

PACS numbers: 01.65.+g, 28.52.-s, 52.55.Fa
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200907f.0767

Академик Б.Б. Кадомцев и Интернациональный термоядерный экспериментальный реактор ИТЭР

С.В. Мирнов

Кадо́мцев Борис Борисович (1928–1998), физик, академик РАН (1970). Основные труды по физике плазмы (устойчивость, явления переноса, термоизоляция и др.) и проблеме управляемого термоядерного синтеза. Государственная премия СССР (1970), Ленинская премия (1984).

Большой российский энциклопедический словарь, 2007 г.

Академик Борис Борисович Кадомцев принадлежал к физикам, о которых среди коллег принято говорить в превосходных степенях. Диапазон его профессиональных интересов поражает. Вышедший уже посмертно двухтомник его трудов содержит не только широко известные работы по физике высокотемпературной плазмы, давно ставшие классическими, но и работы по квантовой механике, прошедшей, как первая любовь, через всю его жизнь (Б.Б. был учеником Д.И. Блохинцева), работы по поведению вещества в сверхсильных магнитных полях, теории нелинейных и стохастических процессов, магнитным перемыканиям, теории солитонов и шаровой молнии и, конечно, по проблеме управляемого термоядерного синтеза. Во все эти вопросы Борис Борисович вносил своё оригинальное видение. Посаженные им семена ждут своего часа. Среди них, в частности, интерпретация известного *эффекта Соколова* — появления когерентной добавки у возбуждённого атома водорода, пролетающего вблизи поверхности металла. Своей интерпретации квантовой механики и эффекта Соколова Борис Борисович посвятил книгу *Динамика и информация* [2]¹, которую закончил незадолго до своей смерти. В определённой степени это его взгляд "за край горизонта". Как знать, но, может быть, лет через 20 в соответствующих энциклопедических словарях Б.Б. Кадомцев будет упомянут уже не только в качестве одного из основоположников теории устойчивости и переноса термоядерной плазмы, но и среди творцов новой интерпретации квантовой механики.

Автору случилось взаимодействовать с Борисом Борисовичем лишь в сравнительно узкой области его научной деятельности, касающейся устойчивости и переноса плазмы в токамаках. Отсюда выбор обсуждаемой темы. Несмотря на видимую узость этого предмета, он многие годы оставался для Б.Б. Кадомцева одним из первостепенных, поскольку непосредственно касался его научной и административной деятельности в качестве директора Института ядерного синтеза Российского научного центра "Курчатовский институт". Эта деятельность проходила на фоне стремительного прогресса зарубежных исследований в области управляемого термоядерного синтеза, исследований, получивших исходный задающий импульс в виде концепции "токамак", выдвинутой в нашей стране А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом в начале 1950-х годов и впервые обретшей "научное гражданство" в середине 1960-х, под руковод-

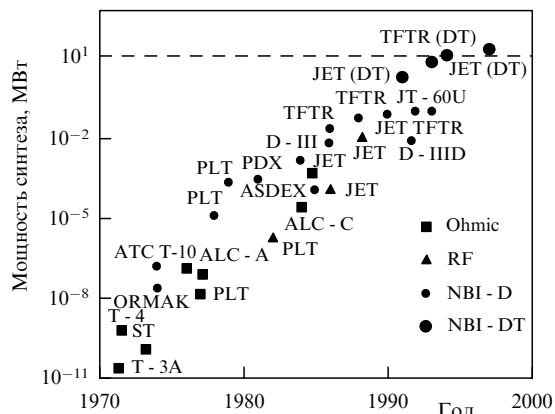


Рис. 1. Прогресс токамаков. Ohmic — только омический нагрев плазмы, RF — высокочастотный, NBI-D и NBI-DT — нагрев нейтральными пучками дейтерия соответственно без трития и с тритием.

ством Л.А. Арцимовича — предшественника Б.Б. Кадомцева на директорском посту Курчатовского института.

На рисунке 1, заимствованном автором из демонстрационных материалов Принстонской лаборатории физики плазмы (PPPL) (США), приведена динамика роста мощности дейтерий-дейтериевого (DD) и дейтерий-тритиевого (DT) термоядерного синтеза, произведённого в период 1970–1996 гг. на токамаках, созданных в разных странах. Исходные точки (нижняя часть кривой) — достижения отечественных токамаков: Т-3А, Т-4 и Т-10, в конце 1960-х — начале 1970-х годов.

Итоговый успех токамаков — выход термоядерных установок на уровень первых демонстрационных атомных станций — стал физической базой для создания первого в мире Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР (ITER) промышленного масштаба, сооружаемого сегодня во Франции силами международной коалиции (Европа, Индия, Китай, Россия, США, Южная Корея, Япония). Нелишне вспомнить, что дипломатическая и организационная активность вокруг этого проекта была инициирована нашей страной в 1985 г. в ходе известной встречи М.С. Горбачева и Р. Рейгана. И если осуществление последующих дипломатических и организационных шагов в развитии проекта ИТЭР с российской стороны легло в основном на плечи Е.П. Велихова, то роль главного отечественного эксперта по физике токамаков принадлежала Б.Б. Кадомцеву как одному из признанных основоположников современной физики высокотемпературной плазмы.

Принято считать, что первое конкретное обращение Кадомцева к физике и возможным перспективам токамаков как термоядерных реакторов, ставшее затем программным, было сделано им в статье "Неустойчивость плазмы и управляемые термоядерные реакции" [9], опубликованной в *УФН* в 1967 г. Статья эта была явно инициирована Л.А. Арцимовичем, который в том же номере журнала в обзоре состояния термоядерных исследований, предшествующем статье Кадомцева, сообщал о том, что так называемой бомовской диффузии в отечественных токамаках Т-3 и ТМ-3 не обнаружено — энергетическое время жизни плазмы в них превысило расчётное "бомовское" в десять раз, и затем следовало резюме [10]: "Этот результат есть главная

¹ См. также статьи [3–8].

опора осторожного оптимизма, с которым мы в настоящее время смотрим на дальнейшие перспективы разработки рассматриваемого направления исследований [т.е. на токамаки]".

Несмотря на всю деликатность формы, для того времени это было весьма радикальное утверждение. Дело в том, что в наиболее серьёзных зарубежных термоядерных установках (стеллараторах) в то время наблюдалась почти универсальная аномально высокая утечка плазмы поперёк сильного магнитного поля — турбулентная диффузия, названная "бомовской" по имени американского учёного Д. Бома, наблюдавшего её в 1940-е годы в газовом разряде в сильном магнитном поле. Окажись эта диффузия действительно универсальной, от идеи термоядерного синтеза в замкнутых магнитных ловушках (токамаках и стеллараторах) пришлось бы отказаться. Доказательством универсальности бомовской диффузии занимались в то время многие серьёзные теоретики. Борис Борисович, в том числе, отдал немалую дань этому предмету.

Крушение в токамаках бомовской универсальности выглядело в этом контексте явным нонсенсом. Дело в том, что концепция токамака рассматривалась в те времена многими физиками и у нас, и за рубежом как физически порочная, в отличие от стеллараторной. Электронный поток, образующий ток, текущий по плазме вдоль сильного магнитного поля токамака для придания ему винтовой геометрии, казался дополнительным энергетическим резервуаром целого букета магнитогидродинамических и кинетических неустойчивостей. Более того, окажись плазма в токамаке вдруг макроскопически устойчивой, продольное электрическое поле, приложенное к плазменному витку, должно было бы постепенно перевести все токонесущие электроны в релятивистский электронный пучок (плазменный бетатрон). От токамаков можно было ожидать ухудшения "по сравнению с Бомом", но никак не улучшения.

Однако реальность оказалась сложнее априорных представлений. Как впервые было продемонстрировано Е.П. Горбуновым и К.А. Разумовой (токамак ТМ-2, 1962 г.), в обычном макроскопически устойчивом режиме токамака переход токонесущих электронов в бетатронное ускорение не произошёл. Это — одно из фундаментальных физических явлений, на котором основана современная концепция токамака. Впоследствии было установлено, что переходу электронов в ускорение воспрепятствовала некоторая кинетическая неустойчивость электронного пучка, разбрасывающая ускоряемые электроны по углам. Спонтанное подавление этой неустойчивости в ряде экзотических режимов токамака тут же превращает его в сверхмощный бетатрон.

Первое объяснение природы этой спасительной для токамаков кинетической неустойчивости электронов было дано Б.Б. Кадомцевым и О.П. Погуце [11] в 1967 г. с привлечением механизма аномального доплеровского эффекта. Тем самым с токамаков было снято важное принципиальное ограничение. Отсутствие универсальной бомовской диффузии открывало перед этими магнитными ловушками термоядерные перспективы. В том, по-видимому, и заключалась идея Арцимовича — выступить совместно с Кадомцевым как с одним из ведущих специалистов именно в области плазменной турбулентности, казавшейся тогда многим безграничной. Какие выводы делает Кадомцев в своей программной статье?

"Некоторое время назад ввиду нескончаемого потока статей, в которых обнаруживались всё новые и новые виды неустойчивостей, казалось, что мы никогда не достигнем полного описания неустойчивостей разреженной плазмы в сильном магнитном поле. К счастью, в последнее время ситуация стала улучшаться. Несмотря на то, что активность в области исследований неустойчивостей плазмы сохраняется на прежнем уровне, становится ясно, что реальную угрозу для удержания высокотемпературной плазмы в магнитном поле представляет лишь некоторое ограниченное число неустойчивостей" [9]. То есть море опасных неустойчивостей ограничено. Это заявление понравилось не всем — пессимизм в отношении устойчивости высокотемпературной плазмы был в то время правилом хорошего тона. В качестве наиболее опасной из остающихся неустойчивостей Кадомцев назвал дрейфово-температурную неустойчивость, проявлением которой должна была стать повышенная утечка плазмы поперёк магнитного поля, напоминающая функционально бомовскую, но умноженную на отношение ларморовского радиуса иона к малому радиусу плазменного шнура. Сегодня перенос такого типа носит название гиробомовского и принят как наиболее вероятный для ИТЭРа, но уже не на основе теоретического предвидения, а на основе анализа фактических данных, полученных в ходе многочисленных экспериментов на реальных токамаках (см. рис.1) за прошедшие сорок лет.

Экспериментальная база 1966 года не позволяла делать такие обобщения. Но уже позволяла проводить рассуждения в "долях от Бома". Задавшись предельно возможной (с точки зрения теоретика) индукцией магнитного поля $B_T = 10$ Тл, создаваемого с помощью сверхпроводников, и невероятно высокой по тем временам температурой плазмы $T = 10$ кэВ, Кадомцев вычислил минимальные размеры токамака-реактора с зажиганием дейтерий-тритиевой смеси. При бомовской утечке малый радиус тора a оказался равным 14 м, что, очевидно, находилось за пределами разумного. При утечке на два порядка меньшей (время жизни "100 Бомов") радиус a принял более приемлемое значение — 1,4 м. Так величины $a = 1,4$ м, $B = 10$ Тл стали ориентировочными параметрами токамака-реактора DT-синтеза.

Возможность уменьшить плазменные потери до уровня 1/100 от бомовских в 1967 г. казалась практически недостижимой. В заключение Б.Б. Кадомцев предостерегал энтузиастов управляемого синтеза [9]: "Для достижения управляемых термоядерных реакций на этом пути [т.е. токамаков] необходимо преодолеть огромные технические трудности, связанные с проблемой создания магнитного поля порядка 10 Тл в объёме порядка многих кубометров. Эти выводы носят предварительный характер. Чтобы получить уверенность в их правильности, необходимо провести обширные физические исследования...".

Дальнейшие физические исследования, действительно, прояснили ситуацию. Уже через год на Новосибирской конференции под эгидой Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) (1968 г.) Л.А. Арцимовичем было сообщено, что энергетическое время жизни плазмы, полученной на отечественных токамаках Т-3 и ТМ-3, превысило бомовское в 40 раз. У недоверчивых зарубежных учёных созрело предложение проверить

на токамаке Т-3 наши измерения ключевого параметра эксперимента — электронной температуры — прямым методом лазерного рассеяния, только что разработанным в Англии. Ещё через год (в 1969 г.) совместная советско-английская группа успешно провела такие измерения и, как с шумом было объявлено газетчиками, "получила результаты даже более высокие, чем сообщалось русскими". (Русские измеряли среднюю температуру по диамагнетизму плазмы, а лазер давал локальную. Совпадение оказалось глубоко в классе точности измерений.)

Прямое доказательство существования в токамаках электронной температуры порядка 1 кэВ стало для многих сенсацией и вызвало перестройку ряда ведущих исследовательских программ за рубежом. К новым программам были привлечены серьёзные силы и созданы крупные токамаки (см. рис. 1), оснащённые средствами дополнительного нагрева плазмы — пучками нейтральных атомов (NBI, см. рис. 1), системами высокочастотного нагрева плазмы (RF, см. рис. 1) и современной диагностикой. В итоге в 1979 г. на токамаке PLT (Princeton Large Torus) (США) была получена ионная температура около 10 кэВ, а в 1997 г. на токамаке JET (Joint European Torus) в эксперименте с DT-смесью (NBI-DT, см. рис. 1) был достигнут так называемый режим перевала — примерное равенство полученной мощности термоядерного синтеза (около 17 МВт) и теплового потока из горячей зоны плазменного шнура, т.е. тепловых потерь плазмы. Эти экспериментальные результаты положены в основу ИТЭРа. Разрыв между бомовским временем и реальным энергетическим временем жизни плазмы (около 1 с) достиг при этом нескольких сотен раз, что позволило снизить тороидальное поле ИТЭР с 10 Тл до 6 Тл при малом радиусе шнура 2 м. Тем самым концепция токамака-реактора приобрела конкретные очертания, оставаясь примерно в тех энергетических пределах, которые декларировались Б.Б. Кадомцевым в 1967 г. (Напомним, что исходный тороидальный магнитный реактор, предложенный в начале 1950-х годов А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом, имел тот же малый радиус 2 м и магнитное поле 5 Тл, но был рассчитан на DD-синтез, а не на DT-синтез!)

В 1973 г., после смерти Л.А. Арцимовича, Б.Б. Кадомцев занял его место руководителя отдела плазменных исследований (впоследствии Института ядерного синтеза) Института атомной энергии им. И.В. Курчатова. Переход в новое качество был произведён Кадомцевым под определённым давлением "трудящихся масс", которые не желали видеть в кресле директора "чужих" академиков.

Как признавался сам Борис Борисович в интервью, данным им *Литературной газете* накануне этих драматических событий, он был по характеру учёным-одиночкой, взаимодействующим не более чем с одним-двумя аспирантами. Однако в новом качестве ему пришлось попеременно становиться то общественным, то хозяйственным деятелем, оставаясь при этом в душе скептически мыслящим учёным, постоянно опасавшимся спонтанного возникновения новой плазменной неустойчивости, способной вдруг превратить в бессмыслицу ту или иную акцию его директорской деятельности. Похоже, это его тяготило. Он не был прирождённым руководителем масс. Но "токамачная" наука определённо выиграла от такого перехода — напряжённые размышления

директора о судьбах направления, лидирующего в его институте, материализовались в виде некоторых свежих плодотворных идей, давших новые импульсы экспериментальным и теоретическим исследованиям. Две наиболее популярные физические идеи Б.Б. Кадомцева оказали, по мнению автора, экспериментирующего в области устойчивости плазмы, наиболее глубокое воздействие на понимание физиками-плазменщиками процессов, определяющих макроскопическую устойчивость токамаков ("пределы токамака"). Эти идеи органически вошли в физическую базу ИТЭРа:

1. Идея магнитного перезамыкания в ходе развития крупномасштабных неустойчивостей токамака (*модель внутреннего срыва по Кадомцеву*, 1975 г.).

2. Идея идеальной винтовой неустойчивости типа *вакуумных пузырей* в условиях малого магнитного шира (совместно с О.П. Погуце, 1973 г.).

Идея магнитного перезамыкания для объяснения перехода идеальных (без изменения полного магнитного потока) винтовых неустойчивостей в резистивные, развивающиеся с существенными потерями магнитных потоков, была почерпнута Кадомцевым из астрофизики. Первым примером успешного применения идеи магнитного перезамыкания стала его интерпретация так называемого внутреннего срыва или "пилообразных колебаний" — характерной неустойчивости центральной части плазменного шнура токамака, проявляющейся в строго периодических релаксационных колебаниях электронной температуры его центральной зоны.

Как показал эксперимент, релаксациям предшествует развитие винтового возмущения $m = 1$, резонансного (т.е. совпадающего по геометрии) с замкнутой винтовой магнитной структурой, создаваемой плазменным током вблизи центра.

Для того чтобы наглядно продемонстрировать механизм этого явления, Кадомцев воспользовался ранее введённым им совместно с О.П. Погуце так называемым дополнительным магнитным полем \mathbf{V}^* , определённым в окрестности некоторой выделенной замкнутой винтовой магнитной структуры как векторная разность реального магнитного поля \mathbf{V} и расчётного — магнитного поля указанной замкнутой магнитной структуры, если распространить её на всю интересующую нас область. То есть в зоне, занятой этой структурой, поле \mathbf{V}^* тождественно равно нулю. В этой зоне все магнитные силовые линии имеют одну винтовую геометрию и поэтому не могут пересекаться при движении относительно друг друга. Такая магнитная конфигурация получила название конфигурации с *нулевым магнитным широм*.

Отличие поля \mathbf{V}^* от нуля означает, что соответствующие силовые линии имеют угол наклона, отличный от заданного замкнутой магнитной структурой, и они должны были бы пересекаться при своём относительном движении, т.е. перезамыкаться (случай *ненулевого шира*). Электропроводящая плазма, вмороженная в магнитное поле, должна препятствовать такому пересечению и перезамыканию. А именно, в области предполагаемого пересечения обязаны индуцироваться препятствующие ему электрические токи — *экстратоки*. Тем самым в токамаках обеспечивается сохранение магнитных потоков и магнитной конфигурации, удерживающей плазму. Аномально быстрая диссипация индуцированных токов означает столь же быстрое перезамыкание магнитных

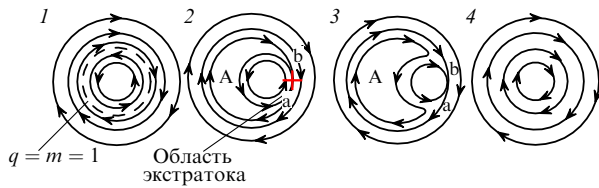


Рис. 2. Схема внутреннего срыва в токамаке, "по Кадомцеву".

полей \mathbf{V}^* , потерю магнитных потоков и соответственно магнитной и плазменной энергии.

Реально наблюдаемая аномально быстрая диссипация экстратоков имеет, очевидно, бесстолкновительную природу, её основа, вероятнее всего, — некоторая разновидность кинетической неустойчивости электронного пучка в плазме. В астрофизике для описания наблюдаемого там аномально быстрого магнитного перезамыкания используют известную модель Свита – Паркера. В токамаках, к сожалению, процессы магнитного перезамыкания протекают более резко. Физика этих процессов — один из предметов современных исследований.

На рисунке 2 изображена принципиальная схема внутреннего срыва в токамаке *по Кадомцеву*. Физическая причина внутреннего срыва согласно его модели — это чрезмерная концентрация плазменного тока вблизи оси токового шнура из-за преимущественного нагрева плазмы в центре и, следовательно, возрастания там её электропроводности. В результате концентрации плазменного тока в центральной области шнура образуется замкнутая винтовая магнитная структура (показанная на рис. 2 штриховой линией), созданная магнитными силовыми линиями, замыкающимися на себя через один обход вокруг тора ($m = 1$). Это первое необходимое условие внутреннего срыва. На рисунке 2 представлена предполагаемая Кадомцевым эволюция распределений поля \mathbf{V}^* в центре шнура. Рассмотрены четыре характерные позиции. Позиция 1 — начальная стационарная, с кольцевой замкнутой магнитной структурой (штриховая линия), максимальным магнитным потоком и энергией, накопленными в центре шнура. Плотность тока спадает от центра к периферии шнура, соответственно этому поле \mathbf{V}^* меняет знак при переходе через штриховую линию. Позиция 2 — развитие в центре идеальной, т.е. сохраняющей полный магнитный поток, винтовой ($m = 1$) неустойчивости — провокатора внутреннего срыва. Причина появления этой неустойчивости — второе необходимое условие срыва — накопление вблизи оси чрезмерно высокой энергии плазмы. Её видимое проявление — винтовой ($m = 1$) сдвиг токовой оси относительно центра шнура. Область a–b — зона генерации экстратока (отмеченная крестиком), препятствующего дальнейшему сдвигу винтового токового возмущения наружу, пока ещё при сохранении полного магнитного потока, охватываемого винтовой осью возмущения. Позиция 3 — собственно внутренний срыв — диссипация экстратока, означающая перезамыкание магнитных полей \mathbf{V}^* , направленных навстречу друг другу по обе стороны от зоны замкнутой винтовой магнитной структуры ($m = 1$), выдавливание наружу горячей плазмы бывшего центра шнура, потеря магнитного потока и образование в центре относительно холодного магнитного острова A с однородным распределением \mathbf{V}^* , т.е. ликвидация замкнутой структуры $m = 1$ во всей цент-



Рис. 3. Временная (микросекундная) последовательность SX-профилей при развитии внутреннего срыва в токамаке "Tokamak de Varenna" [12].

ральной области (позиция 4), что означает уплотнение токового распределения в центре шнура. Таким образом, начавшись с идеальной неустойчивости, процесс переходит к диссипативной неустойчивости, сопровождающейся потерями магнитной и тепловой энергии плазмы. Принципиальная особенность внутреннего срыва — его локальность. Внутренний срыв не вызывает каких-либо радикальных ухудшений состояния плазменного шнура токамака в целом. Вслед за уплотнением токового распределения в центре наступает спокойная фаза, в ходе которой обостренный профиль тока восстанавливается и процесс повторяется в виде квазистационарных релаксаций.

Модель Кадомцева получила широкую известность. Она неоднократно подтверждалась экспериментально, идея магнитного перезамыкания прочно вошла в арсенал физиков-"токамачников".

На рисунке 3 в качестве примера приведены снимки, полученные с помощью рентгеновской томографии, центральной области шнура в ходе внутреннего срыва на канадском токамаке "Tokamak de Varenna". Контур равной интенсивности мягкого рентгеновского излучения примерно соответствует равной температуре электронов. Легко видеть, как горячее ядро за несколько десятков микросекунд "выдавливается" из центра, а его место занимает холодная зона, практически следуя схеме рис. 2.

Следующая конструктивная идея Б.Б. Кадомцева (совместно с О.П. Погуце) позволяет объяснить природу большого срыва в токамаке. Это идея идеальной винтовой неустойчивости типа вакуумных пузырей в условиях малого магнитного шира.

Большой срыв (или просто срыв) в токамаке в отличие от внутреннего захватывает всю зону протекания тока, охлаждая за несколько сотен микросекунд весь шнур — от периферии до центра. Это — самая серьёзная неустойчивость, угрожающая токамаку как реактору. Зона развития неустойчивости срыва окаймляет область допустимых режимов токамака, реально определяя его предельные параметры ("пределы токамака"). Первый вопрос, который она вызывает: что определяет быстроту её развития и стремительность переноса холодной плазмы с периферии в центр шнура? Идея вакуумных пузырей даёт ответ на этот вопрос. Схематически она представлена на рис. 4.

Если задать на границе шнура возмущение в виде вакуумного пузыря — вакуумной трубки (рис. 4а), ориентированной вдоль винтового поля токамака, создаваемого суперпозицией тороидального магнитного поля \mathbf{V}_T и полоидального поля тока \mathbf{V}_p , то запасаемая в таком пузыре магнитная энергия должна быть равна величине $(B_T^2 + B_p^2)/8\pi$, умноженной на объём трубки. Если выбрать теперь такую же трубку в

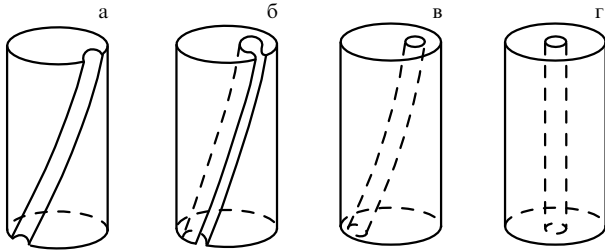


Рис. 4. Последовательность проникновения вакуумного пузыря в центр шнура [13].

центре шнура (рис. 4г), то её магнитная энергия будет пропорциональна уже только $B_T^2/8\pi$ (полоидальное магнитное поле в центре пренебрежимо мало). Таким образом, вакуумному пузырю энергетически выгодно переместиться с периферии в центр шнура, т.е. возникнувший на краю вакуумный пузырь оказывается потенциально неустойчивым. Процесс такого перемещения показан на рис. 4б, в. Что может ему воспрепятствовать? Легко показать, что воспрепятствовать может магнитный шир. Такое перемещение возможно лишь в условиях нулевого шира по всему сечению шнура, когда возмущение, продвигаясь к центру, только "раздвигает" магнитные силовые линии, не пересекая их. Магнитные потоки оказываются при этом невозмущёнными, т.е. речь идёт об идеальной винтовой неустойчивости с характерным для неё исключительно высоким инкрементом. Но нулевой шир в условиях токамака должен соответствовать идеально плоскому распределению тока по сечению, неосуществимому в условиях реального эксперимента, когда плотность тока следует за электронной температурой (т.е. электропроводностью) плазмы, разной в различных частях шнура. В действительности именно магнитный шир обеспечивает существование плазменного шнура в токамаке, предотвращая прорыв в центр холодной плазмы с его периферии. Однако, как можно было видеть уже на примере развития внутреннего срыва, внутренняя неустойчивость может приводить к уплощению токового распределения в центре шнура, т.е. вызывать локальное снижение магнитного шира. Эксперименты (С.В. Мирнов, И.Б. Семёнов, токамак Т-4, 1976 г.) показали, что за несколько десятков микросекунд до развития большого срыва в центре шнура развивается мощный единичный аналог внутреннего срыва, захватывающий уже не только область развития возмущения $m = 1$, но и область $m = 2$. Итогом этого становится падение магнитного шира практически во всей горячей зоне плазменного шнура, т.е. выполнение условий проникновения в центр "холодных пузырей" по модели Кадомцева–Погуде. Выяснение механизма срыва, определение его предшественников и области безопасной работы токамака-реактора — эти задачи являлись в период создания физической базы ИТЭРа одними из приоритетных для Б.Б. Кадомцева.

На чём основана наша уверенность в том, что, в ИТЭРе будет достигнута запланированная мощность DT-синтеза 500 МВт? Необходимая для этого температура плазмы (более 10 кэВ) сегодня уже получена, необходимая плотность плазмы n порядка 10^{20} м^{-3} для современных токамаков не является рекордно высокой (рекорд — $n \approx 10^{21} \text{ м}^{-3}$). Рекордно большим должно

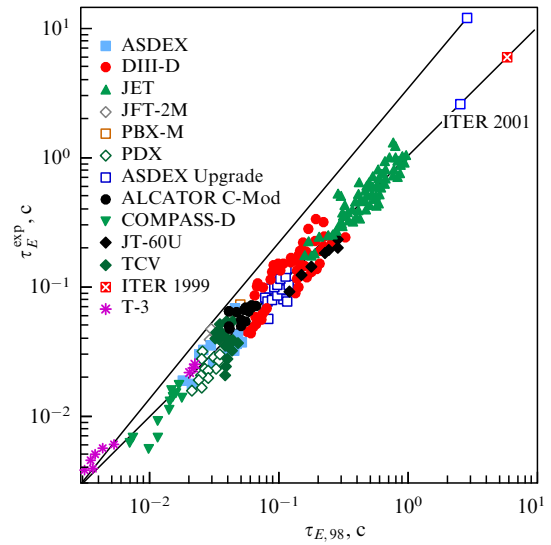


Рис. 5. Экспериментально найденные значения τ_E и экстраполяции $\tau_{E,98}$ и $\tau_{E,68}$.

стать энергетическое время жизни τ_E . Оно должно достичь 3–5 с (сегодняшнее значение 1 с).

Параметрический анализ баз данных, полученных на разных токамаках с магнитной геометрией, подобной геометрии ИТЭРа, позволил вывести "скейлинг" ИТЭРа для τ_E :

$$\tau_{E,98} = 0,0365 I_p^{0,97} B_T^{0,08} P_H^{-0,63} n^{0,41} M^{0,20} R^{1,93} \left(\frac{a}{R}\right)^{0,23} k^{0,67} \text{ с,}$$

где $2a$ — поперечный размер в метрах, R — большой радиус тора [м], I_p — ток [МА], текущий по плазме, n — плотность [10^{19} м^{-3}], B_T — тороидальное магнитное поле [Тл], P_H — мощность [МВт] нагрева, M — масса ионов в массе протона, k — удлинение плазменного шнура по вертикали. Параметры ИТЭРа дают τ_E около 4 с. Рисунок 5 позволяет оценить отклонение от этого закона реальных τ_E , полученных на разных токамаках. Округляя и пренебрегая степенями с показателями, меньшими 0,2, этот закон можно записать в более понятном виде:

$$\tau_{E,98} \sim I_p n^{0,4} R^{1,7} a^{0,2} P_H^{-0,6} k^{0,7}.$$

В таком виде он оказывается очень похожим на закон подобия, представленный Л.А. Арцимовичем в 1968 г. на Новосибирской конференции МАГАТЭ: $\tau_{E,68} \sim \sim B_p a^2 n^{1/3}$, или $\tau_{E,68} \sim I_p n^{0,33} a$, так как $B_p \sim I_p/a$.

Подставив в это выражение параметры ИТЭРа, физик в 1968 г. (абсолютные значения τ_E составляли тогда 1–6 мс) получил бы значение 12 с, всего лишь в три раза большее, чем то, которое получил бы тот же физик тридцатью годами позднее. Экстраполяция 1968 г. представлена верхним лучом на рис. 5. Таким образом, можно констатировать, что даже при увеличении τ_E в 1000 раз токамак как физический объект демонстрирует удивительно стабильное подобие. Очевидно, оно сохранится — при переходе от сегодняшних токамаков до ИТЭРа τ_E должно возрасти только в четыре раза.

Настораживает, однако, важная отличительная особенность выражения для $\tau_{E,98}$ — убывающая зависимость от мощности нагрева $\sim P_H^{-0,6}$. Закон подобия $\tau_{E,68}$ её не обнаруживал, поскольку он был получен в условиях

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, Pitaeviskii 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/UFN.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). Предлагая подобную систему, Спитцер исхо-