

УДК 533.9

ВИТАЛИЙ Д. ШАФРАНОВ И НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

© 2019 г. Л. Е. Захаров^{a, b, c, *}^a *LiWFusion, P.O. Box 2391, Princeton NJ, 08543, USA*^b *Факультет физики Хельсинского университета, Хельсинки, Финляндия*^c *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Отдел физики плазмы, Москва, Россия***e-mail: lezprinceton@gmail.com*

Поступила в редакцию 03.06.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 20.06.2019 г.

Настоящей статьей я попытался выразить свою глубокую признательность Виталию Дмитриевичу Шафранову, который был моим руководителем, другом и наставником более 20 лет. Он знаменит своей теорией равновесия, которая широко признана как одна из основ концепции токамаков. С течением времени может казаться, что первоначальный вклад основателей физики токамаков теряет свою значимость, уступая новым результатам исследований и моделям. Как показано в статье, это не так, и прогресс со времен основателей потерян. После шести десятилетий токамаки все еще не могут продемонстрировать мощность термоядерного синтеза, превышающую нагрев плазмы извне. В противоположность этому, возвращение к основам физики токамаков предлагает гораздо более эффективный подход к термояду с на порядок лучшим удержанием плазмы совместимым с горячей плазмой.

DOI: 10.1134/S0367292119120096

В 1929 г. И.Е. Тамм (тогда ему было 34 года) в своем учебнике “Основы теории электричества” описал специальный случай бесконечной магнитной силовой линии, которая плотно покрывает замкнутую тороидальную поверхность. На максимально упрощенном примере прямого проводника с током и соосного с ним кольцевого проводника с током, которые образовывали осесимметричную систему, он доказал существование вложенных магнитных поверхностей во всем объеме тора.

В 1950–1951 гг. А.Д. Сахаров (тогда ему было 29), бывший аспирант Тамма, предложил способ удержания высокотемпературной плазмы в тороидальном магнитном поле с вращательным преобразованием, внося этот новый необходимый элемент, делающий удержание возможным. Замечательно то, что вращательное преобразование уже присутствовало в магнитной конфигурации Тамма с бесконечными силовыми линиями на тороидальных поверхностях.

По забавной случайности, когда Тамм сделал свое открытие в 1929 г., родился и В.Д. Шафранов, который в 1951 г. написал отчет, известный как статья “Устойчивость гибкого проводника в продольном магнитном поле”. Шафранов добавил к концепции удержания плазмы Тамма–Сахарова третий критический элемент, а именно, необходимое условие устойчивости $q > 1$. Оно требует, чтобы тороидальное магнитное поле было бы настолько сильным, чтобы заставить магнитные силовые ли-

нии делать больше оборотов в тороидальном направлении, чем вокруг плазмы.

Математический анализ устойчивости был настолько чистым и строгим, что академик М.А. Леонтович, заведующий теорией плазмы в ЛИПАН (ныне Национальный Исследовательский центр “Курчатовский институт”), согласился стать соавтором работы [1]. Это было исключение: М.А. избегал быть соавтором работ своих сотрудников даже в случаях, когда его руководство было существенным.

В наше время, когда есть склонность понимать роль теории как интерпретацию измерений, эта статья Шафранова, вероятно, была бы либо отвергнута, либо ввергнута в полугодовой или годовой спор с рецензентами, типичными, например, для журнала *Physics of Plasmas*. Действительно, вместо плазмы В.Д. Шафранов рассматривал несуществующий в реальности гибкий сверхпроводник. Скинированное распределение тока также было нереальным для плазмы, которая вообще не является сверхпроводящей. Кроме того, формальным результатом работы было то, что гибкий цилиндр с током всегда неустойчив.

До сих пор для меня остается загадкой, как молодой человек в 21 год понял, что суть модели заключается в винтовой, кинк-моду $m/n = 1/1$ (среди множества остальных), и что критерий дестабилизации будет работать для тороидальной плазмы. Это глубокое понимание особой природы кинк-моды $m = 1$, которая нечувствительна к распределению тока плазмы, стоит за уверенным термином

“Устойчивость” в названии статьи Шафранова. Для сравнения, в работе Крускала–Шварцшильда [2] 1954 г. с названием “О некоторых неустойчивостях полностью ионизированной плазмы”, критерий Шафранова, названный позже критерием Крускала–Шафранова, как и мода $m = 1$, терялся среди многих других плазменных неустойчивостей.

Другой загадкой для меня была твердая вера Шафранова в условия устойчивости идеальной плазмы. Он никогда не обращал внимания на скорость роста или прогнозирование временного развития МГД-неустойчивости. И его мнение о том, что действительно важно оказывалось безошибочным. Приведу пример: до сих пор для многих людей в сообществе термояда остается непонятным, почему идеальные условия устойчивости так хорошо работают в токамаке. Олег Погуце объяснил мне (когда-то в 1970-е гг.), что неидеальная плазма токамака ведет себя как сверхпроводник из-за очень высокой электронной теплопроводности вдоль силовых линий. Это свойство предотвращает генерацию нормальной составляющей магнитного поля на поверхности плазмы. Электроны, прикрепленные к линиям магнитного поля, делают плазму намного более стабильной, чем, например, жидкий металл. В связи с этим свойством высокотемпературной плазмы условия идеальной устойчивости эквивалентны отсутствию возмущенного равновесия, которое описывает реальную, неидеальную плазму.

В начале, новые теоретические результаты Шафранова по критерию устойчивости $q > 1$ не были восприняты в полной мере, несмотря на их строгость и конкретность для разработки тороидальных экспериментов. Людям не нравились ограничения на ток плазмы, а также технические сложности из-за необходимости сильного тороидального поля. Наука и два защитника сильного тороидального поля, Шафранов и Д.П. Иванов взяли свое только в 1958 г., когда Н.А. Явлинский построил первый токамак, способный реализовать $q > 1$. Это было рождение токамака, сочетающего в себе 3 необходимых условия от Тамма, Сахарова и Шафранова.

На самом деле, для тороидальной плазмы было необходимо еще одно условие удержания, а именно, плазменное равновесие. Теория равновесия Шафранова — это его наиболее признанный вклад в термояд. Теория равновесия является основой всего магнитного ядерного синтеза. Сформулированная в 1950–60 гг., она до сих пор дает критически важные результаты в XXI в.

В начале 1960-х годов Шафранов показал, что уравнения равновесия верны, по существу, для любой плазмы в установках для ее удержания, даже при наличии магнитогидродинамических (МГД) колебаний.

Объяснение этого было очень полезной частью образования, которое он дал мне. Из-за важности модели равновесия как для токамаков, так и стеллараторов, он обращал внимание на все детали равновесия, в том числе на требования к внешним

полям, на влияние электропроводящих структур, магнитную диагностику, позиционную устойчивость, точные и асимптотические аналитические решения, мотивацию численного моделирования равновесия.

Токамаки с некруглым сечением, предложенные Шафрановым и Арцимовичем в 1972 г. открыли [3] возможность для улучшенного удержания плазмы и контроля ее взаимодействия со стенкой с использованием полоидальных диверторов. В течение первых десяти лет обе они привели к существенному прогрессу в исследованиях на токамаках и, в частности, открытию плазменного режима H-моды с улучшенным удержанием. К сожалению, то же самое открытые H-моды отбросило идею диверторов, способных откачивать плазму [4].

Я был восхищен шафрановской теорией равновесия в стеллараторах с пространственной осью, где он ввел понятие комплексной кривизны, новое для дифференциальной геометрии. На мой взгляд, должное применение этой теории к краю токамака, где линии магнитного поля от плазмы могут быть связаны с диверторными пластинами, может дать понимание ELM (краевых локализованных мод).

Я очень благодарен Шафранову за то, что он вселил в меня уверенность в важности строгих условий равновесия. Одним из примеров является мой прогноз 2005 г. стабилизации края плазмы литием [5]. Откачка частиц плазмы, обращенной к ней поверхностью лития, приводит к конечной плотности тока плазмы на сепаратрисе. Сидя в пультовой токамака CDX-U (первый токамак с жидким литием в PPPL) и наблюдая неожиданный разрыв шланга с охлаждающей водой, который “удачно” за 3 ч до планового времени, оборвал последнюю экспериментальную кампанию на CDX-U, я вдруг понял, что в соответствии с энергетическим МГД-принципом все МГД-моды вблизи края плазмы (как идеальные, так и резистивные) должны быть стабилизированы литием. И поскольку МГД энергетический принцип эквивалентен анализу равновесия, этот результат является надежным и предсказательным для реальной плазмы. В 2007 г. эксперименты NSTX (PPPL, Принстон, Нью-Джерси, США) подтвердили полную стабилизацию ELM при откачке литием. После этого, простая регулировка количества испаренного лития в вакуумную камеру между разрядами стала использоваться для управления типом и поведением ELM.

Другой пример связан с любимой Шафрановым кинк-модой $m/n = 1/1$, забытой почти на 3 десятилетия, но ставшей самой горячей темой для ИТЭРа в 2007 г. В определенный момент во время вертикальной неустойчивости в JETe (крупнейшем в мире токамаке), когда поперечное сечение плазмы уменьшается из-за прямого контакта со стенкой, запас устойчивости q падает до предела Крускала–Шафранова $q = 1$. Это возбуждает упомянутую кинк-моду, которая создает горизонталь-

ную (боковую) силу на вакуумную камеру. Противостоять такой силе очень трудно, особенно в больших токамаках, к тому же в случае ИТЭРа его камера и силовые элементы были в основном уже спроектированы.

В 1996 г. инженеры JET (Р.Н. Литуновский и группа П. Нолла) объяснили силы, используя примитивную модель кинк-моды путем замены плазмы на обычный проводник [6, 7]. Они получили закон подобия (скейлинг) для боковых сил, который спустя 10 лет встревожил дизайнеров ИТЭР. Физически, модель была не совсем удовлетворительной: она предсказывала, что электрические токи в камере текут в направлении, противоположном измерениям на JET. В 2007 г. я был приглашен в JET для обсуждения ситуации и определения обоснованности скейлинга 1996 г. Я подтвердил его правильность с использованием теории равновесия Шафранова [8]. Моя плазменная модель дала направление токов, совпадающее с измерениями токов в стенке. Я назвал их Niго-токами. Они противоположны полному току плазмы. Полученный скейлинг для сил был практически таким же, как и раньше в 1996 г. ИТЭР принял скейлинг для поправок в проекте. Две ошибки, допущенные инженерами JET, а именно: (а) замена плазмы неидеальным гибким проводником и (б) подстановка вместо реального смещения плазмы его величины, восстановленной по магнитным измерениям, благополучно скомпенсировали друг друга и привели к их правильному скейлингу.

Я хотел бы отметить, что если бы в 1996 г. те же инженеры рассматривали модель гибкой сверхпроводящей нити 21-летнего Шафранова (которая дала рождение токамаку), они бы получили и правильный скейлинг и объяснение токов в стенке камеры. Предсказанное моей теорией направление токов в стенке камеры были противоположно взглядам всего сообщества, работающего на токамаках. До сих пор оно не решается признать этот основной индуктивный эффект в срывах. Мне как автору теории было бесполезно тратить усилия на убеждение тех, кто не признает основы теории токамака. Вместо этого, с Сергеем Герасимовым (руководителем магнитной диагностики на JETe) мы создали экспериментальную базу срывов на JETe, выделив ее из общей базы данных. Более 2500 адекватных случаев вертикальных срывов было детально проанализировано. Результатом было 100% (!) согласие в направлении измеренных и теоретически предсказанных токов в камере.

Я не знаю подобного успеха теории в объяснении экспериментальных результатов на токамаках. Шафрановская теория равновесия отлично работала даже в таком запутанном явлении, как срыв, которое представляет собой быструю эволюцию равновесия. Эта же теория обесценила 3-мерные МГД численные коды, где плазма с 1970-х годов моделируется с использованием модифицированного гидродинамического численного алгоритм с добавлением (весьма сомнительным) плазменных

и электромагнитных эффектов. В отличие от жидкости, инерция плазмы незначительна, но она используется в плазменных кодах для продвижения на шаг по времени. На JETe баланс сил в плазме создает силы на структуры камеры на 8 порядков больше, чем сила инерции плазмы. Огромные численные проблемы, которые вызваны этим бессмысленным подходом, остаются нерешенным до сих пор. Вместо обычного МГД я написал специфичный для токамака набор уравнений, названный Tokamak MHD (TMHD) [9], где стандартное уравнение движения заменяется уравнением равновесия, которое описывает основной баланс сил, и уравнением эволюции формы плазмы. Первоначально, Кадомцев и Погуце [10] ввели этот подход в 1973 г. для неустойчивости с винтовой симметрией.

Как часть, статья о TMHD содержит мое раннее изобретение в теории стеллараторов, а именно, специальные реперные (Reference) магнитные координаты (RMC). Очень горжусь тем, что в мрачном для PPPL 1998 г., сразу после закрытия программы TFTR, я смог сделать что-то сравнимое по теоретическому качеству с работами Шафранова. В конце этого года на конференции Американского физического общества, на котором присутствовал Шафранов, мне было особенно приятно представить ему свою теорию.

Он был явно впечатлен: определение RMC и быстрый простой алгоритм их генерации решали проблему, которую он знал с 1950-х годов, а именно, как практически конструировать вложенные координаты с наилучшим их выравниванием с трехмерным эргодическим магнитным полем. RMC подход исключает широко используемый, но сомнительный и весьма неэффективный метод следования магнитным силовым линиям для построения вложенных координат. Вместо этого RMC предлагает строгую формулировку задачи и использует преобразование Фурье со значительным повышением численной производительности и совместимым с графическими процессорами (GPU).

После нашего обсуждения RMC Шафранов указал на еще одну очень старую нерешенную проблему равновесия в стеллараторах, связанных с вложенностью магнитных поверхностей и принципом Хамады. Бесчисленные теоретические работы по трехмерным равновесиям опираются на предположение о вложенных поверхностях, но вложенность в трехмерном случае — это исключение. Ликвидация островов (особенно с использованием численных кодов, которые не используют RMC) является серьезной проблемой. Шафранов предложил мне подумать, нельзя ли генерировать вложенные равновесия более простым путем. Решение пришло в 2004 г. (через 44 года после постановки задачи Хамадой) и опубликовано недавно [11].

Отмечу, что решение этих двух фундаментальных задач стелларатора осталось незамеченным стеллараторным сообществом и не используется. Ситуация похожа с широко используемой реконструкцией равновесия, которая представляет со-

бой некорректную самую сложную проблему в обычном 2-мерном равновесии токамаков. Строгая теория была создана в 2008 г. [12], которая включает анализ чувствительности и алгоритм для наилучшей реконструкции. Я сам успешно использовал ее только один раз, чтобы помочь группе Фреда Левинтона продвинуть новую диагностику, основанную на сдвиге линии Штарка от мегавольтного пучка нейтральной инжекции в ИТЭРе [13]. До сих пор каждый токамак продолжает полагаться на ненадежную и противоречивую традиционную методику реконструкции.

Игнорирование строгих теорий и их непринятие для практики аналогичны той же ситуации, с которой Шафранов столкнулся в середине 1950-х гг. Но потом, его теория равновесия была принята к практическому использованию, его токамак с некруглым сечением стал единственным вариантом для новых машин. Полоидальный дивертор присутствует почти на каждом токамаке. Прогресс в нагреве плазмы с помощью нейтральной инжекции (NBI) открыл дорогу к высоким температурам, приближая их к уровню, необходимому для горения плазмы, и был настолько очевиден, что в 1980-х годах Токамак стал доминирующей концепцией ядерного синтеза, потенциально готовым для его демонстрации в смеси дейтерия и трития (DT).

В 1994 г. токамак TFTR достиг мощности термоядерного синтеза $P_{DT} = 10$ МВт из DT плазмы на долю секунды [14, 15]. Вскоре в 1997 г. JET с DT достиг пика $P_{DT} = 16$ МВт [16, 17]. Рассматриваемые научным сообществом как значимый успех в улучшении характеристик плазмы, эти же результаты показали довольно мрачную картину соответствия плазмы токамака требованиям реактора. В частности, коэффициент усиления мощности (fusion gain factor) $Q_{DT} = P_{DT}/P_{NBI}$ был равен только 0.25 на TF-TR и 0.6 на JET, а не обещанному значению $Q_{DT} = 1$, определяющему breakeven, то есть равенство полученной и вложенной мощности (P_{NBI} — это мощность NBI, доставленная в плазму). Эксперименты указали на несостоятельность теории удержания, по которой машины были рассчитаны на breakeven.

Хотя сообщество ядерного синтеза рассматривало эти результаты как достижения, реакция чиновников DoE (Департамент энергетики США) была другой: попытка достичь breakeven была расценена как неудача, которая явно требует нового подхода. Само доверие к концепции Токамак было подорвано. Даже использование слова “токамак” было не рекомендовано. Физики-плазменщики оправились от временной неудачи довольно быстро. Вместо нового подхода они предложили косметические модификации в виде различных геометрических форм плазмы, таких как “компактный” стелларатор и сферический токамак (кстати, зарекомендовавший себя очень удобным для исследований). В Европе, неудача с $Q_{DT} = 1$, в принципе, не повлияла на исследования, которые до сих пор опираются на те же безнадёжные подходы.

В то же время эксперименты TFTR дали важные физические результаты. Джеймс Страхан [15] открыл улучшение удержания плазмы литиевыми пучками, которые он использовал для диагностики края плазмы. Это непонятое, но явно полезное явление было использовано с помощью покрытия литием контактирующей с плазмой поверхности лимитера в TFTR (имеющей форму пояса на внутренней стороне тора). Это открытие Джеймса и литиевая техника фактически спасли программу TFTR. Без лития удержание энергии было катастрофически низким. Открытие Джеймса было значительным ударом по теории удержания и его концепции турбулентного переноса энергии в теле плазмы. Эта амбициозная теория упустила в то время, и продолжает упускать до настоящего времени основной эффект в удержании, т.е., эффекты связанные с границей плазмы.

С.В. Мирнов, частый участник экспериментов на TFTR, был единственным кто осознал фундаментальную природу влияния лития на удержание плазмы. В 1998 г. с В.А. Евтихиным, И.Е. Люблинским и А.В. Вертковым из компании “Красная Звезда” он установил литиевую капиллярную систему [18] как диафрагму для плазмы на токамаке T11-M в ТРИНИТИ (Троицк) и доказал феноменальную откачку плазмы осажженным на стенках камеры литием. Таким образом, он впервые на токамаке подтвердил давние (1969 г.) измерения МакКракена [19] по выдающемуся удержанию водорода литием. Этот результат совпал во времени со всплеском внимания к стенкам жидкого лития в двух технологических программах DoE: ALPS, APX. В декабре 1998 г. я позвонил Сергею Крашенинникову и задал вопрос “что случилось бы, если бы специальная литиевая поверхность откачивала все частицы плазмы”. Его ответ был мгновенным: “температура по всей плазме была бы одинаковой и высокой”. “Тогда, проблема решена”, — ответил я, и он быстро объяснил мне, как плазма, созданная энергичным NBI, диффундирует, не теряя энергии, к магнитной границе плазмы (сепаратриссе), а затем по открытым силовым линиям летит на пластины дивертора и поглощается литием. Плазма создана горячей и во всей магнитной конфигурации нет холодных частиц.

Это было рождение новой концепции, основанной на очень простом и неоспоримом утверждении (возможно из физики XVII–XVIII вв.): “Если плазме не охлаждать, она будет горячей”. Подпитка плазмы прямо в ее объем (а не через ее поверхность) плюс откачка литием (текущим) представляют два необходимых условия для этого подхода, фактически реализующего исходную идею магнитного термояда, т.е. изоляцию плазмы от стенки. Такая плазма является наиболее релаксированной: вы создаете ее с большой температурой с помощью NBI и затем отпускаете: уходи куда и как захочешь без дальнейшего внешнего вмешательства. Существующий подход ни одного из этих двух требований

удовлетворить не может и находится в конфликте с исходной идеей термояда.

Суть новой концепции выражается в одном уравнении для температуры края плазмы $(T_i^{edge} + T_e^{edge})/2$, где индексы “i” и “e” обозначают ионы и электроны

$$\frac{5}{2}(T_i^{edge} + T_e^{edge})\Gamma^{edge \rightarrow wall} = P, \quad (1)$$

где $P = P_{NBI} + P_\alpha - P_{radiation}$ – полная мощность выходящая из плазмы с частицами. Она включает нагрев NBI и мощность синтеза, минус мощность, $P_{radiation}$, синхротронного и тормозного излучений и $\Gamma^{edge \rightarrow wall}$ – поток частиц плазмы на стенку. В случае только NBI нагрева

$$\Gamma^{edge \rightarrow wall} = \frac{\Gamma^{core \rightarrow edge}}{1 - R^{recycling}}, \quad (2)$$

$$\Gamma^{core \rightarrow edge} \equiv \Gamma^{NBI} = \frac{P_{NBI}}{eE_{NBI}},$$

где $R^{recycling}$ – коэффициент рециклинга, Γ^{NBI} – общий источник частиц от NBI, идентичный потоку частиц из тела плазмы до края $\Gamma^{core \rightarrow edge}$.

С определениями (2) уравнение (1) дает значение краевой температура плазмы в простом явном виде

$$\frac{T_i^{edge} + T_e^{edge}}{2} = (1 - R^{recycling}) \times \frac{E_{NBI}}{5} \left(1 + \frac{P_\alpha - P_{radiation}}{P_{NBI}} \right). \quad (3)$$

Излучение в токамаке незначительно и, например, при рециклинге подавленным до 0.5 температура края плазмы $(T_i^{edge} + T_e^{edge})/2$ будет 12 кэВ только за счет NBI с энергией 120 кэВ. Такая температура уже соответствует режиму термоядерного горения. Нагрев от α -частиц синтеза еще больше увеличит температуру края.

Из фундаментального уравнения (1) сразу вытекают два последствия для программы ядерного синтеза. Что бы ни происходило с теплопроводностью в теле плазмы, она не может сделать температуру плазмы ниже температуры края, определенной энергией NBI и рециклингом. Вся физика турбулентной теплопроводности, рассматриваемая на протяжении десятилетий как имеющая первостепенное значение, теряет свое значение для развития энергетики ядерного синтеза. В дополнение к этому существенному заключению, при уровне температуры в 10 кэВ на краю плазмы обычный Scrape off Layer (SoL, т. е. плазма на периферии открытых силовых линий) заменяется бесстолкновительным потоком энергичных частиц с совершенно другой и строгой физикой. Таким образом, еще одна, наиболее грязная часть физики токамаков, связанная со взаимодействием плазмы с твердыми материалами (как правило, с высоким атомным номером Z), которая делает плазму непредсказуемой и склонной к

срывам, исключается как необходимый участник в развитии новой энергетики.

Вместо этих двух ставших малозначимыми частей, другие части физики, которые доказали способность к строгим предсказаниям для токамаков, и где вклад Шафранова является весомым, остаются как и раньше ключевыми в продвижении прогресса в термояде.

В 2006 г. все детали физики плазмы нового подхода, под названием Li Wall Fusion (LiWF) были завершены. Параллельно мы поняли край плазмы гораздо лучше, чем остальное сообщество с его фальшивым представлением о “Краевом транспортном барьере”, отсутствием понимания L–H-перехода между режимом низкого и высокого удержания, сообщество, для которого очень высокая краевая температура плазмы представляет собой чудо, а не естественную величину, определяемую интегральными потоками энергии и частиц, сообщество, которое не способно выйти из уже исчерпанного анализа ядра плазмы, игнорируя наиболее важную часть физики токамака, связанную с рециклингом. До сих пор это сообщество не имеет в кодах моделирования правильного граничного условия на температуру. В транспортном коде AS-TRA [20] для токамаков оно было включено три десятилетия назад людьми другого склада из отдела Шафранова.

В 2012 г. технология утилизации откачки плазмы литиевым течением была изобретена в форме 24/7-FLiLi (непрерывно текущий жидкий литий), что дополнило физику необходимой технологией. При прокачке всего 1 г/с, достаточной для откачки плазмы, эта система проста и безопасна, хотя и требует дополнительной технологии для формирования медленного равномерного потока лития.

Новый подход, сочетающий NBI как источник энергичных частиц для центра плазмы с откачкой плазмы с края текущим литием, резко контрастирует с 61-летним подходом, при котором плазма находится в хорошем контакте со стенкой и который потерпел провал даже с минимальной вехой $Q_{DT} = 1$ на пути развития энергии синтеза. Опять же, представляется невозможным убедить физиков-плазменщиков, что, если охлаждение плазмы предотвращено, она будет горячее. Они демонстрируют исключительную изобретательность в возражениях надежной физике вековой давности, при этом не пытаясь увидеть и осознать, что в их собственном подходе практически все неверно, начиная с низкого удержания плазмы, ее непредсказуемости и плохой стабильности, и кончая отсутствием реалистичного видения путей к горячей плазме. Это парадокс, но их главная экспериментальная задача сейчас – это как охладить (!) край плазмы, игнорируя возбуждение срывов, которые они не понимают все 56 лет с их открытия. При этом, такая их “инновация” как вольфрамовый дивертор заполнила все национальные центры по ядерному синтезу, частично разрушив их национальные цели. Примечательно, что даже технологи ядерного синтеза избегают требований об-

шей физики по тепловой изоляции плазмы от стенки путем подавления рециклинга. Так, недавний обзор [21] о применении жидких металлов в ядерном синтезе упоминает все, включая такой несовместимый с плазмой металл как олово. Но обзор не упоминает систему 24/7-FLiLi для откачки плазмы: некоторые нынешние технологи в ядерном синтезе считают нормальным незнание основ физики.

К счастью, новая концепция LiWF значительно снижает роль физики плазмы в развитии синтеза и показывает бессмысленность подхода с большим рециклингом. При низком рециклинге температура краевой плазмы автоматически высокая: 10–20 кэВ, а NBI пучки с энергией 120–130 кэВ существуют и давно используются. В то же время разработка 24/7-FLiLi дивертора с низким 0.5-рециклингом становится критически важной. Это мое необходимое условие для успеха ядерного синтеза. Из примеров Шафранова следует, как строгая теория может двигать прогресс. Новая концепция в точности следует его взглядам на развитие синтеза.

В 2020 г. лучший в мире токамак JET выполнит второй DT-эксперимент в том же режиме высокого рециклинга, который уже потерпел неудачу в 1997 г. Без возможности получить $Q_{DT} = 1$ или даже 0.6 как в 1997 г., это даст экспериментальное доказательство того, что принятый подход неспособен добиться прогресса и является безнадежным. Фактически, он был исчерпан 20 лет назад в 1990-е годы. Эксперимент на JETe с DT будет доказательством провала всего сообщества термояда, которое пренебрегало наукой и полагалось на интерпретации, скейлинги, численное моделирование, манипулированные объяснения и иллюзорное понимание. С середины 1990-х годов научные лидеры программы исчезли, и сама наука стала нежелательной.

Большой риск состоит в том, что ядерный синтез может потерять JET, свою лучшую машину, в ее нынешней форме нереализованных возможностей. Вместо этого научно обоснованной целью было бы продлить время жизни JET еще на 4 года, чтобы разработать и установить на машине дивертор с низким (0.5) уровнем рециклинга и выполнить третий DT-эксперимент с демонстрацией реальной горячей плазмы с коэффициентом усиления термоядерного синтеза $Q_{DT} > 5$, мощностью синтеза $P_{DT} = 25$ МВт при $P_{NBI} = 4$ [22].

В 2012 г. на ужине в ресторане в городе Хэфэй (Китай) Цзянганг Ли, директор института физики плазмы, представил меня по фамилии своему гостю из Японии. Тот сказал, что он знает по публикациям только другого Захарова, автора старого обзора по плазменному равновесию, из которого он выучил основы токамака. Я промолчал, но вспомнил еще раз как Шафранов в 1978–1979 гг. заставлял меня писать часть этого обзора [23], и я лишней раз оценил его мудрость и дальновидность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтович М.А., Шафранов В.Д. // Физика плазмы и проблемы термоядерного синтеза. Т. 1. М.: АН СССР, 1958. С. 207.
2. Kruskal M., Schwarzschild M. // Proc. Royal Soc. London. Ser. A: Mathem. Phys. Sci. 1954. V. 223. P. 348.
3. Арцимович Л.А., Шафранов В.Д. // Письма ЖЭТФ. 1972. Т. 15. С. 72.
4. Emmert G.A., Mense A.T., Donhowe J.M. // 1st Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion, San Diego CA, 14–18 April 1974.
5. Zakharov L.E., Blanchard W., Kaita R., Kugel H., Majeski R., Timberlake J. // J. Nuclear Materials. 2007. V. 363–365. P. 453.
6. Litunovskii R. // JET Internal Report Contract, parts 1, 2. No. JQ5/11961 1995.
7. Noll P., Andrew P., Buzio M., Litunovskii R., Raimondi T., Riccardo V., Verrecchia M. // Proc. 19th Symposium on Fusion Technology, Lisbon / Ed. C. Varandas and F. Serra. Amsterdam: Elsevier, 1996. V. 1. P. 751.
8. Zakharov L.E. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 062507.
9. Zakharov L.E., Li X. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 062511.
10. Кадомцев Б.Б., Погуце О.П. // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. С. 575.
11. Zakharov L.E. // J. Plasma Phys. 2015. V. 81. P. 515810609.
12. Zakharov L.E., Lewandowski J., Foley E.L., Levinton F.M., Yuh H.Y., Drozdov V., McDonald D.C. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 092503.
13. Zakharov L.E., Foley E.L., Levinton F.M., Yuh H.Y. // Plasma Phys. Rep. 2008. V. 34. P. 173.
14. McGuire K.M., Adler H., Alling P., Ancher C., Anderson H., Anderson J.L., Anderson J.W., Arunasalam V., Ascion G., Ashcroft D., Barnes C.W., Barnes G., Batha S., Bateman G., Beer M., Bell M. G., Bell R., Bitter M., Blanchard W., Bretz N.L., Brunkhorst C., Budny R. et al. // Physics Plasmas. 1995. V. 2. P. 2176.
15. Strachan J.D., Adler H., Alling P., Ancher C., Anderson H., Anderson J.L., Ashcroft D., Barnes C.W., Barnes G., Batha S., Bell M.G., Bell R., Bitter M., Blanchard W., Bretz N.L., Budny R., Bush C.E., Camp R., Caorlin M., Cauffman S., Chang Z., Cheng C.Z., Collins J., et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 72. P. 3526.
16. Keilhacker M. Preprint JET-P(98)70.
17. JET Team // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. P. 1227.
18. Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B. // Fusion Engines Des. 2001. V. 56–57. P. 363.
19. McCracken G.M., Ertents S.K. // B.N.E.S. Nuclear Fusion Reactor Conference at Culham Laboratory, Sept. 1969. Paper 4.2.
20. Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. Preprint IPP 5/98. Garching bei Munchen: Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik, 2002.
21. Nygren R.E., Tabar'es F.L. // Nuclear Materials Energy. 2016. V. 9. P. 6.
22. Zakharov L.E. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 096008. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab246b>
23. Zakharov L.E., Shafranov V.D. // Rev. Plasma Phys. 1986. V. 11 / Ed. M. A. Leontovich. New York: Consultant Bureau. P. 153.