

## ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

## К истории исследований по управляемому термоядерному синтезу

*Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС) представляет колоссальную научно-техническую задачу всемирного масштаба; решением этой проблемы заняты теперь огромные коллективы ученых из многих стран. Пятьдесят лет назад, 5 мая 1951 г., Постановлением Совета Министров СССР была принята, по-видимому, первая в мире правительственная программа "О проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ по выяснению возможности осуществления магнитного термоядерного реактора". В данной публикации кратко изложены история событий и хронология возникновения идей, приведших к первым правительственным решениям о проведении работ по выяснению возможности создания управляемого термоядерного реактора, а также итоги первых десятилетий исследований.*

PACS number: 01.65. + g

### Содержание

1. **Шафранов В.Д.** Первый период истории термоядерных исследований в Курчатовском институте (877).
2. **Бондаренко Б.Д.** Роль О.А. Лаврентьева в постановке вопроса и инициировании исследований по управляемому термоядерному синтезу в СССР (886).
3. **Гончаров Г.А.** К пятидесятилетию начала исследований в СССР возможности создания термоядерного реактора (894).
4. Из Архива Президента Российской Федерации (902).

### Первый период истории термоядерных исследований в Курчатовском институте<sup>1</sup>

В.Д. Шафранов

#### 1. Введение

К первому периоду исследований по управляемому термоядерному синтезу (УТС) можно отнести 1951–1975 гг. К концу этого периода лидирующими установками магнитного удержания плазмы становятся системы с тороидальным электрическим током и сильным маг-

<sup>1</sup> Статья написана на основе доклада, представленного на английском языке во время визита в Национальный институт термоядерного синтеза (г. Токи, Япония) для семинара 21 декабря 2000 г.

**В.Д. Шафранов.** Российский научный центр  
"Курчатовский институт"  
123182 Москва, пл. Курчатова 1, Российская Федерация  
Тел./Факс (095) 196-76-76  
E-mail: shafran@nfi.kiae.su

Статья поступила 9 июля 2001 г.

нитным полем — токамаки. В связи с развитием термоядерного оружия эти исследования в начальный период носили сверхсекретный характер, что наложило драматический отпечаток на историю их развития. Можно упомянуть, например, что принятию официальных программ по термоядерному синтезу в США и СССР способствовало заявление Президента Аргентины о якобы успешном проведении управляемой реакции синтеза в этой стране.

В данной статье рассматриваются перемены направлений термоядерных исследований в Курчатовском институте на ранней стадии их развития, такие как переход от планировавшихся лабораторных тороидальных моделей магнитного термоядерного реактора (МТР) по предложениям А.Д. Сахарова и И.Е. Тамма к прямолинейным пинчам, а от пинчей снова к тороидальным системам — токамакам.

Упомянутся первые международные контакты по проблемам, связанным с синтезом, имевшие место до Второй Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии (2nd Geneva Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy) в 1958 г., где впервые были представлены материалы рассекреченных работ, которые велись к этому времени в ряде стран.

Отмечается период глубокого пессимизма в решении проблемы УТС (примерно вторая половина 50-х годов). Упомянутся первые успехи по стабилизации плазмы в открытых ловушках в начальный период работ, вселившие оптимизм в исследователей. Они породили концепцию "средней" магнитной ямы как стабилизатора магнитогидродинамических неустойчивостей также и в замкнутых системах для удержания плазмы — токамаках и стеллараторах.

В конце статьи кратко отмечаются как стратегическая линия участия в международном проекте опытного термоядерного реактора на основе токамака, так и некоторые инновационные направления исследований в Российском научном центре "Курчатовский институт".

## 2. Общие замечания

Термоядерные исследования начались в середине XX века, прежде всего в странах, разрабатывавших термоядерное оружие. Причина этого проста: именно в этих странах были накоплены знания и опыт осуществления дорогостоящих проектов, необходимых для таких исследований. Невероятные же по интенсивности темпы организации необходимых работ объясняются следующими двумя обстоятельствами.

1. Первоначальной целью создания термоядерных реакторов с дейтериевой плазмой было, прежде всего, производство ядерных материалов (зарядов) для термоядерного оружия. Стремление не отстать от соперника в оснащении мощнейшим оружием было главным стимулом для принятия решений о проведении исследований по УТС как в СССР, так и в США.

2. Успех в создании ядерного оружия вселял уверенность в столь же быстром решении и проблемы создания термоядерного реактора. Эта надежда не оправдалась, но переориентировка программы на производство электроэнергии с использованием неисчерпаемого и экологичного источника реакций синтеза стала важнейшим стимулом для решения проблемы УТС во всем мире.

Рассматриваемый первый двадцатипятилетний период истории термоядерных исследований в Курчатовском институте охватывает 1951–1975 гг. Следует отметить, что еще в 1955 г. на открытии Первой международной конференции по мирному использованию атомной энергии председательствующий Х. Баба (H. Bahba) высказал предположение, что "метод управляемого высвобождения энергии ядерного синтеза будет найден в предстоящие 20 лет", т.е. к 1975 г. В некотором смысле это предсказание действительно сбылось. К этому времени на токамаке Т-3 и его модификации Т-4 была продемонстрирована плазма с температурой масштаба 1 кэВ (1968–1969 гг.). В начале семидесятых годов происходит решительный переход на токамаки во многих лабораториях, связанных с магнитным удержанием плазмы. В Курчатовском институте 1975-й год завершается вводом в строй достаточно большого по тем временам токамака Т-10 (работа на нем продолжается и в наши дни). А на токамаке РЛТ этого же поколения (введен в строй в том же году в Принстоне, США) с помощью инъекции пучка быстрых атомов дейтерия несколько позже (в 1978 г.) удалось получить плазму с температурой ионов 7–8 кэВ.

Рассматриваемый период связан для нас, в основном, с именем первого руководителя государственной программы исследований по УТС Л.А. Арцимовича, скончавшегося в 1973 г.

На ранней стадии термоядерные исследования были строго засекречены даже после перемены их цели с поддержки военных программ на мирное использование ядерной энергии. Внутри Лаборатории измерительных приборов Академии наук (ЛИПАН — кодовое название будущего Курчатовского института) никто, кроме небольшой группы исследователей, не знал, что делается в новом здании Бюро электрических приборов (БЭП), стоящем недалеко от здания Отдела электроаппаратуры (ОЭА), где под руководством Л.А. Арцимовича разрабатывались методы электромагнитного разделения изотопов для наработки материала для атомных бомб. Даже в самых секретных отчетах одно время использовались

загадочные слова: "гуща" (для обозначения плазмы), "высота" (температура), "струя" (магнитное поле). Так что, например, фраза "высокотемпературная плазма в магнитном поле" кодировалась странным выражением "высокая высота гущи в струе". Все исследователи гордились своим участием в продвижении к великой цели — производству энергии "из воды" (потенциальные запасы энергии дейтерия, содержащегося в 1 л воды, в 300 раз больше, чем в 1 л бензина). С нетерпением ожидали мы любой информации об УТС из других стран, прежде всего из Англии и США<sup>2</sup>.

Любопытно, что каждая из первых трех стран — участниц исследований по УТС на основе замкнутых тороидальных систем — открыла определенное направление магнитного удержания плазмы.

Эксперименты с тороидальным газовым разрядом в Великобритании создали направление "тороидальные пинчи с обращенным тороидальным магнитным полем", сокращенно RFP (Reversed Field Pinches). В настоящее время соответствующие крупные установки имеются: одна — в Падуе (Италия), другая — в Бостоне (США).

Предложение А.Д. Сахарова и И.Е. Тамма о "Магнитном термоядерном реакторе" привело к системам "токамак", занявшим лидерство в мировой программе исследований по УТС.

Изобретение Л. Спитцером замкнутой системы магнитного удержания с вложенными магнитными поверхностями плазмы, на которых каждая магнитная силовая линия, проходя вдоль системы (топологического тора) с проворотом на некоторый угол ("вращательное преобразование"), плотно покрывает замкнутую тороидальную поверхность, породило фундаментальное научное направление стационарных "стеллараторных", или "винтовых систем" магнитного удержания плазмы. Эти системы задержались в своем развитии из-за их большей сложности и неудачных экспериментов первого периода их истории. В настоящее время они приобрели "второе дыхание" и наряду с традиционным подходом, самым большим современным представителем которого является крупнейшая винтовая система LHD (Large Helical Device) в Японии, развиваются усовершенствованные "advanced helical systems" (продвинутые винтовые системы), "живым" представителем которых является крупный стелларатор W7-AS, строящийся в Грайфсвальде (Германия).

В Принстонской лаборатории физики плазмы, начавшей стеллараторные исследования, в настоящее время реализуются проекты компактного токамака и инновационного "квазисимметричного" стелларатора NCSX с самогенерирующимся "бутстрэп-током" (ток, связанный со спецификой дрейфовых траекторий в торе), что помогает улучшить параметры плазмы.

Помимо замкнутых систем, в США и СССР независимо родилось направление открытых магнитных систем с магнитными зеркалами (американский термин), или магнитными пробками (российский термин). В настоящее время оно сохранилось, главным образом, в научных городках Цукубы (Япония) и Новосибирска.

<sup>2</sup> Секретность наложила драматический отпечаток на судьбы некоторых участников программы. Так, например, в конце 1951 г. был отстранен от работ по МТР за знакомство с кем-то из бывших эмигрантов, а в 1952 г. и уволен, крупный теоретик Б.И. Давыдов.

### 3. Мировой УТС перед Женевой-58

Исследования по УТС до Второй Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии были строго засекречены. Ниже приведена краткая хронология соответствующих значительных событий в Англии, США и СССР.

#### Англия

**1946 г.** Патент Дж. П. Томсона (см. [1]) и М. Блекмана [2] на тороидальный термоядерный реактор с дейтерием. Заявленная мощность реактора  $P_{DD} = 9$  МВт. Начальный нагрев плазмы переменным током 500 кА.

**1949 г.** Первые эксперименты с тороидальными разрядами (П. Тонеманн (см. [1]); С.У. Козинс и А.А. Уэйр [3] — реализация пинч-эффекта с током  $J = 27$  кА).

**1955 г.** Идея стабилизации разряда магнитным полем (Р.Дж. Бикертон) (см. [1]).

**1956 г., апрель.** Доклад И.В. Курчатова в Харуэлле.

**1958 г.** Сенсация (английские газеты от 25 января; публикации в *Nature* с присоединением работ из США [4]): на большой тороидальной установке ZETA (радиусы плазменного тора  $a_p = 0,5$  м,  $R = 1,5$  м) получена плазма с температурой ионов  $T_i \cong 300$  эВ (!). Эти результаты оказались ошибочными. Но через 10 лет на Третьей конференции МАГАТЭ (Новосибирск, 1968) прозвучало сообщение об открытии на этой установке самоорганизующихся спокойных режимов с генерацией магнитного потока в плазме, превышающего исходный магнитный поток внутри проводящего кожуха: вне плазмы магнитный поток отрицательный. Отсюда название "Reversed Field Pinch" — пинч с обращенным полем (RFP).

#### США

**1945–1946 гг.** Семинары Э. Тэллера по УТС. Отрицательные опыты с пучками (Дж. Так, С. Улам) (см. [5]).

**1951 г., март.** Сообщение Президента Аргентины Перона об успешной демонстрации Р. Рихтером управляемой термоядерной реакции привело Л. Спитцера к изобретению стелларатора в виде соленоида в форме пространственной восьмерки.

**1951 г., 11 мая.** Обсуждение предложения Л. Спитцера в Комиссии по Атомной Энергии (АЕС).

**1951 г., 7 июля.** Подписание контракта на исследование в Принстонском университете (Проект Маттерхорн).

Несколько позже все работы по УТС (пинчи в Лос-Аламосе, зеркальная ловушка в Ливерморе и др.) объединяются в Проекте Шервуд.

#### СССР

**1950 г.** Письма О.А. Лаврентьева в Москву, в том числе с описанием идеи осуществления управляемого синтеза дейтериевых ядер при помощи электростатического поля (выслано с Сахалина в конце июля).

**1950 г.** Отзыв А.Д. Сахарова на предложение О.А. Лаврентьева (18 августа) с замечанием, что необходима "очень хорошо отражающая сетка" "с тонкой токонесящей частью" для отражения почти всех падающих на нее ядер обратно в реактор.

**1950 г., август – сентябрь.** Идея создания высокотемпературной плазмы непосредственно в магнитном поле. Работа А.Д. Сахарова и И.Е. Тамма над теорией МТР.

**1950 г., октябрь – декабрь.** Ознакомление руководства с идеей магнитного удержания плазмы.

**1951 г., январь – февраль.** Серия обсуждений и подготовка проекта Правительственного Постановления о работе над магнитным термоядерным реактором (МТР).

**1951 г., 5 апреля.** Подписание Сталиным Распоряжения Правительства о создании лабораторной модели МТР [см. Гончаров Г.А. *УФН* 171 894 (2001)].

**1951 г., середина апреля.** По получении информации о выступлении Президента Перона (25 марта): активизация обсуждений организационных вопросов по проблеме МТР.

**1951 г., 5 мая.** Подписание Сталиным Постановления Правительства об организации работ по МТР (см. раздел "Из Архива Президента Российской Федерации").

**1951–1955 гг.** Экспериментальные и теоретические работы по тороидальным и прямолинейным разрядам; непродолжительные инновации (типа высокочастотного удержания и др.).

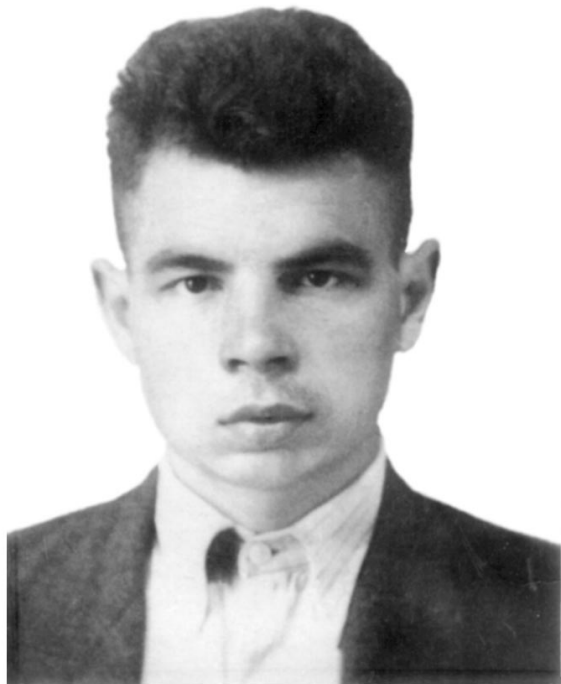
**1955 г.** Пробраз токамака (пока еще с фарфоровой камерой) — тор с магнитным полем (ТМП).

#### 3.1. 50 лет назад

Таким образом, в мае 2001 г. исполнилось 50 лет с момента официального начала программы работ по УТС в СССР и США. История этих исследований забавна и драматична<sup>3</sup>. В нашей стране она началась с письма сержанта Советской Армии Олега Лаврентьева, служившего на Сахалине, в Центральный Комитет ВКП(б) (см. раздел "Из Архива Президента РФ").

Письмо содержало предложения по созданию водородной бомбы с использованием атомной и, что более интересно, предложение по электростатическому удержанию ядер дейтерия для промышленного производства электроэнергии с использованием двух сферических сеток под отрицательным и положительным потенциалами. Письмо попало на отзыв к А.Д. Сахарову, который написал, что "автор ставит весьма важную и не являющуюся безнадежной проблему". Отметив ряд трудностей в реализации электростатического удержания, он указал, что сетка должна быть "с большими зазорами и тонкой токонесящей частью, которая должна отражать обратно в реактор почти все падающие на нее ядра (курсив В.Д. Шафранова). По всей вероятности, это требование не может быть совмещено с требованиями прочности". Но "не исключены какие-либо изменения проекта, которые исправят эту трудность". В конце отзыва Сахаров подчеркнул, что независимо от резуль-

<sup>3</sup> Одна из первых инициатив по УТС упоминается в книге Г.А. Гамова в связи с воспоминанием о встрече с одним из руководителей страны Н.И. Бухариным: "Николай Бухарин — старый революционер и близкий друг покойного Ленина, к тому же единственный из ведущих коммунистов (за исключением, конечно, самого Ленина), который вышел из старой русской семьи. Я столкнулся с ним, когда он был понижен в должности, занимал сравнительно среднее положение в качестве председателя комитета [ВСНХ], в обязанности которого входило следить за развитием советской науки и техники; этот пост, конечно, не имел никакой политической важности (Бухарин стал жертвой сталинских чисток и был казнен через пять лет после того, как я покинул Россию). Однажды он присутствовал на моей лекции в Академии наук (находившейся в то время в Ленинграде) по термоядерным реакциям и их роли как источника энергии на Солнце и других звездах. По окончании лекции он предложил мне возглавить проект по развитию контролируемых термоядерных реакций (и такое предложение в 1932 году!). Я имел бы в своем распоряжении в течение нескольких минут одной ночи в неделю всю электрическую мощность Московского промышленного района, чтобы послать ее через очень толстую медную проволоку, насыщенную маленькими "пузырьками" литиево-водородной смеси. Я отклонил это предложение и доволен, что так поступил, так как это определенно тогда не сработало бы" [6].



Олег Александрович Лаврентьев

татов дальнейшего обсуждения "необходимо уже сейчас отметить творческую инициативу автора". Следует заметить, что письмо было послано с Сахалина 29 июля 1950 г., а отзыв А.Д. Сахарова подписан уже 18 августа 1950 г. К этому времени О.А. Лаврентьев, сдавший экзамены за три последних класса средней школы и демобилизовавшийся, уже поступил в Московский государственный университет. Письмо Лаврентьева натолкнуло А.Д. Сахарова на идею магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы. К октябрю, вместе с И.Е. Таммом, были сделаны первые оценки магнитного термоядерного реактора (МТР). После одобрения в январе 1951 г. предложенного А.Д. Сахаровым и

И.Е. Таммом проекта МТР О.А. Лаврентьеву, давшему толчок к сахаровской идее "замагничивания" плазмы, был предоставлен ряд льгот для ускоренного окончания университета. После окончания МГУ О.А. Лаврентьев, по рекомендации Л.А. Арцимовича, был принят в Харьковский физико-технический институт, где и работает в настоящее время. Проводимые им эксперименты по электростатическому отражению электронов, покидающих осесимметричную "антипробочную" ловушку через кольцевую магнитную щель, вызвали интерес в Курчатовском институте. В 1981–1985 гг. на построенной тороидальной (для устранения ухода частиц по оси) ловушке АТОЛЛ (Анипробочная ТОроидальная Ловушка Лаврентьева) под руководством замечательного физика-экспериментатора М.С. Иоффе были детально изучены физические процессы в плазме такой ловушки с четырьмя кольцевыми щелями. Результаты исследований на АТОЛЛе были опубликованы в 1989 г. (Иоффе М С и др., там же где [10] (М.: ВИНТИ, 1989) с. 6).

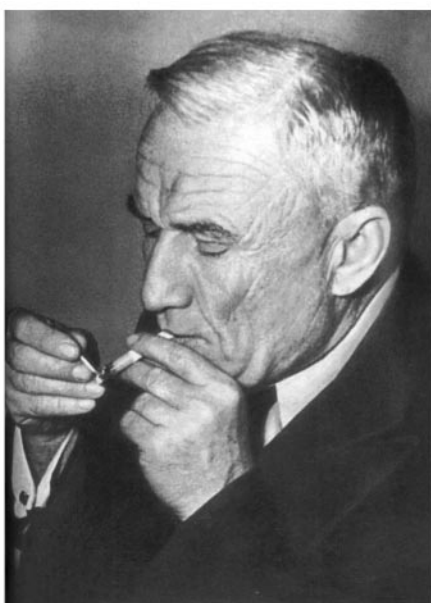
### 3.2. Идея магнитной термоизоляции плазмы<sup>4</sup>

А.Д. Сахаров видел основную новизну идеи Лаврентьева в низкой плотности удерживаемых частиц. Но его, как видно, не устраивала длиннопробежность частиц, которая неизбежно привела бы к нежелательным последствиям взаимодействия частиц высокой энергии с конструктивными материалами. Нельзя ли сделать так, чтобы траектория свободно движущейся частицы не выходила из заданного объема? Можно! В сильном магнитном поле заряженная частица движется по спирали вдоль магнитной силовой линии. Значит, высокотемпературную плазму нужно создавать в тороидальном соленоиде. Если пренебречь кривизной соленоида, то на стенку камеры частицы будут попадать только в результате взаимных столкновений, т.е. в результате диффузии поперек магнитного поля. Но при каждом столкновении траектория частицы может сместиться

<sup>4</sup> В этом разделе я пользуюсь рассказами и письменными воспоминаниями И.Н. Головина.



Андрей Дмитриевич Сахаров



Игорь Евгеньевич Тамм



Лайман Спитцер

только на расстояние масштаба ларморовского радиуса (около 1 см для ионов дейтерия и менее 1 мм для электрона при  $B = 50$  кГс и температуре плазмы  $T_p \sim 50$  кэВ). Таким образом, перенос энергии на материальные элементы реактора сильно снижается.

Сахаров обсудил проблему с И.Е. Таммом, который только что вернулся из отпуска. Несмотря на сильную занятость в это время в работе по термоядерному оружию, оба они стали обсуждать возникающие физические проблемы и оценивать параметры магнитного термоядерного реактора (название предложено И.Е. Таммом) без учета кривизны плазменного тора<sup>5</sup>. В конце октября с идеей МТР знакомятся И.В. Курчатов и его молодой заместитель И.Н. Головин. А.Д. Сахаров, наездами в ЛИПАН, обсуждает методы устранения вертикального к плоскости тора дрейфа заряженных частиц в тороидальном магнитном поле.

Сначала он предлагает подвешивать на оси камеры виток с тороидальным током, магнитное поле которого превращает магнитные силовые линии в винтовые, так что возникает система вложенных тороидальных магнитных поверхностей. Но затем останавливается на индукционном возбуждении тока в самой плазме. Для удержания плазменного кольца с током в равновесии он предложил тороидальный медный кожух с разрезами: вдоль тора — для введения тороидального магнитного поля, а поперек тора — для введения тороидальной ЭДС, генерирующей и поддерживающей электрический ток в плазме.

В 1957 г. такая система получила название "токамак". В январе 1951 г. И.В. Курчатов организует совещание по МТР с руководителями работ по термоядерному оружию и, получив поддержку, начинает готовить проект правительственного постановления о развитии работ по МТР. В феврале 1951 г. проект был направлен Л.П. Берии. Прошел март, но окончательного решения по проекту не было. "В середине апреля неожиданно в кабинет Курча-

това ворвался Министр электропромышленности Д.В. Ефремов с журналом в руке, в котором сообщалось об успешных экспериментах некоего Рихтера в Аргентине, получившего нейтроны в газовом разряде" [8].

### 3.3. Президент Перон об "успехе" Рональда Рихтера

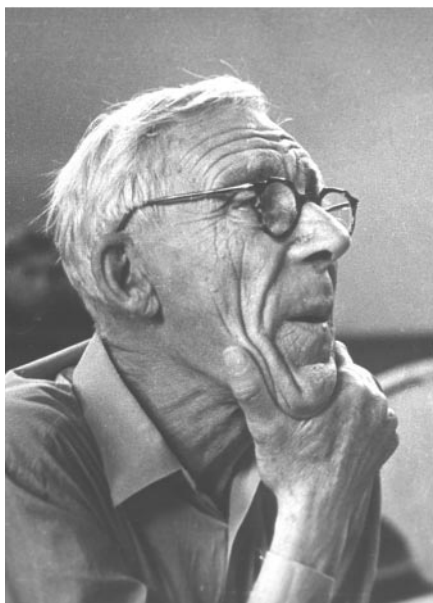
25 марта 1951 г. Президент Аргентины Хуан Перон сделал заявление об успешном "контролируемом высвобождении атомной энергии при сверхвысокой температуре в миллионы градусов без использования уранового топлива" в экспериментах немецкого физика Рональда Рихтера, работавшего в специально созданной секретной лаборатории на острове Хьюзмелл в Аргентине. Узнав от Д.В. Ефремова о заявлении президента Х. Перона, И.В. Курчатов немедленно позвонил Л.П. Берии, и тот срочно созвал совещание для обсуждения организационных вопросов и ранее подготовленного проекта Постановления Правительства. Руководителем экспериментальных исследований по УТС был предложен Л.А. Арцимович (который, не отрываясь от работы по вводу завода для электромагнитного разделения изотопов, одну треть своего рабочего времени должен был заниматься новой задачей управляемого термоядерного синтеза). Руководителем теоретических работ по рекомендации И.Е. Тамма был назначен М.А. Леонтович<sup>6</sup>.

Разработанное в деталях Постановление Правительства, обязывающее руководителей ряда предприятий удовлетворять запросы исследователей УТС, было подписано И.В. Сталиным уже 5 мая 1951 г.

В октябре 1951 г. А.Д. Сахаров и И.Е. Тамм подготовили свои проекты развития исследований по УТС (опубликованные позднее в [7] с. 3, с. 20, с. 31). Параметры "оптимального" МТР Сахарова (расчет основан на цилиндрической модели) были таковы: большой и малый радиусы плазменного тора составляли соответственно  $R = 12$  м,  $a_p = 2$  м;  $B = 50$  кГс,  $n = 10^{14}$  см<sup>-3</sup>,  $T = 100$  кэВ,  $P_{DD} = 880\,000$  кВт.

<sup>5</sup> В сноске работы А.Д. Сахарова "Теория магнитного термоядерного реактора" [7] указано, что расчет большой модели впервые был произведен И.Е. Таммом в октябре 1950 г.

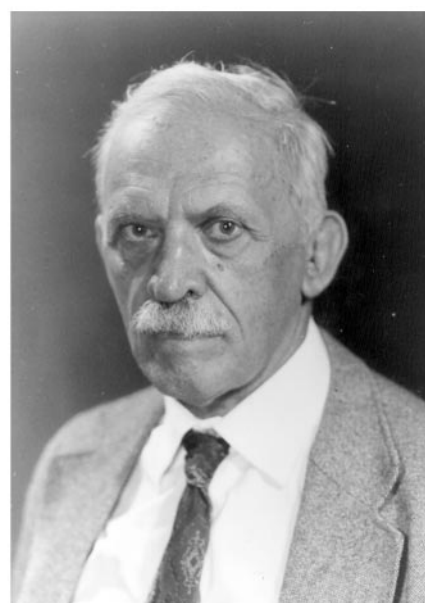
<sup>6</sup> По легенде, один из помощников Берии стал нашептывать ему о неблагонадежности Леонтовича. Берия достаточно громко ответил: "Будет слэдыт, нэ будет врэдыт."



Михаил Александрович Леонтович



Лев Андреевич Арцимович



Игорь Николаевич Головин

Согласно расчетам, в день можно было бы производить на такой установке до 100 г трития или в 80 раз больше  $^{233}\text{U}$ . При этом Сахаров отмечает, что энергетическая ценность  $^{233}\text{U}$ , который может сжигаться в простых реакторах, значительно превышает выделение тепла в самом термоядерном реакторе. Из этих замечаний А.Д. Сахарова ясно, что именно возможность производства зарядов для термоядерных и атомных бомб была определяющей при принятии решения о развитии УТС в то время.

Следует отметить еще раз, что при расчетах реактора не учитывалась кривизна тора. Между тем тороидальный ток, предложенный Сахаровым для компенсации тороидального дрейфа частиц, вносит принципиальные изменения в физику удержания тороидальной плазмы. Одно из них — необходимость учета в теории транспортных явлений особенности дрейфовых траекторий заряженных частиц при наличии азимутальной компоненты магнитного поля (будущая "неоклассика" А.А. Галева и Р.З. Сагдеева!) — было отмечено уже в статье И.Е. Тамма (см. [7] с. 31).

### 3.4. От идеи к ее осуществлению

Рассмотрение замкнутых тороидальных систем вывело проблему тороидального дрейфа заряженных частиц. Как отмечалось выше, для замыкания дрейфовых траекторий заряженных частиц внутри камеры (в то время использовался термин "стабилизация тороидального дрейфа") А.Д. Сахаров предложил два метода:

1. Добавить полоидальное магнитное поле, создаваемое внутренним кольцом с током, поддерживаемым тросами или горизонтальным магнитным полем;

2. Возбуждать высокочастотный ток в самой плазме. Вторая возможность была более реалистичной и трансформировалась в эксперименты с одноимпульсными разрядами, питаемыми конденсаторными батареями.

В Курчатовском институте необходимость введения тороидального тока привела к предложению отказаться от тороидального магнитного поля вообще. И главные усилия вначале были сконцентрированы на пинчах, в которых, в соответствии с соотношением Беннета  $J^2 = 4c^2NT$  [9], температура плазмы должна возрастать пропорционально квадрату тока,  $T \sim J^2$ ! Казалось, что этот путь сулил быстрое решение проблемы<sup>7</sup>. Только небольшая группа во главе с И.Н. Головиным и

<sup>7</sup> **Краткое отступление.** Я начал работать в области ядерного синтеза как раз в это время. В феврале 1952 г., через два месяца после окончания Московского университета, я был распределен в закрытый институт ЛИПАН. М.А. Леонтович принял меня в свою небольшую теоретическую группу. Только мой самый первый отчет (оценка высокочастотного нагрева плазмы в сильном магнитном поле) был связан с МТР Тамма–Сахарова. С отчетами Тамма и Сахарова (очень насыщенными по содержанию), так же, как и с другими ранними отчетами по МТР, я получил возможность ознакомиться только после их рассекречивания в 1958 г. Главным же объектом исследований вначале были пинчи. В первый же год вместе с М.А. Леонтовичем я выполнил работу по стабилизации винтовых возмущений продольным магнитным полем на модели прямого плазменного шнура с поверхностным током. С.И. Брагинский, работавший в это время над своими знаменитыми уравнениями переноса в замагниченной плазме, применил их, в первую очередь, к пинчевым разрядам без продольного магнитного поля. Вместе с ним мы распространили эти исследования и на пинчи с продольным магнитным полем.

Н.А. Явлинским продолжала вести исследования в русле идей Сахарова и Тамма.

### 3.5. Быстрые разряды

Тем временем экспериментаторы "штурмовали" прямые разряды, но без видимых успехов. Казалось, что улучшение вакуумных условий, надлежащее изменение сценария подготовки разряда и т. п. должны привести к успеху.

Наконец, 4 июля 1952 г. в группе Н.В. Филиппова заработали счетчики: получены нейтроны из дейтериевой плазмы пинча! Возникла надежда, что при соответствующем выборе программы эксперимента можно постепенно увеличить температуру плазмы. Однако требование Л.А. Арцимовича проверить все очень тщательно остановило эйфорию. А скоро наступило глубокое разочарование: из-за неустойчивости пинча температура не росла с увеличением тока.

Позже программа исследования пинчей претерпела изменения. Короткоимпульсные разряды, формируемые далеко от стенок за счет специальной формы камеры, дали начало программе исследования плазменного фокуса под руководством Н.В. Филиппова.

### 3.6. Тороидальный разряд

#### со стабилизацией сильным магнитным полем

Теория стабилизации пинча продольным магнитным полем вновь повернула исследования к предложению Сахарова: использовать *и* тороидальное магнитное поле, *и* тороидальный ток. Однако, в некотором смысле, их функции изменились: в новой схеме тороидальный ток обеспечивает равновесие и удержание плазмы, магнитное же поле необходимо для устойчивости. Но никакого намека на повышение температуры плазмы еще не было. Первые установки — и тороидальные, и цилиндрические, имели керамические камеры. Локальный перегрев стенки с низкой теплопроводностью был причиной сильного распыления, загрязнения плазмы, сильного ультрафиолетового излучения. Как следствие, температура плазмы оставалась низкой, на уровне 10–30 эВ.

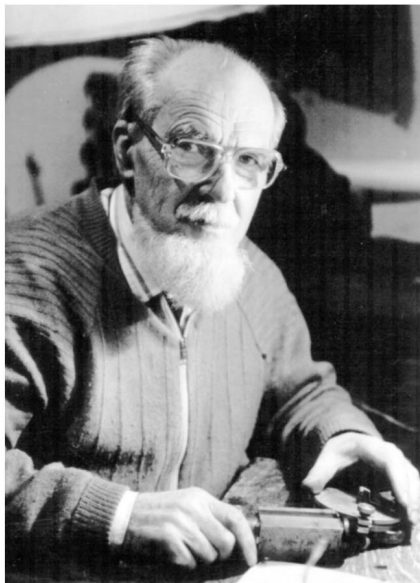
В 1955 г. была построена первая токамакоподобная установка ТМП<sup>8</sup>. Она все еще имела фарфоровую камеру со спиральным металлическим вкладышем. Линии кремния в спектрах излучения плазмы свидетельствовали об испарении стенки камеры под действием мощных тепловых нагрузок [10].

### 3.7. Период пессимизма — до начала 70-х годов

В течение долгого времени типичной оставалась температура не выше 30 эВ. Прогресса не было ни в пинчах, ни в тороидальных системах.

В поисках других возможностей удержания плазмы Г.И. Будкер пришел к идее прямой осесимметричной магнитной системы с усиленным магнитным полем на концах (пробкотрон). Несколько позже И.Н. Головин, бывший заместителем директора института И.В. Курчатова, решил сконцентрироваться на этом простом направлении и разработать большую ловушку ОГРА с магнитными пробками. Начались также физические исследования удержания плазмы с низкой плотностью в небольших пробочных ловушках. Появился и ряд совершенно новых предложений, таких как удержание горячей

<sup>8</sup> Название "токамак" еще не употреблялось, оно стало входить в жизнь после 1958 г.



Николай Васильевич Филлипов



Нутан Аронович Явлинский



Станислав Иосифович Брагинский

плазмы высокочастотным электромагнитным полем, коллапсирующее плазменное кольцо и т.д., но без видимых успехов. Теоретические исследования устойчивости на моделях плазмы с резкой границей определенно указывали на неизбежность участков с выпуклыми магнитными силовыми линиями, где плазма должна вырываться из области удержания. Наступал более чем пятилетний период глубокого пессимизма в отношении решения проблемы УТС.

### 3.8. Всесоюзное совещание 1955 г.

В этих условиях И.В. Курчатов пришел к выводу о необходимости рассекретить программу УТС. Прежде всего в 1955 г. он организовал Всесоюзное, все еще закрытое, но довольно многочисленное и представительное совещание для обсуждения работ по УТС в его институте. С докладами выступили Л.А. Арцимович и М.А. Леонтович. Участники совещания, впервые слышавшие о проблеме МТР, были поражены масштабом цели исследований (да и проведенными работами!) и оказали необходимую поддержку их продолжению. Интерес к исследованиям по УТС переносился и в другие закрытые институты.

Возможно, что не менее важным для работ по УТС было присутствие на этом совещании молодого Б.Б. Кадомцева. Воодушевленный этой совершенно новой областью исследований, сулящей интересную физику, он решил покинуть Обнинск, где вместе со своим руководителем Д.И. Блохинцевым принимал участие в оружейных задачах, и вскоре присоединился к нам. Десятью годами позже он уже был одним из сильнейших теоретиков в области УТС. Уже в 1965 г., на Второй конференции МАГАТЭ в Калэме (Великобритания) именно ему было поручено подвести итоги по представленным теоретическим работам на заключительном заседании. По экспериментальным работам на этой конференции итоги подводил Л. Спитцер<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Отметим заодно, что на Первой конференции МАГАТЭ в 1962 г. в Зальцбурге итоги по экспериментам подводил Л.А. Арцимович, а по теории — выдающийся американский теоретик М. Розенблут.

### 3.9. Первые шаги к международному сотрудничеству по УТС

Вскоре после Всесоюзного совещания 1955 г. И.В. Курчатов сделал еще один шаг к рассекречиванию экспериментов по пинчам. В апреле следующего, 1956 г., в качестве члена Советской правительственной делегации, возглавляемой Н.С. Хрущевым, И.В. Курчатов прибыл в Великобританию и прочитал в атомном центре Харуэлл лекцию "О возможности осуществления термоядерной реакции в газовых разрядах". Это был первый реальный шаг на пути к международному сотрудничеству в области УТС. На последующих международных конференциях, посвященных физике плазмы, физики, вовлеченные в работы по еще не рассекреченному УТС, узнавали своих коллег по содержанию представленных докладов.

В апреле 1956 г. Курчатовский институт посетила первая иностранная делегация. Это были члены Шведской академии наук. В ответ Х. Альфвен пригласил Л.А. Арцимовича и И.Н. Головина осенью 1956 г. в Стокгольм на Астрофизическую конференцию. Л.А. Арцимович и И.Н. Головин представили доклады, неявно связанные с линией исследования пинчей и токамаков. Здесь же произошла их встреча с Л. Спитцером и Р. Пизом — лидером английской программы по УТС.

В июне 1957 г. на конференции "Явления ионизации в газах" в Венеции было представлено много статей, связанных с вопросами УТС (но без прямого упоминания этой проблемы). С докладами выступали Р. Бикертон, Л. Бирман, М. Розенблут, В.Д. Шафранов, Дж. Так и другие участники исследований по УТС. Но пока только работа С.А. Колгейта о нейтронах в пинчах была явно связана с УТС. По существу же, это была первая международная конференция с большим числом докладов, относящихся к проблеме УТС.

### 3.10. Установка ZETA и связанный с ней бум

Астрофизическая конференция 1956 г. в Стокгольме и конференция 1957 г. в Венеции прошли без сенсаций. Неожиданно в январе 1958 г. в английских газетах появились сенсационные сообщения о достижении температуры в 300 эВ на установке ZETA в Харуэлле.

С.И. Брагинский и я получили задание разобраться, что представляет собой ZETA. Из газетных публикаций было известно, что установка выглядит сферической. Для нас это означало, что она является компактной (малое аспектное отношение) тороидальной системой. Мы знали, что компактность необходима для стабилизации плазмы сильным магнитным полем (в системах типа токамак). Другой возможностью являлась стабилизация слабым магнитным полем, захваченным при сжатии плазмы внутри пинча, при наличии камеры с проводящими стенками (будущий пинч с обращенным полем — RFP). Но здесь компактность не обязательна. К тому же, мы не очень верили в возможность удержания захваченного ("вмороженного") тороидального магнитного поля в течение длительного времени. В силу этих соображений мы пришли к выводу, что ZETA является системой типа токамак.

Вскоре вышел январский номер журнала *Nature* с результатами экспериментов на установке ZETA (а также с некоторыми результатами, полученными американскими авторами). Оказалось, что наше заключение было ошибочным. Однако наш анализ тороидальных систем (хотя и в некоторых отношениях идеализированный) помог продвижению подготовленного Н.А. Явлинским проекта крупного по тем временам токамака Т-3 (И.Н. Головин в это время занимался большой открытой ловушкой ОГРА). Результаты с ZETA (оказавшиеся ошибочными) были последней интригующей историей перед Второй Женевской конференцией по мирному использованию атомной энергии. Эта конференция дала старт широкому международному сотрудничеству.

#### 4. УТС перед Женевской конференцией-58 и после нее

Перед Второй Женевской конференцией (1958 г.) статьи по УТС в Курчатовском институте были рассекречены и опубликованы в сборниках *Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций* (четыре зеленых тома, под редакцией М.А. Леонтовича).

На конференции (сентябрь 1958 г.) были представлены многочисленные подходы к удержанию плазмы ("ярмарка идей", по выражению Л.А. Арцимовича). "Гвоздем" программы Женевской конференции был стелларатор Л. Спитцера. Это действительно была концепция стационарной магнитной системы для удержания плазмы — идеал для УТС (!).

Стеллараторы повлияли и на наши исследования:

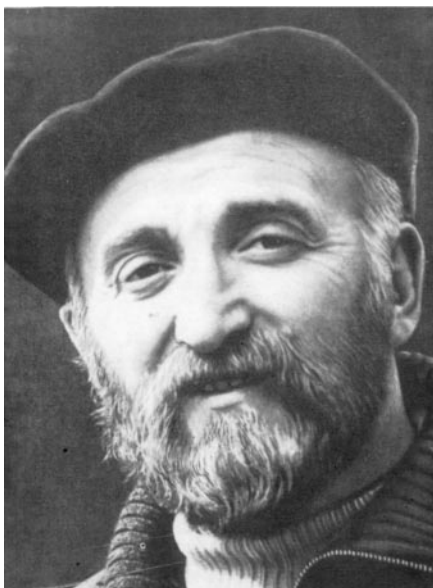
1. Осознавая важность предложения Л. Спитцера, И.В. Курчатова подталкивал Н.А. Явлинского к переходу на стеллараторное направление вместо конструирования нового токамака (это был, как раз, токамак Т-3). Н.А. Явлинский попросил С.И. Брагинского и меня провести сравнение токамака (этот термин еще не употреблялся, здесь он используется для краткости) со стелларатором. Мы привели в пользу токамака примерно следующие соображения. В токамаке при одинаковой длине камеры ее малый радиус больше, чем в стеллараторе; отсюда меньше влияние стенок на разряд. Далее, при одном только омическом нагреве (в то время другие методы не были развиты) преимуществом обладают системы с большим током. Это помогло сохранить линию токамаков в то время.

2. Казавшаяся универсальной, усиленная бомовская диффузия, обнаруженная как на стеллараторе типа "восьмерки", так и позже на комбинированном двух- и трехзаходном стеллараторе С (в форме рейстрека), была дамочным мечом над УТС. Она приводила в уныние исследователей. Но теоретики, пытаясь раскрыть механизм этой диффузии, "прочесали" уйм потенциальных неустойчивостей, развили теорию турбулентности и тем самым способствовали развитию физики плазмы.

3. Соревнование токамак–стелларатор заставляло интенсифицировать работы по УТС.

#### 5. Преодоление пессимизма

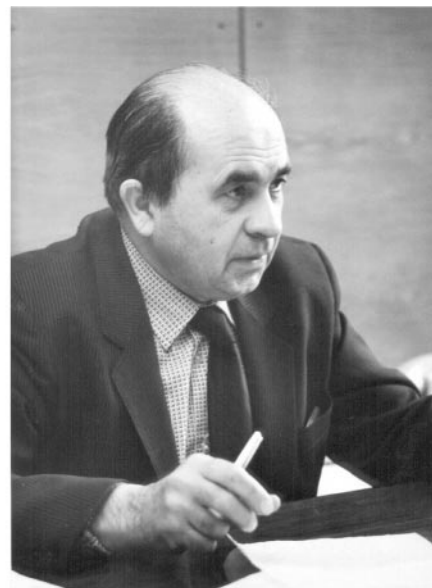
В 60-е годы в исследованиях по УТС начинаются положительные сдвиги. Появилась надежда, что поведением плазмы можно управлять.



Герш Ицкович Будкер



Михаил Соломонович Иоффе



Борис Борисович Кадомцев



1961 г. На Первой конференции МАГАТЭ (Зальцбург, Австрия) доложены эксперименты М.С. Иоффе по стабилизации плазмы в открытых ловушках. Объяснение Б.Б. Кадомцевым экспериментов Иоффе показало отсутствие бомовской диффузии (!). Следствие для тороидальных систем: средняя магнитная яма,  $((B^2) + 2\mu_0 p)' > 0$ , в замкнутой системе с изменяющимся знаком кривизны линий магнитного поля является реальным стабилизирующим фактором<sup>10</sup>.

1962 г. Объявлен первый успех токамаков: коррекция положения плазмы вертикальным магнитным полем привела к улучшению параметров плазмы.

1965 г. Проходит Вторая конференция МАГАТЭ в Калэме (Великобритания). Из доклада Л.А. Арцимовича: "Время удержания в наших экспериментах почти в 10 раз превышает бомовское." Л. Спитцер, выступавший с обзором экспериментальных работ, счел, что такой коэффициент — еще не доказательство отсутствия бомовской диффузии.

1968 г. Третья конференция МАГАТЭ проходит в Новосибирске. Доложено, что на токамаке Т-3 средняя температура электронов  $\langle T_e \rangle$  близка к 1 кэВ, бомовская диффузия определенно отсутствует (!). Но не все верят этим данным. Тогда Арцимович приглашает физиков из Калэма с их лазерной диагностикой (5 тонн оборудования) для измерения локальной температуры электронов методом томсоновского рассеяния.

1969 г. Проходит Второе рабочее совещание по тороидальным системам в г. Дубне. Д. Робинсон докладывает о локальных измерениях температуры электронов  $T_e$  на токамаке Т-3. Это триумф токамаков!



Борис Борисович Кадомцев и Андрей Дмитриевич Сахаров в зале токамака Т-15 в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1987 г. (фотография Ю.Е. Макарова).

<sup>10</sup> По ходатайству американских физиков М.С. Иоффе была присуждена премия Форда. Это привело к драматическому исходу. По указанию "сверху" М.С. Иоффе вынужден был отказаться от этой премии, что не могло не сказаться на отношении к нему зарубежных коллег.

1970 г. Направление "токамак" становится международным. Проходит закрытие других направлений УТС в ряде американских и европейских лабораторий.

1975 г. Ввод в строй токамака Т-10 в Курчатовском институте и токамака РЛТ (Принстон, США), на котором через три года получена плазма с температурой около 8 кэВ.

На смену этим токамакам приходят еще более крупные, предреакторного масштаба. В настоящее время заканчивается работа над международным проектом опытного реактора-токамака ITER-FEAT.

**Основные результаты первого периода истории УТС в Курчатовском институте:**

1. Продемонстрирована возможность удержания высокотемпературной плазмы.

2. Токмак, как достаточно простая система с омическим нагревом, становится лидером, открывающим путь к УТС другим системам, прежде всего, стационарным системам стеллараторного типа.

**Современное состояние исследований по УТС в Институте ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт"** (директор — чл.-корр. РАН В.П. Смирнов):

1. Работает токамак Т-10 (главная область исследований — так называемые транспортные барьеры) [11].

2. Разрабатывается проект токамака Т-15М, моделирующего ITER-FEAT в качестве мобильного помощника в выборе режимов работы, в проявлении неожиданных явлений в термоядерной плазме и т.д.

3. Обновляется программа по пинчам.

4. Изучаются некоторые поисковые направления для малонейтронного ядерного топлива  $D-^3He$ .

5. Продолжаются многоплановые теоретические исследования по ключевым вопросам физики плазмы и УТС.

## 6. Заключение

Первые 20 лет истории исследований по управляемому термоядерному синтезу были годами неопределенности. Последующие пять лет устранили эту неопределенность: ледоколом, расчищающим путь другим магнитным системам удержания плазмы, стал токамак. Теперь уже не возникает сомнений в осуществимости управляемой термоядерной реакции в плазме, удерживаемой магнитным полем. На повестку дня выступают (и решаются) проблемы технологии и материаловедения.

Исследования по УТС представляют жизнеспособную ветвь современной науки. Они внесли большой вклад в фундаментальные научные проблемы.

Нелинейные явления в непрерывных средах, включая двумерные и трехмерные солитоны, процессы стохастичности и возникновения структур (самоорганизация) — вот примеры развивающихся научных направлений, во многом стимулированных развитием физики высокотемпературной плазмы.

Исследования по УТС стимулировали развитие вакуумной технологии больших объемов, технологии сверхпроводящих магнитных систем, создание мощных микроволновых генераторов и т.д.

Жизнеспособность проблемы управляемого термоядерного синтеза является объективной гарантией ее развития.

**Благодарности.** Я хотел бы поблагодарить директора NIFS, Япония, проф. М. Фудживара (M. Fujiwara), проф. Т. Като (T. Kato) и проф. Ч. Намба (Ch. Namba)

— руководителей Центра по сбору данных и планированию этого института — за гостеримство и поддержку, позволившие подготовить этот материал по начальной истории УТС. Я приношу также благодарности А.В. Тимофееву, обратившему мое внимание на эпизод с Н.И. Бухариным; А.Б. Кукушкину и В.А. Ранцеву-Картину за работу над фотографиями; В.И. Ильгисонису и М.И. Михайлову за прочтение рукописи и сделанные замечания.

## Список литературы

1. Carruthers R *Plasma Phys. Cont. Fus.* **30** 1993 (1988)
2. Blackman M *Proc. Phys. Soc. London Ser. B* **64** 1039 (1951)
3. Cousins S W, Ware A A *Proc. Phys. Soc. London Ser. B* **64** 159 (1951)
4. Controlled Release of Thermonuclear Energy *Nature* **181** (4604) 217 (1958)
5. Bishop A S *Project Sherwood* (Addison-Wesley, 1958)
6. Гамов Дж *Моя мировая линия: Неформальная автобиография* (Пер. с англ. Ю И Лисневского) (М.: Наука, 1994) с. 102 [Gamov G *My World Line: an Informal Autobiography* (New York: The Viking Press, 1970)]
7. Сахаров А Д "Теория магнитного термоядерного реактора" Ч. II, в сб. *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций* (Отв. ред. М А Леонтович) Т. 1 (М.: Изд-во АН СССР, 1958) с. 20; Тамм И Е, там же, с. 3 и с. 31
8. Головин И Н, в сб. *Он между нами жил... Воспоминания о Сахарове* (М.: Практика, 1996) с. 263
9. Bennett W H *Phys. Rev.* **45** 890 (1934)
10. Муховатов В С "Токамаки", в сб. *Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы* (Ред. В Д Шафранов) Т. 1, Ч. 1 (М.: ВИНТИ, 1980) с. 6
11. Разумова К А *УФН* **171** 329 (2001)

## Роль О.А. Лаврентьева в постановке вопроса и иницировании исследований по управляемому термоядерному синтезу в СССР

Б.Д. Бондаренко

### 1. Введение

При изложении пятидесятилетней истории исследований по термоядерному синтезу в СССР представляется интересным вначале коротко рассказать о роли молодого солдата Советской Армии О. А. Лаврентьева, проходившего в 40-е–50-е годы воинскую службу на острове Сахалин, в иницировании и развитии исследований по управляемому термоядерному синтезу (УТС) в СССР, а также о его предложении по конструкции водородной бомбы.

Отцом водородной бомбы в Советском Союзе по праву считается А.Д. Сахаров. Среди создателей атомной и водородной бомб в первой шеренге стоят также имена И.В. Курчатова (научного руководителя ядерных

программ), И.Е. Тамма, Ю.Б. Харитона, Я.Б. Зельдовича, К.И. Щелкина, Е.И. Забабахина, а в последнее время также и В.Л. Гинзбурга [после рассекречивания его предложения об использовании в водородной бомбе (Н-бомбе) дейтерида лития ( ${}^6\text{LiD}$ )].

Следует отметить, что предложение об использовании в водородной бомбе в качестве основного ядерного горючего твердого химического соединения (брикета)  ${}^6\text{LiD}$  вместо ранее предполагавшегося сжиженного дейтерия, явилось одним из важнейших факторов, позволивших в дальнейшем создать достаточно компактное транспортабельное термоядерное оружие практически неограниченной мощности. Использование в качестве основного горючего сжиженного дейтерия требовало применения громоздкой криогенной технологии, что делало это оружие практически не транспортабельным.

Об истории создания в Советском Союзе ядерной и термоядерной бомб написано достаточно много обзоров [1–6] и даже монографии [7]. Роль советских ученых, если отвлечься от заимствований секретных западных сведений, отражена в них достаточно объективно. Этого не скажешь об истории работ по УТС в нашей стране. Отцами идеи УТС с магнитным удержанием горячей плазмы в термоядерных реакторах считаются А.Д. Сахаров и И.Е. Тамм. Да, это так, но то, что при этом практически никогда не упоминается имя О.А. Лаврентьева, — это, безусловно, большая несправедливость.

В настоящей статье я постарался устранить эту несправедливость и рассказать о роли О.А. Лаврентьева как в проблеме иницирования и развития работ по УТС, так и в проблеме создания водородной бомбы в нашей стране.

Проблема УТС представляет колоссальную научно-техническую задачу всемирного масштаба; решением этой проблемы заняты теперь огромные коллективы многих стран. Я не собираюсь рассказывать о них и тем более о достижениях в этой области на сегодняшний день.

Хочу начать с того, что впервые в СССР такую задачу сформулировал и предложил некоторое ее конструктивное решение в середине 1950 г. молодой солдат Олег Александрович Лаврентьев, проходивший в то время службу в воинской части на острове Сахалин.

29 июля 1950 г. его предложение, состоявшее, в основном, из двух идей, было отправлено секретной почтой в Москву в адрес ЦК ВКП(б).

Первая идея являлась предложением по физической схеме водородной бомбы. Вторая идея была предложением использовать в промышленной энергетике управляемый термоядерный синтез. В предложении была представлена конкретная схема реактора, в которой термоизоляция высокотемпературной плазмы достигалась созданием высоковольтного электрического поля.

В Москве работа была передана на рецензирование ведущим ядерщикам<sup>1</sup>. В их отзывах об этой работе были отмечены приоритет, оригинальность и смелость мыслей автора. Под влиянием этой работы появились новые проекты других авторов: МТР (магнитные термоядерные реакторы), ТОКАМАКи (ТОроидальные КАмеры с МАгнитными Катодками), магнитные "бутылки" — "пробкотроны" и др. О.А. Лаврентьев, уже будучи в Москве и затем в Харькове, продолжает совершенство-

Б.Д. Бондаренко. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) 607190 г. Саров, Нижегородская обл., просп. Мира 37, Российская Федерация  
Тел. (831) 30-457-78, (831) 30-511-39, (095) 465-17-76  
Факс (831) 30-427-29; E-mail: bondarenko@vniief.ru

Статья поступила 29 ноября 2000 г.

<sup>1</sup> См. отзыв А.Д. Сахарова, публикуемый в разделе "Из Архива Президента Российской Федерации" [*УФН* **171** 902 (2001) с. 908].