работа реактора без дивертора невозможна. Однако конструкция дивертора не до конца разработана, а эффективность его работы не до конца выяснена.

V. Расширение международного сотрудничества, создание полной базы экспериментальных данных и уточнение скейлингов. В последние годы сотрудничество между различными коллективами, работающими в рамках стеллараторной программы, интенсивно развивается. Расширяется взаимный обмен учеными, создаются совместные рабочие группы по сбору и систематизации экспериментальных данных, полученных на разных установках, регулярно собираются и обмениваются результатами специалисты, расширяется использование Интернета и совместное использование мощных компьютеров.

VI. Повышение параметров плазмы. Это осуществляется как переходом на более крупные установки, так и увеличением мощности источников нагрева плазмы.

VII. Разработка проектов реактора на базе стелларатора. Хотя сооружение термоядерного реактора не является проблемой завтрашнего дня, однако работы в этом направлении, очевидно, следует развивать, поскольку помимо чисто физических задач на этом пути нам надо будет решить множество других проблем: инженерных,

технологических, экономических и др. В этом смысле большую помощь, несомненно, окажет разработка и сооружение Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР).

Не могу не отметить здесь, что вклад российских ученых в мировую стеллараторную программу, так же, впрочем, как и в программу токамаков, к сожалению, стремительно уменьшается. Сокращается и сотрудничество между российскими и зарубежными учеными. Причины этого, я полагаю, всем известны: это отсутствие должного финансирования и, как следствие, отсутствие новых экспериментальных установок и результатов, недостаток современного диагностического оборудования, старение научных коллективов, спад интереса молодежи к науке и вообще падение престижа учёного. Думаю, что в этих условиях даже участие России в проекте ИТЭР окажется практически бесполезным: там просто некому будет работать.

И в заключение не могу не сказать несколько слов о человеке, вспомнить о котором мы собрались здесь, о Борисе Борисовиче Кадомцеве.

Я не был его близким товарищем и, тем более, другом. Однако я часто встречался с ним на различных конференциях, семинарах, совещаниях. И меня всегда восхищала его поразительная физическая интуиция. Стоит экспериментаторам обнаружить какой-либо новый эффект или явление, как буквально через несколько дней Борис Борисович выступает на семинаре или просто в узком кругу своих коллег и, как говорят, на пальцах объясняет суть этого явления. И что удивительно, когда через какое-то время появляется более или менее строгое теоретическое объяснение этого эффекта, часто найденное им самим, оказывается, что объяснение, данное им вначале, полностью совпадает с выводами теории. Несомненно, Б.Б. Кадомцев был замечательным учёным, теоретиком "от бога" и потеря его невосполнима, невосполнима не только для плазменного сообщества, но и для всей физической науки. Нам очень недостаёт его, и единственным утешением могут служить его замечательные обзоры и, увы, немногочисленные монографии [10–13], по которым будут, надеюсь, учиться как научные работники, так и студенты.

Список литературы

1. Галеев А А, Сагдеев Р З *ЖЭТФ* **53** 359 (1967) [Galeev A A, Sagdeev R Z *Sov. Phys. JETP* **26** 1115 (1968)]
2. Коврижных Л М *ЖЭТФ* **56** 877 (1969) [Kovrizhnykh L M *Sov. Phys. JETP* **29** 475 (1969)]
3. Коврижных Л М "Процессы переноса в тороидальных ловушках стеллараторного типа", Препринт № 222 (М.: ФИАН, 1982); Kovrizhnykh L M *Nucl. Fusion* **24** 851 (1984)
4. Коврижных Л М *ЖТФ* **31** 888 (1961); **32** 526 (1962) [Kovrizhnykh L M *Sov. Phys. Tech. Phys.* **6** 643 (1962); **7** 316 (1962)]
5. Морозов А И, Соловьев Л С, в сб. *Вопросы теории плазмы* Вып. 2 (Под ред. М А Леонтовича) (М.: Госатомиздат, 1963) с. 3
6. Коврижных Л М, Щепетов С В *Физика плазмы* **6** 976 (1980) [Kovrizhnykh L M, Shchepetov S V *Sov. J. Plasma Phys.* **6** 533 (1980)]
7. Strauss H R *Plasma Phys.* **22** 733 (1980)
8. Коврижных Л М, Щепетов С В *Письма в ЖЭТФ* **33** 441 (1981) [Kovrizhnykh L M, Shchepetov S V *JETP Lett.* **33** 425 (1981)]
9. Попов С Н, Попрядухин А П *ЖТФ* **36** (2) 390 (1966) [Popov S N, Popryadukhin A P *Sov. Phys. Tech. Phys.* **11** 284 (1967)]
10. Кадомцев Б Б *Коллективные явления в плазме* 2-е изд. (М.: Наука, 1988) [Kadomtsev B B, in *Reviews of Plasma Physics* Vol. 22 (Ed. V D Shafranov) (New York: Kluwer Acad./Plenum Publ., 2001) p. 1]
11. Kadomtsev B B *Tokamak Plasma: a Complex Physical System* (Bristol: IOP Publ., 1992)

12. Кадомцев Б.Б. *Динамика и информация* (М.: Редакция журнала "Успехи физических наук", 2001)
13. Кадомцев Б.Б. *На пульсаре* (Ижевск: РХД; М.: Редакция журнала "Успехи физических наук", 2001) [Kadomtsev B. B. *On the Pulsar* (London: World Scientific, 2009) (in press)]

PACS numbers: 52.80. – s, 92.60.Pw, 94.20.wq
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200907h.0779

Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды

А.В. Гуревич, А.Н. Караштин, В.А. Рябов,
А.П. Чубенко, А.Л. Щепетов

1. Введение

В этом сообщении описаны как некоторые продвижения в теории, так и результаты новых наблюдений влияния космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые процессы в атмосфере. Рассмотрено асимптотическое решение линейного кинетического уравнения, предложены соотношения подобия для пробоя на убегающих электронах. Описан созданный на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции космических лучей Физического института им. П.Н. Лебедева РАН экспериментальный комплекс "Гроза", на котором проводятся измерения различных видов излучения в период грозовой активности. Основное внимание уделено описанию результатов наблюдения интенсивных всплесков гамма-излучения в период активной фазы грозы. Впервые зарегистрированы специфические атмосферные разряды, вызванные совместным воздействием на грозовое облако пробоя на убегающих электронах и широкого атмосферного ливня. Обнаружение интенсивных длительных всплесков гамма-излучения и их корреляции с радиоизлучением может служить первым экспериментальным свидетельством того, что собирание и доставка заряда от облаков к лидеру молнии в активный грозовой период происходят при определяющей роли пробоя на убегающих электронах, инициированного космическими лучами.

Грозовой разряд — молния — определяется тремя основными процессами:

1. Собираение электрического заряда с большого объема облаков (по существу, инициация молнии), в которых он расположен в основном на капельках или льдинках.

2. Перенос этого заряда от облака на землю или между облаками.

3. "Сжигание" заряда в грозовом разряде (собственно, это и есть молния).

Третий процесс — возвратный удар молнии — хорошо известен и достаточно подробно изучен. Много исследований посвящено также и второму процессу — лидеру молнии, но пока всё ещё остаётся много вопросов. Что же касается первого процесса, то эта проблема практически не обсуждалась в литературе.

Дело в том, что раньше наблюдалось радиоизлучение многочисленных разрядов, происходящих в облаке. Предполагалось, что эти разряды создаются вследствие

обычного пробоя воздуха. Однако, как выяснилось в результате многочисленных измерений (в последнее время очень точных), электрическое поле в грозовых облаках никогда не достигает необходимой для обычного разряда в атмосфере величины (последние измерения показывают, что этот факт можно считать точно установленным [1, 2]). Поэтому вопрос о природе собирания заряда с большого объема облаков оставался практически полностью открытым и, по существу, не обсуждался в литературе (см., например, монографии [3, 4]).

В настоящем сообщении впервые показано, что активная фаза грозового разряда фактически сопровождается мощными потоками гамма-излучения в облаках. Одновременно наблюдается и радиоизлучение, хорошо коррелированное с гамма-излучением. Это означает, что осуществляется пробой на убегающих электронах. Величина электрического поля превосходит критическое поле пробоя на убегающих электронах. Затравкой для пробоя служат вторичные электроны космических лучей. Поэтому пробой на убегающих электронах в облаках может стать основой для объяснения процесса собирания заряда из облаков, необходимого для возникновения грозового разряда. Тем самым появляется новое направление для исследования первой и главной фазы — основополагающего процесса — грозового разряда. Вся эта проблема тесно примыкает к идеям и понятиям физики плазмы, которым были посвящены основные работы Б.Б. Кадомцева. В частности, пробой на убегающих электронах — это процесс, в котором всякое вещество ведёт себя как плазма.

Исследования атмосферных разрядов интенсивно развиваются в последние годы. Обнаружены новые виды разрядов между атмосферой и ионосферой: спрайты, эльфы, голубые джеты [5, 6]. Зарегистрированы мощные вспышки гамма-излучения (TGF — от англ. Terrestrial Gamma Flashes) [7]. Подробно изучены высотные разряды, генерирующие сверхмощные импульсы радиоизлучения (NBE — от англ. Narrow Bipolar Event) [8].

Результаты новых измерений порождают и новые вопросы. В частности, последние исследования показали, что можно считать надёжно установленным экспериментальным фактом то, что электрическое поле E в облаках значительно ниже порога электрического пробоя E_{th} [1, 2, 9]. Как же тогда инициируются молнии? Как возникают в активный период грозы многочисленные разряды, генерирующие вспышки радиоизлучения [10]? Для ответа на эти вопросы естественно привлечь новый физический процесс — *пробой на убегающих электронах* (ПУЭ) [11, 12], который имеет низкий порог возбуждения, соответствующий наблюдаемому в грозовой атмосфере электрическим полям.

Обычный пробой возникает вследствие нагрева электронов в электрическом поле. При этом быстрые электроны, принадлежащие хвосту функции распределения, становятся способными ионизовать вещество и, следовательно, генерировать новые свободные электроны, в то время как медленные электроны исчезают либо вследствие рекомбинации в объёме, либо на стенках разрядной камеры. При достижении достаточно высоких значений электрического поля генерация новых электронов за счёт ионизации превосходит их исчезновение в результате рекомбинации, и их количество начинает