

Лев Андреевич был из того поколения "личностей государственного масштаба", чья жизнь и творчество были обусловлены не только их собственной незаурядностью и научным талантом, но и всем ходом истории нашего Отечества. Они явили собой воплощение столь присущего русской интеллигенции стремления служить возвышенному, надличному. И благотворное воздействие этих выдающихся людей, прекрасно познавших не только радость научного творчества, но и глубинные механизмы организации наук, и высшие государственные приоритеты, сказывалось еще долгие годы после того, как их не стало.

Лев Андреевич возглавлял физику нашей страны в течение 17 лет — с 1957 года, когда наше Отделение под названием "Отделение общей и технической физики" выделилось из состава старого Отделения физико-математических наук АН СССР.

Большое внимание уделял Лев Андреевич вопросам организации научных исследований. Свое кредо он изложил в прекрасном докладе на заседании Президиума АН СССР 3 декабря 1964 г. Главным он считал выбор правильного направления исследований. Он считал, что в его время такими направлениями были астрофизика и физика элементарных частиц. Только в этих областях, по его мнению, можно было ожидать открытие принципиально новых явлений, что полностью подтвердилось впоследствии. Он считал также, что физика твердого тела уже достаточно изучена и не следует ожидать здесь больших открытий. Но современные исследования в этой области непрерывно приносят нам превосходные результаты. Вероятно, Лев Андреевич отнес бы их к прикладным. Вообще вопрос о соотношении фундаментальной и прикладной наук, а также о внедрении научных результатов довольно сложный. Научные результаты внедряются в нашу жизнь не так просто и не так быстро, и все попытки ускорить этот процесс путем постановлений не дали заметных результатов. Лев Андреевич твердо стоял на позиции, что академические институты должны заниматься только фундаментальной наукой, хотя эта точка зрения не разделялась большинством ученых. Они считали, что нельзя отрывать от реальной жизни и что отраслевые институты в большинстве недостаточно квалифицированы, чтобы найти применение результатам фундаментальных исследований. Поэтому академические институты также должны заниматься и прикладными исследованиями. Нужно отметить, что вопрос о соотношении фундаментальных и прикладных наук не потерял актуальность и в настоящее время.

Лев Андреевич уделял большое внимание кадрам. Он справедливо считал, что новые лаборатории, новые институты следует организовывать только в том случае, если есть заметная личность, добившаяся успехов в науке. Ярким примером этого является избрание одного из основателей голографии кандидата наук Юрия Николаевича Денисюка в члены-корреспонденты АН СССР.

Л.А. Арцимович считал, что нельзя ограничиваться сосредоточением науки лишь в Москве и Ленинграде, а нужно, чтобы крупные академические научные центры охватили всю территорию и вовлекли в научную деятельность жителей многих областей. При нем оформились такие, ныне широко известные, научные центры, как Троицк, Черноголовка, Специальная астрофизическая обсерватория. Мощно развивалась приборно-технологическая база физики и астрономии. Для этого он не жалел ни собственных сил, ни личного времени, широко исполь-

зовал свой авторитет в правительственных кругах. Без его активного участия не было бы наших крупнейших телескопов — оптического БТА и радиотелескопа РАТАН-600.

Особо стоит сказать о том удивительном стиле руководства, точнее воспитания сотрудников ООФА, благодаря которому еще долгие годы после ухода Льва Андреевича наше Отделение (а оно по-прежнему крупнейшее в Академии) сохраняло устойчивость и высокие темпы развития. Для этого стиля характерна не только нацеленность на высокий уровень как в науке, так и в организации науки. При всей высокой требовательности Лев Андреевич сохранял, воспитывал, можно сказать, культивировал в своих сотрудниках самостоятельность, способность принимать быстрые и эффективные решения, действовать в любых инстанциях и ситуациях. Он никогда не допускал мелочной опеки, был человеком слова, последовательным в своих решениях, был заботлив. Его люди всегда ощущали надежный тыл, знали, что у них за спиной — надежная защита, объективность и поддержка.

Сегодня наша наука вместе со всей страной переживает один из тяжелейших периодов в своей истории. Так пусть укрепит нас светлый пример Льва Андреевича Арцимовича.

PACS numbers: 52.55.-s, 52.55.fa

## Перспективы винтовых магнитных систем для УТС

В.Д. Шафранов

### Введение

25 февраля этого года исполнилось 90 лет со дня рождения, а 1 марта — 26 лет со дня кончины академика Льва Андреевича Арцимовича — выдающегося физика, человека с редким сочетанием логики и интуиции, первого академика-секретаря Отделения общей физики и астрономии Академии наук, глубоко и афористично мыслящего человека обширных знаний, ироничного, остроумного и саркастического критика, непримиримого противника рекламности и легковесности в науке. Лев Андреевич входил в ту замечательную четверку наших физиков и выдающихся личностей, которым исследования по УТС в нашей стране обязаны с самого начала своим высоким уровнем. Это академики А.Д. Сахаров и И.Е. Тамм, выдвинувшие и разработавшие основополагающие идеи магнитной термоизоляции плазмы, и академики Л.А. Арцимович и М.А. Леонтович, организовавшие исследования, которые привели к созданию основ физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Из них именно на долю Л.А. Арцимовича выпала задача руководства экспериментальным поиском и проверкой теоретических выводов в области УТС, нахождения реальных условий создания и удержания высокотемпературной плазмы.

Винтовые магнитные системы — это расширенное название стеллараторных систем магнитного удержания плазмы. Стеллараторы (тороидальные установки, в которых необходимая для удержания плазмы система вложенных магнитных поверхностей создается внешними токами без необходимости возбуждения тока в плазме) с момента их расщекращения (1958 г.) были конкурентами

токамаков. Между этими системами всегда шло незримое соревнование. Лев Андреевич Арцимович как руководитель программы управляемого термоядерного синтеза (УТС) в нашей стране и непосредственный руководитель экспериментальных исследований на токамаках (с 1962 г.) с азартом включился в это соревнование и вышел победителем. В докладе на 3-й Международной конференции по физике плазмы и УТС в Новосибирске (1968 г.) он сообщил, что на токамаке Т-3 получена температура электронов около 1 кэВ [1], а подводя итоги конференции, с уверенностью произнес следующие слова: "Мы освободились от мрачного призрака громадных потерь, воплощенного в формуле Бома, и открыли путь для дальнейшего повышения температуры с выходом на физический термоядерный уровень". Но в то время наши зарубежные коллеги не воспринимали серьезно установку токамака. И как за четыре года до этого на предыдущей конференции в Калэме пренебрегли сообщением о том, что на токамаке Т-3 нет той усиленной, "бомовской" диффузии, которая постоянно проявлялась на Принстонском стеллараторе С, так и теперь не все поверили фантастической для того времени температуре в 1 кэВ. Тогда Лев Андреевич предложил директору Калэмской лаборатории Р.С. Пизу (R.S. Pease) послать в Курчатовский институт группу физиков, освоивших к этому времени метод локального определения температуры в плазме по томсоновскому рассеянию. В сентябре этого года исполняется 30 лет памятного его участникам Второго международного симпозиума по тороидальным системам в Дубне (1969 г.), на котором были представлены результаты этого советско-английского эксперимента по локальному измерению электронной температуры [2], подтвердившие правильность выводов, сделанных за год до этого в Новосибирске. Дубненский симпозиум ознаменовал начало поступательного движения к термоядерным параметрам плазмы и стал, можно сказать, звездным часом Льва Андреевича.

За четверть века, прошедшие со дня кончины Льва Андреевича, токамаки во всем мире стали основной системой для получения высокотемпературной плазмы. Но в связи с получением на крупных токамаках настоящей термоядерной плазмы повысился интерес и к винтовым (стеллараторным) системам удержания плазмы.

### Начальный этап истории токамаков и стеллараторов

Исследования по УТС начались в начале 50-х с систем магнитного удержания в трех странах: Англии, СССР и США. Каждая из этих стран стала родиной одного из направлений исследований по УТС на основе тороидальных систем:

Англия стала родоначальницей тороидальных пинчей со стабилизацией сравнительно слабым тороидальным магнитным полем, приведших к "пинчу с обращенным магнитным полем" (reversed field pinch)<sup>1</sup>;

<sup>1</sup> Эти системы представляют собой первый замечательный пример "самоорганизации" плазмы: стабилизация токовой неустойчивости в них осуществляется за счет непрерывной генерации тороидального магнитного потока в плазме, превышающего начальный поток внутри проводящей камеры. Сохранение магнитного потока внутри проводящей камеры обеспечивается при этом "обращением магнитного поля" в области между стенкой и горячей плазмой. Механизм генерации потока приводит и к усилению диффузии плазмы. В настоящее время ищутся способы улучшения удержания плазмы путем поддержания извне полоидального электрического тока, являющегося источником тороидального магнитного потока.



Двое из участников англо-советского эксперимента Д. Робинсон и В. Санников с Л.А. Арцимовичем после доклада Д. Робинсона (ныне директор Калэмской лаборатории) о результатах эксперимента на токамаке Т-3. 2-й Международный симпозиум по тороидальным системам (г. Дубна, сентябрь 1969 г.).

СССР стал родоначальником токамака;

США стали родиной стелларатора или, в более широком смысле, винтовых систем.

Токамак и стелларатор — это системы, топологически эквивалентные тору, с преимущественно тороидальным, т.е. идущим вокруг главной оси тора направлением магнитных силовых линий. При осевой симметрии системы тороидальное магнитное поле такое же, как магнитное поле прямого тока, т.е. падает по закону  $1/r$  от главной оси тора. В таком поле положительно и отрицательно заряженные частицы дрейфуют параллельно этой оси в разных направлениях. В плазме возникающее разделение зарядов приводит к появлению электрического поля, параллельного оси тора, благодаря чему вся плазма дрейфует в направлении  $\text{grad } r$ , т.е. от оси тора. При макроскопическом описании этот дрейф соответствует действию силы баллонного расширения тороидального плазменного шнура. В начальных расчетах (1950 г.) тороидального магнитного термоядерного реактора (МТР) с дейтериевой плазмой (малая модель с непрерывным вводом мощности [3] и большая модель с самоподдерживающейся термоядерной реакцией [4]) И.Е. Тамм и А.Д. Сахаров пренебрегали тороидальными эффектами. Лишь в конце своей работы 1951 г. А.Д. Сахаров высказал два предложения для "стабилизации" тороидального дрейфа: а) подвешивание на тросах кольца с током в тороидальном магнитном поле (предтеча предложенного в 60-х в США левитрона); б) второе предложение, приведшее к токамаку, звучит

так: "Другой способ антидрейфовой стабилизации, который технически несравненно более приемлем и который поэтому необходимо тщательно изучить, — это создание осевого тока непосредственно в плазме индукционным методом".

В США Лайман Спитцер, размышляя над способом удержания плазмы в магнитном поле, отказался от использования тока в торе, так как предпочитал стационарный реактор<sup>2</sup>, и, осознавая проблему тороидального дрейфа, предложил для его нейтрализации соленоид в форме пространственной восьмерки [6]. В этом простейшем стеллараторе круглого сечения, но с пространственной осью, не было необходимых для МГД устойчивости плазмы "шира" магнитных силовых линий и "средней магнитной ямы". В нем постоянно наблюдалась усиленная ("бомовская") диффузия. В сентябре 1958 г. состоялась 2-я Женевская конференция по мирному использованию атомной энергии (сентябрь 1958 г.), где впервые были представлены строго секретные до того работы по управляемому термоядерному синтезу. Гвоздем этой, по выражению Л.А. Арцимовича, "ярмарки идей" был спитцеровский стелларатор. Открытая Спитцером принципиальная возможность удержания тороидальной плазмы в магнитном поле без возбуждения в ней тока представлялась тогда единственно правильным направлением развития программы УТС. В 1959 г. возникла даже угроза закрытия токамаков в Курчатовском институте. Спасло понимание того, что на первых порах нагрев плазмы в стеллараторах должен производиться, как и в токамаке, возбуждаемым в них электрическим током (другие методы нагрева — высокочастотные и инжекция пучка нейтральных атомов — не были еще разработаны). Но при этом преимуществом обладает система с минимальной длиной тора  $L$  (в этом случае условие винтовой неустойчивости допускает большую среднюю плотность тока, что обеспечивает достаточно высокий нагрев плазмы даже без применения дополнительных методов нагрева) и максимальным радиусом поперечного сечения плазмы (уменьшаются потери энергии и частиц плазмы и воздействие на плазму распыления стенок камеры). Н.А. Явлинский, активно проводивший вместе с И.Н. Головиным в жизнь развивающую идею А.Д. Сахарова концепцию токамака (к тому времени сформулированную, по сути, в [7]) и давший вместе с ним в 1957 г. название "токамак", отстоял разработанный к концу 1958 г. проект токамака Т-3. И именно на этом токамаке в конце 60-х была получена температура плазмы в 1 кэВ, с чего и начался выход токамаков на международную арену и закрытие в ряде лабораторий других работ по УТС (прямолинейных пинчей, систем с внутренними кольцевыми токами, зеркальных, или пробочных магнитных ловушек и др.).

**Токамаки через 30 лет после дубненского симпозиума**  
**Успехи токамаков.** С 70-х годов началось широкое распространение токамаков и сейчас в мире их насчитывается около сотни. Самый большой из них — JET (Западная Европа) с радиусом плазменного тора  $R = 3$  м и поперечным D-образным сечением плазмы диаметром  $2a = 2,5$  м и высотой  $2b = 4,2$  м. На этой установке в опыте с дейтерий-третиевой плазмой в 1997 г. была получена термоядерная мощность 16 МВт в течение

0,85 с [8]. Коэффициент усиления мощности  $Q$  (отношение термоядерной мощности к мощности нагрева) вплотную приблизился к первой вехе в производстве управляемой термоядерной энергии,  $Q = 1$ . На токамаке TFTR ( $a = b = 0,85$  м,  $R = 2,5$  м) Лаборатории физики плазмы Принстонского университета несколько меньшая термоядерная мощность 10 МВт с  $Q = 0,25$  в дейтерий-третиевой плазме была получена в 1994 г. [9]. На японском крупном токамаке JT-60M ( $a/b = 0,95/0,75$ ,  $R = 3$  м) недавно достигнуты параметры дейтериевой плазмы, при которых в дейтерий-третиевой плазме значение  $Q$  было бы равным  $Q = 1,25$ . Температура и плотность плазмы в этих опытах на крупнейших токамаках составляли  $T = 30 - 40$  кэВ,  $n = 10^{19} - 10^{20}$  м<sup>-3</sup>. Таким образом, опытами на токамаках фактически доказана осуществимость управляемой термоядерной реакции с мощностью, необходимой для термоядерного реактора.

**Новое в физике плазмы токамака.** Поступательный прогресс в достижении термоядерных параметров плазмы на токамаках закономерно послужил основанием для разработки проекта международного опытного термоядерного реактора ITER. Это не означает, что экспериментальные и теоретические исследования удержания плазмы в токамаках заканчиваются. За время сооружения и ввода в рабочий режим опытного реактора предстоит решить еще массу физических задач по повышению надежности работы первого термоядерного реактора. Сейчас к этой работе приобщаются многочисленные коллективы физиков разных стран. Распространенность токамаков, безусловно, объясняется сравнительной простотой их конструкции и компактностью. Но простой по геометрии, токамак оказался непростым с точки зрения физики плазмы. Плазма достаточно хорошо удерживается в нем лишь при специальной форме распределения плотности тороидального тока. К счастью, в результате обширных исследований выяснился ряд замечательных свойств плазмы токамака. Прежде всего оказалось, что в плазме токамака может реализовываться самоорганизация режимов устойчивого удержания плазмы [10]. Более того, помимо сохранения устойчивого профиля тока при определенных условиях возникают режимы с улучшенной термоизоляцией плазмы благодаря спонтанному возникновению "теплого барьера": тороидального трубчатого слоя с сильно пониженными переносами. К изучению этих режимов сейчас привлечено основное внимание исследователей.

**Непрерывное поддержание тока.** Природа пошла навстречу исследователям и в вопросе непрерывного поддержания тока. Оно оказалось возможным благодаря двум замечательным открытиям: пассивной и активной генерации безындукционного тока. Пассивный безындукционный ток в токамаке генерируется само собой за счет диффузии "банановых" (в сечении тора) дрейфовых траекторий заряженных частиц, запертых на неоднородности тороидального магнитного поля. Ширина банана, определяемая из закона сохранения тороидального импульса ведущего центра ларморовского кружочка, не зависит от тороидального магнитного поля. Поэтому процесс диффузии плазмы, включающий превращение пролетных частиц в запертые (вследствие столкновения) и перескок частицы с одной банановой траектории на другую (по такой же причине) идет как бы в чисто полоидальном магнитном поле, а значит, с генерацией тороидального тока ("бутстрэп"

<sup>2</sup> "... He preferred steady-state operation and chose not to use internal current to set up the magnetic field in closed devices as in pinches or tokamaks ..." [5].

ток). Однако для реализации непрерывного удержания плазмы в токамаке одного бутстрэп-тока оказывается недостаточно. На помощь приходит генерация тока путем передачи импульса либо ионам от инжектируемых атомов, либо электронам от электромагнитного излучения. Использование узкого пучка электромагнитных волн, генерируемых гиротроном, позволяет не только поддерживать нужную величину тока, но и регулировать его распределение, а значит, и управлять в перспективе режимами улучшенного удержания. Все же непрерывное поддержание и регулирование распределения тока требует немалых затрат.

Кроме того, в токамаке сохраняется возможность катастрофической неустойчивости срыва тока, при которой горячая сердцевина плазмы как бы выворачивается наружу и сбрасывает накопленную энергию на стенку камеры. Эта неустойчивость — одна из серьезнейших проблем токамака. Сейчас изыскиваются, и не безуспешно, методы контроля за ее развитием и методы ее предотвращения. Но кардинальным для УТС решением были бы стационарные системы магнитного удержания плазмы.

### Роль токамака в развитии стационарных систем УТС

К стационарным в проблеме УТС относятся следующие альтернативные по отношению к токамаку системы: винтовые тороидальные системы магнитного удержания плазмы — стеллараторы; открытые системы с магнитными пробками (пробкотроны, или зеркальные ловушки); тороидальные системы с внутренними кольцами ("галатеи" [11])<sup>3</sup>. Из них наиболее продвинуты стеллараторы — ближайшие родственники токамака. Они имеют много общего с токамаками: система топологически тороидальных вложенных магнитных поверхностей; тороидальный и полоидальный магнитные потоки как инвариантная мера напряженности тороидального и полоидального магнитного поля; вращательное преобразование — предел отношения чисел вращения магнитной силовой линии в полоидальном (вокруг магнитной оси) и тороидальном (вдоль магнитной оси) направлениях — вот общие характеристики этих систем. Главное отличие от токамака в геометрии: в стеллараторе плазменный шнур не гладкий, а гофрированный по винту. Гораздо сложнее, чем в токамаке, форма магнитных катушек для создания необходимых магнитных поверхностей. Поэтому стелларатор — система, менее мобильная, чем токамак. Но эта сложность только техническая. Масса же проблем, которые встанут на пути получения термоядерной плазмы, являются общими для любого термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы. И они решены и решаются на более мобильных токамаках. К ним относятся: развитие диагностик для определения параметров плазмы и изучения физических процессов, влияющих на процессы переноса энергии и частиц высокотемпературной плазмы; снижение неизбежного поступления в плазму примесных атомов с высоким  $Z$  путем подбора подходящего материала с малым  $Z$  для покрытия стенок вакуумной камеры; предохранение стенки от разрушения путем отвода внешних магнитных силовых линий в специальный "диверторный" объем с плотным нейтральным газом, переизлучающим энергию частиц плазмы, выходящих

из основного объема удержания и стекающих вдоль силовых линий в диверторный объем; разработка систем нагрева и подпитки плазмы; освоение вакуумной технологии больших объемов; работа с криогенными системами и катушками магнитного поля из сверхпроводника. Решением ряда такого рода проблем токамак не только проложил дорогу к созданию первого опытного термоядерного реактора на основе токамака, но и облегчил развитие других, возможно, более надежных, стационарных магнитных систем, в которых термоядерная плазма могла бы удерживаться вообще без возбуждения в ней электрического тока.

### Инновационные винтовые системы магнитного удержания

**От "восьмерки" Спитцера к хорошо оптимизированным стеллараторам.** Как и в первых стеллараторах 50-х годов типа пространственной восьмерки с круглым сечением плазмы, так и в рейстрековом "Стеллараторе С" с двухзаходной и трехзаходной винтовыми обмотками,  $l = 2$  с одной стороны и  $l = 3$  с другой стороны рейстрека, в Принстоне в 60-е годы постоянно наблюдалась "откачка" плазмы из области ее удержания. Главная причина была в неудачном выборе магнитной системы: 1) расположение винтовых проводников с током только на закругленных частях и притом с разной заходностью не гарантируют создания необходимой для удержания плазмы системы вложенных магнитных поверхностей; 2) большое отношение длины плазменного шнура ( $L = 12$  м) к периметру сечения плазмы ( $L/2\pi\langle a_p \rangle = 40$  по сравнению с токамаком Т-3, где соответствующее отношение  $R/a_p = 8$ ) означает малую величину играющей основную роль в удержании плазмы полоидального магнитного поля. В "Стеллараторе С" оно не превышало 100 Гс, тогда как на Т-3 было не менее  $10^3$  Гс. Кроме того, малый радиус камеры ( $a_c = 10$  см) делал неизбежным сильное взаимодействие плазмы со стенкой. Как следствие, низкая температура плазмы, бомовская диффузия и, как итог, негативное влияние на УТС — особенно на винтовые (стеллараторные) системы. Но интерес к стеллараторам не остывал. Стеллараторы привлекали стационарностью магнитной системы для удержания плазмы. Ведь А.Д. Сахаров и И.Е. Тамм, выдвинувшие идею магнитного термоядерного реактора, имели в виду именно стационарный реактор. Применение индукционного тороидального тока было вынужденной мерой и вызывало даже разочарование. Недаром в развитии работ по УТС в Курчатовском институте (в то время — ЛИПАНе) в первые годы акцент делался на простые пинчи: если необходим ток, то зачем нужно тороидальное магнитное поле? К нему фактически вернулись уже как к средству стабилизации перетяжной и изгибной неустойчивостей пинча. А сразу после Женевской конференции 1958 г., когда стало доступным множество идей в области УТС, токамаки не представлялись простыми. Кроме того, было не ясно, что нового можно внести в их исследования по сравнению с тем, что делалось в ЛИПАНе. Стеллараторы же отличались большим разнообразием, широкой возможностью поиска. Поэтому они стали активно развиваться. В ФИАНе (ныне ИОФ РАН) сразу был выбран представлявшийся наиболее привлекательным двухзаходный стелларатор с круговой осью. В Харьковском физико-техническом институте исследовались стеллараторы как с плоской, так и с винтовой осью. Основным вначале был трехзаходный стелларатор рейстрековой формы. Начинались исследо-

<sup>3</sup> Эти системы относятся к стационарным с оговоркой: при потере сверхпроводимости внутреннее кольцо с окружающей плазмой опускается, так что здесь работа реактора, скорее всего, циклическая.

вания стеллараторов в Новосибирске, Сухуми. На стелларатор сделали ставку в Институте физики плазмы Макса-Планка в Гархинге (Германия). Несколько позже работы по стеллараторам начались в университетах Киото, Нагои и Сендая (Япония), Калэмской лаборатории (Англия), а еще позже в университетах Испании и Австралии. Самые крупные программы по стеллараторам осуществляются в настоящее время в Японии и Германии. Наиболее результативными оказались двухзаходные стеллараторы с приблизительно эллиптическими, вращающимися при следовании вдоль тора, сечениями магнитных поверхностей и круговой осью. Необходимая магнитная конфигурация в них создается наложением на тороидальное поле поперечного поля четырех непрерывных винтовых витков с чередующимся направлением токов ("обычные" {"conventional"} стеллараторы). Разновидность стелларатора только с двумя винтовыми витками с однонаправленными токами, не требующая катушек тороидального поля, получила название торсатрона. Более гибкая система, допускающая независимое включение дополнительного тороидального поля, называется гелиотроном. Постепенно двухзаходные стеллараторы вышли по параметрам плазмы на уровень токамаков в своей категории (по геометрическим и физическим параметрам). При наличии мощных источников нагрева плазмы (пучки ускоренных нейтральных атомов и высокочастотные методы) не стало проблемой получение температуры плазмы до 1–3 кэВ. На достаточно крупном стеллараторе Гелиотрон-Е в Киото и небольшой крутой установке гелиотрон-торсатронного типа CHS (Compact Helical System) достигнуты рекордные значения важного параметра "бета" — отношения усредненного давления плазмы к давлению магнитного поля — в 2 % и 2,1 %.

Одной из главных проблем винтовых систем стала открытая неоклассической теорией переносов усиленная диффузия в области малой частоты столкновений частиц, типичной для условий термоядерного реактора. Многочисленными численными расчетами и аналитически теоретически изучали, насколько можно снизить теоретические переносы, оптимизируя закон изменения по азимуту шага непрерывных винтовых токовых витков. Эта линия развития, по-видимому, завершается вводом в строй в Японии самого крупного стелларатора — гелиотрона LHD (большая винтовая установка {Large Helical Device}) со сверхпроводящими обмотками (радиус тора в ней 4 м, радиус плазмы 0,6 м, максимальная мощность нагрева 20 МВт рассчитана на получение плазмы с плотностью  $n = 10^{20} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и температурой 3–10 кэВ).

Развитие вычислительной техники привело к возможности иной постановки задачи оптимизации трехмерных систем магнитного удержания плазмы, реализованной в 80-х немецкими физиками. Она исходит не от источников магнитного поля, а от плазменной конфигурации, конкретнее, от параметрического задания и оптимизации граничной тороидальной магнитной поверхности (ГМП). В этом подходе численными расчетами с помощью трехмерных уравнений равновесия, переносов энергии и частиц и критериев устойчивости плазмы определяют максимально допустимое отношение давления плазмы к давлению магнитного поля (параметр "бета") при фиксированной ГМП. Последовательным варьированием параметров ГМП определяют оптимальную форму граничной магнитной поверхности. По рассчитанному распределению магнитного поля вне оптимизированной ГМП определяется форма модульных

скрученных витков, с помощью которых и реализуется оптимальная система. Модульные витки минимизируют "рассеянное" магнитное поле вне витков и тем самым выгодно отличаются по энергетике от непрерывных витков. Построенный на этом принципе в Гархинге стелларатор WVII-AS (с большим радиусом тора 2 м и средним малым радиусом 0,2 м) успешно работает. На нем получают плазму с достаточно высокой температурой в 3 кэВ. Но предельное "бета" в нем составляет лишь около процента, что явно недостаточно для реактора. Последующий переход от лежащей в плоскости круговой магнитной оси к пространственной, винтовой оси привел к принципиальным улучшениям стелларатора [12]. Разработанный на новой основе стелларатор WVII-X (большой радиус 5,5 м, средний малый радиус 0,53 м) с предельным теоретическим значением "бета" = 5 % в настоящее время сооружается в Грайфсвальде. Одновременно прорабатывается детальный проект опытного реактора-стелларатора с винтовой осью, который по линейным размерам примерно в четыре раза больше экспериментального WVII-X. Теоретический анализ результатов оптимизации стеллараторов с пространственной осью привел к концепциям "квазисимметрии" [13–15] и "псевдосимметрии" [16], дающим рецепты устройства "омнигенных" (вложенных) или "квазиомнигенных" поверхностей дрейфа заряженных частиц, т.е. к устранению или ослаблению радиального выноса частиц плазмы и, тем самым, к оптимизации трехмерных систем магнитного удержания плазмы. Такой подход к оптимизации стеллараторов привел к новому направлению инновационных {advanced} или улучшенных стеллараторных систем [17].

**Инновационные стеллараторные системы.** Инновационными называют системы с пространственной (не лежащей в плоскости) магнитной осью типа винтовой линии на воображаемом торе и с оптимизированной граничной магнитной поверхностью. Пространственная ось позволяет развязать связь длины системы с кривизной оси. Дело в том, что в случае "плоской" круговой оси равновесие улучшается с уменьшением кривизны, а устойчивость может быть улучшена при увеличении кривизны оси<sup>4</sup>. Но помимо этого в магнитных конфигурациях с пространственной осью появляется возможность влиять на топографию магнитных силовых линий.

**Значение топографии линий  $B = \text{const}$  на магнитной поверхности.** Теоретической основой нового подхода к оптимизации винтовых (а более широко, вообще трехмерных, не имеющих, как токамак, осевой симметрии) магнитных систем для удержания плазмы, является исследование топографии  $B$ -линий (линий постоянной напряженности магнитного поля на магнитных поверхностях). Именно топографией этих линий определяется характер дрейфового движения заряженных частиц, а значит, и неоклассического транспорта в области редких столкновений частиц. В идеально симметричном токамаке эти линии имеют форму окружностей с центром на главной оси тора. При этом дрейфовое движение не уводит заряженные частицы далеко от магнитной поверхности. Дискрет-

<sup>4</sup> Это достигается подбором формы ГМП, при которой магнитная силовая линия медленно проворачивается на магнитной поверхности на ее стороне, обращенной к центру кривизны оси. При этом создается важный для устойчивости плазма "средний минимум  $B$ ": средний квадрат напряженности поля растет от оси.

ность катушек тороидального магнитного поля приводит к появлению островной структуры  $B$ -линий, что вызывает дополнительные, гофрировочные потери частиц из плазмы. В стеллараторах такого рода островная структура  $B$ -линий (не путать с островной структурой магнитных силовых линий!) возникает из-за неоднородности продольного (тороидального) магнитного поля. В системах с пространственной осью непрерывное изменение при следовании вдоль системы направления градиента  $B$ , определяемого главной нормалью к магнитной оси, позволяет избежать замыкания  $B$ -линий в островки. При этом подбором ГМП можно сделать все  $B$ -линии по топологии такими же, как и в осесимметричном токамаке, т.е. замыкающимися только после полного обхода в тороидальном направлении. Такие *псевдосимметричные* системы открывают возможность существенного уменьшения неоклассического переноса в термоядерной плазме.

**Квазисимметрия.** Это непременно произойдет, если направление псевдосимметрии можно совместить с инвариантным направлением на магнитной поверхности, определяемом вектором квазисимметрии [14],

$$\mathbf{Q}_{\text{tor}} = \frac{F\mathbf{B} + \mathbf{B} \times \nabla\psi}{2\pi B^2}.$$

Здесь  $F$  и  $\psi$  — полоидальные электрический ток и магнитный поток через идущий в тороидальном направлении замкнутый контур на магнитной поверхности. В условии токамака вектор  $\mathbf{Q}_{\text{tor}}$ , имеющий размерности длины, выражается в виде  $\mathbf{Q}_{\text{tor}} = \nabla\varphi/(\nabla\varphi)^2$ , где  $\varphi$  — полярный угол цилиндрической системы координат с осью, совмещенной с главной осью тора. При условии тороидальной квазисимметрии,  $\mathbf{Q}_{\text{tor}} \cdot \nabla B = 0$ , уравнения дрейфового движения имеют даже интеграл (сохранение канонического тороидального импульса ведущего центра)

$$\psi + \rho_{\parallel} F = \text{const}.$$

В этой формуле  $\rho_{\parallel}$  — ларморовский радиус, рассчитанный по продольной (вдоль магнитной силовой линии) скорости заряженной частицы и выраженный с помощью условия сохранения энергии через  $B$  и электрический потенциал. Условие квазисимметрии нельзя выполнить во всем объеме, но приближение к нему (минимизацией гармоник в спектре  $B(\psi, \theta, \zeta)$ , зависящих от  $\zeta$ -координаты вдоль вектора квазисимметрии) дает хорошие результаты [18].

**Полоидальные квазисимметрия и псевдосимметрия.** По аналогии с тороидальными квази- и псевдосимметрией можно говорить также и о полоидальных квази- и псевдосимметрии. В этом случае вектор квазисимметрии и соответствующий интеграл движения при условии  $\mathbf{Q}_{\text{pol}} \cdot \nabla B = 0$  выражаются формулами

$$\mathbf{Q}_{\text{pol}} = \frac{J\mathbf{B} + \mathbf{B} \times \nabla\Phi}{2\pi B^2}, \quad \Phi + \rho_{\parallel} J = \text{const}.$$

Здесь  $J$  и  $\Phi$  — тороидальные электрический ток и магнитный поток через контур поперечного сечения на магнитной поверхности. Случай полоидальной квазисимметрии замечателен тем, что в отсутствие тороидального тока интеграл движения не зависит от параметров частицы. Этот случай соответствует классическому удержанию частиц: все частицы дрейфуют вдоль магнитной поверхности, их ларморовские центры не смещаются

с этой поверхности. Реализуется это условие при ортогональности  $B$ -линий и магнитных силовых линий. Оно может удовлетвориться приближенно в прямолинейных системах. Что касается криволинейных систем, то здесь, видимо, можно рассчитывать лишь на *полоидальную* псевдосимметрию. В случае стелларатора проведенные к настоящему времени исследования показывают, что в этих системах предельные по равновесию и устойчивости плазмы значения параметра "бета", по крайней мере не меньше, чем в оптимизированных системах с тороидальной псевдосимметрией. Полоидальная псевдосимметрия привлекает тем, что позволяет совместить по топологии линий  $B = \text{const}$  прямолинейные пробочные системы с криволинейными замыкателями в гибридной ловушке типа "дракон" [19], которая, в принципе, позволяет иметь высокие средние значения параметра "бета", возможно, вплоть до пригодных в реакторе с  $D-3\text{He}$  топливом.

## Заключение

1. В результате длительной, кропотливой работы больших коллективов физиков и инженеров были отвергнуты изначальные аргументы "непригодности" токамаков для термоядерного реактора, связанные с необходимостью возбуждения электрического тока. Главными из них были *физический*: необходимый для обеспечения равновесия плазмы электрический ток является опасным источником неустойчивостей плазмы; *инженерный*: невозможность непрерывной работы реактора. Оказалось — в токамаках существуют режимы устойчивого удержания плазмы; диффузия запертых на неоднородности тороидального магнитного поля частиц приводит к генерации тороидального "бутстрэп" тока, который вместе с обнаруженной возможностью безындукционной генерации электрического тока, например, путем передачи электронам импульса гиротронного излучения с большой вероятностью решают проблему стационарной работы токамака-реактора. С помощью гиротронов оказалось возможным управлять и распределением плотности тока для поддержания устойчивого режима.

Токамаки, будучи самодостаточными для термоядерного реактора, в то же время подготовили почву для развития и других, возможно, более надежных стационарных магнитных систем типа стелларатора.

2. Оптимизация формы граничной тороидальной магнитной поверхности (ГМП) вместо оптимизации закона намотки винтовых обмоток открывает новые возможности в улучшении трехмерных винтовых систем магнитного удержания; примером является хорошо оптимизированная в Гархинге система, легшая в основу W7-X (Грайфсвальд). С этим связан возникший в настоящее время всплеск интереса к хорошо оптимизированным стеллараторным системам магнитного удержания плазмы, аналогичный всплеску интереса к токамаку в 70-е годы. К этой ситуации подходит полустуловое объяснение Л.А. Арцимовича причин неослабевающего стремления решить термоядерную проблему. Она, по его словам, состоит в том, что в этом круге исследований самоуверенности физиков был нанесен сильный удар. Это же можно отнести и к проблеме стеллараторов. Но есть и другая причина интереса к стеллараторам. Период сооружения крупных термоядерных установок реакторного (или предреакторного) типа не менее десятка лет. И в этот период важно не утратить накопленный научный потенциал. Этой цели и может служить исследование возможностей улучшенных винтовых или иных стацио-

нарных систем магнитного удержания плазмы. Работа над такими системами позволила бы передать накопленный в физике плазмы опыт новому поколению, которому и предстоит завершение того важнейшего дела создания основ безопасной энергетики будущего, фундаментальный вклад в которое внес Лев Андреевич Арцимович.

## Список литературы

1. Арцимович Л А и др., in *Plasma Phys. and Control. Nucl. Fusion Res.* (Proc. 3d Int. Conf. Novosibirsk 1968) Vol. 1 (Vienna: IAEA, 1969) p. 17
2. Peacock N J et al. *Nature* (London) **224** 488 (1969)
3. Тамм И Е, в сб. *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций* (Под ред. М А Леонтовича) Т. 1 (М.: Изд. АН СССР, 1958) с. 3
4. Сахаров А Д, в сб. *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций* (Под ред. М А Леонтовича) Т. 1 (М.: Изд. АН СССР, 1958) с. 20
5. Jonson J L et al. *IEEE Transactions on Plasma Sciences* **PS-9** 142 (1981)
6. Spitzer L *Phys. Fluids* **1** 253 (1958)
7. Брагинский С И, Шафранов В Д, в сб. *2-я Международная конференция по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958* Т. 1 *Доклады советских ученых* (М.: Изд. ГУ по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР, 1959) с. 221
8. Lomas P on behalf of the JET Team Preprint JET-P (97)46 17 (1997)
9. McGuire K M et al. *Phys. Plasmas* **2** 2176 (1995)[9] JT-6[9]
10. Кадомцев Б Б *Основы физики плазмы токамака* (Итоги науки и техники. Физика плазмы, Т. 10, Ч. 1, Под ред. В Д Шафранова) (М.: Изд. ВИНТИ, 1991); Kadomtsev V B *Tokamak Plasma: A Complex Physical System* (Bristol: Institute of Physics Publ., 1992)
11. Морозов А И, Савельев В В *УФН* **168** 1153 (1998)
12. Griger G et al. "Physics Studies for Helical-axis Advanced Stellarators" (Proc. 12th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fus. Res., Nice, 1988) *Nucl. Fus. Suppl.* **2** 369 (1989)
13. Nuehrenberg J, Zille R *Phys. Lett. A* **129** 113 (1988)
14. Исаев М Ю, Михайлов М И, Шафранов В Д *Физика плазмы* **20** 357 (1994)
15. Boozer A H *Proc. Plasma Physics and Controlled Fusion Supplement* **IIA A103** (1995)
16. Shafranov V D, Mikhailov M I, Skovoroda A A, Subbotin A A "Pseudosymmetric Magnetic Confinement Systems", 1997 Int. Symposium on Plasma Dynamics in Complex Electromagnetic Fields, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Research Report 193 (1998)
17. Monticello D A et al. "Physics Considerations for the Design of NCSX" *Proc. 25th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. Prague, 1998*
18. Isaev M Yu, Cooper W A, Medvedev S Yu et al. "Plasma stability in Heliac-like Quasi-helically Symmetric Stellarators" *Nuclear Fusion* **37** 1431 (1997)
19. Shafranov V D, Mikhailov M I, Skovoroda A A "Quasisymmetrical Stellarators and Mirrors" (International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement Novosibirsk) *Fusion Technology* **35** 67 (1988)

PACS number: **01.65. + g**

## Ленинградские физтеховцы в токамачной команде Льва Андреевича Арцимовича (1962 – 1973 гг.)

М.П. Петров

Волею судьбы в начале 60-х годов небольшая группа ленинградских физтеховцев оказалась вовлеченной в исследования на токамаках в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова под руководством Л.А. Арцимовича. Это произошло благодаря следующему обстоя-

тельству. К тому времени у нас в ленинградском физтехе был разработан новый многообещающий метод диагностики горячей плазмы, основанный на анализе потока выходящих из плазмы атомов. Метод использовал тот факт, что в любой, даже очень горячей водородной плазме, которая, казалось бы, должна быть полностью ионизованной, существует небольшая фракция нейтральных атомов водорода, находящихся в тепловом равновесии с ионами. На возможность такого явления впервые указал А.Д. Сахаров при расчетах тороидального термоядерного реактора с магнитным удержанием [1]. "Эти атомы, — писал Сахаров, — должны возникнуть в плазме из-за эстафетной перезарядки нейтрального водорода, поступающего внутрь плазмы со стенок камеры". Сахаров отметил также, что фракция атомов будет очень небольшой и не сможет оказать существенного влияния на энергобаланс плазмы, но, тем не менее, заметный поток атомов будет выходить из плазмы на стенку. После публикации расчетов Сахарова на это явление обратил внимание другой крупнейший физик, тогдашний директор ФТИ Б.П. Константинов. Он предложил использовать свободно выходящие из плазмы атомы для диагностики ионов и измерения ионной температуры плазмы, так как энергетические распределения атомов очень близки к распределениям ионов. Надо заметить, что проблема измерения ионной температуры плазмы в то время стояла очень остро. Практических решений ее не просматривалось. На основе предложения Б.П. Константинова в ФТИ в лаборатории проф. Н.В. Федоренко под руководством В.В. Афросимова в 1958 – 1960 гг. была создана аппаратура для регистрации атомов, испускаемых плазмой (так называемые атомные анализаторы) и разработана методика получения энергетических распределений ионов из измеренного потока атомов [2]. К началу 60-х годов этот метод был успешно опробован на легендарной ленинградской термоядерной установке "Альфа", и результаты были представлены на конференции МАГАТЭ в Зальцбурге в 1961 г. [3]. Работа [3] вызвала в Зальцбурге большой интерес. Это и привело к тому, что у нас в ФТИ возникла мысль использовать новую диагностику на токамаках, исследования на которых бурно разворачивались тогда под руководством Л.А. Арцимовича в Москве. Предложение ФТИ было с готовностью принято, и группа ленинградцев, в составе которой был и автор этого сообщения, оказалась в отделе у Арцимовича.

Отношение Льва Андреевича к нам определялось в основном двумя факторами. Во-первых, это был большой интерес с его стороны к новому методу диагностики плазмы. Во-вторых, Лев Андреевич сам был в прошлом физтеховцем. Именно в ФТИ он сформировался в крупного ученого-физика. Поэтому все, связанное с ленинградским физтехом, вызывало априори его живой интерес. К тому же данный случай способствовал установлению помимо административно-организационных связей (Л.А. был уже тогда академиком-секретарем ООФА) прямого научного сотрудничества с ФТИ, что Лев Андреевич очень ценил.

Впервые я увидел Льва Андреевича в конце 1962 г. на семинаре в секторе токамаков (сектор 44), которым после трагической гибели Н.А. Явлинского стал руководить очень молодой тогда В.С. Стрелков. Семинар проходил в кабинете Стрелкова. Я увидел, как туда быстро вошел невысокого роста спортивно сложенный, элегантный человек и сел в приготовленное для него потертое дубовое кресло. Кстати, это кресло, вывезенное после