

3. **Интернет:** www.Fusion.ru (плазменные установки ИЯС; On-line: БД, ИВК Т-10).
4. **Вознесенский В.А., Семенов И.Б., Соколов М.М.** Организация обмена экспериментальными данными с использованием системы MDSPlus. — В сб.: Тезисы докладов 10-й Всероссийской конференции физики плазмы. Троицк, 2003.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2003 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 4, с. 73—78.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИАЭ им. И.В. КУРЧАТОВА В 1950—1958 гг.

Обзор*
М.К. Романовский

1958 г. *Вторая международная конференция по мирному использованию атомной энергии (Женева)*

В докладах советских ученых на Второй конференции в Женеве (1958 г.) в основном подводились итоги проведенных в 1951—1958 гг. теоретических и экспериментальных исследований. Часто авторы ранее опубликованных работ объединялись и представляли доклад, отражающий результаты, полученные в разное время разными, более узкими коллективами, но объединенные одним направлением. Это видно и по числу авторов (например, у работы [1] 11 авторов, у работы [2] 7 авторов), и в основном по сопоставлению содержания докладов и опубликованных работ. Конечно, это не были просто пересказы статей, в каждом докладе было что-то новое, но основу их составили статьи. И в этом нет ничего удивительного: в статьях указывался год выполнения работы, а в доклады включали только наиболее важные, уже апробированные результаты. Поэтому далее в аннотациях докладов будут широко использованы ссылки на ранее аннотированные статьи.

Доклад руководителя делегации Л.А. Арцимовича [3] — это по существу обзор всех отечественных исследований по программе МТР. Во введении автор предлагает классификацию магнитных систем для термоизоляции и нагрева плазмы, исходя из МГД-уравнения:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{c} \vec{j} \cdot \vec{H} - \text{grad } P. \quad (1)$$

Если на каком-то этапе можно пренебречь градиентом давления, то электродинамические силы ускоряют плазму и приобретенную ею кинетическую энергию можно использовать для нагрева вещества. Ясно, что это первый кратковременный этап, затем происходит нагрев и становится существенным именно $\text{grad } P$, а инер-

* Продолжение. Начало см.: ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2002, вып. 1—2, 3—4; 2003, вып. 1, 2, 3.

ционные силы быстро затухают. Второй этап — равновесие магнитного и газокINETического давлений, что может быть обеспечено:

— большим замкнутым разрядным током, поддерживаемым внешним напряжением и стабилизируемым внешним магнитным полем;

— «ловушечной» конфигурацией внешних магнитных полей, в которых плазма создается инжекцией (извне или внутренней) быстрых частиц. Автор отмечает, что возможны и другие подходы к классификации, но предлагаемый естествен, так как «соответствует основным направлениям исследовательской работы по управляемым термоядерным реакциям в СССР». Далее автор проводит обсуждение общих свойств будущих термоядерных реакторов, «заранее соглашаясь с тем, что на данной стадии наших знаний обсуждение этих вопросов может базироваться только на вере в конечное торжество человеческой изобретательности». Предложенный им критерий осуществления МТР:

$$H^2 \tau > A(1 - \eta), \quad (2)$$

где H — напряженность магнитного поля; τ — время удержания заряженных частиц при высокой температуре, которое совпадает с временем удержания энергии; A — размерная константа, зависящая от типа DD- или DT-реакции; η — доля тепловой энергии, переходящей в электрическую.

Этот критерий более ограничен, чем общепринятый теперь критерий Лаусона ($n\tau \geq A_1$), но для систем с термоизоляцией магнитным полем позволяет представить масштаб реактора. Автор отмечает, что при технически достижимых H стационарный реактор с DD-реакцией должен быть весьма больших размеров (мала мощность, выделяющаяся в единице объема плазмы). Объясняя затем возможность прямого преобразования кинетической энергии заряженных продуктов реакции в электроэнергию с возможным $\eta \approx 0,75$, автор отмечает, что большая часть энергии реакции уносится нейтронами. Подчеркнуто, что тритий для реакции DT можно получать из лития-6, причем нейтроны размножать в реакциях ($n, 2n$) на бериллии, свинце, висмуте. Такой реактор сможет обеспечить воспроизводство трития, так что ограничивающим фактором станут запасы лития на земле.

Следующий раздел доклада посвящен импульсным процессам малой длительности, включая работы по быстрым прямым и тороидальным пинчам, системам типа «Жанр-0» (Ж-0). Упоминается рельсотрон (работы [4, 5], хотя ссылки на них нет). В основном это краткое изложение результатов работ [1, 6, 7], так что повторно аннотировать его нецелесообразно. Есть и одно сообщение, не нашедшее отражения в других докладах: об использовании для сжатия и кумуляции обычных взрывчатых веществ, окружающих ампулу с дейтерием или смесью дейтерия с тритием. В обоих экспериментах получены нейтроны, как быстрые, так и замедлившиеся во взрывчатом веществе. Отмечено, что в этих опытах получалась плотность вещества, значительно превосходящая обычную плотность твердых тел, а вопрос о «термоядерности» нейтронов не вызывал сомнения. Выход энергии термоядерной реакции, превышающей первоначально вкладываемую, осуществляется при эквиваленте ≈ 10 т тротила, как (по расчетам) и при быстрых импульсных процессах. Ясно, что аппаратура уничтожается, да и само взрывчатое вещество дорого, так что для промышленного МТР такой путь неприемлем.

Затем автор рассматривает импульсные разряды с медленным нарастанием тока в тороидальных камерах. Сначала кратко излагаются некоторые результаты теоретических исследований, подробно изложенные в ряде уже аннотированных работ (в основном [8, 9]) и в работе [10]. Затем излагаются экспериментальные данные, также частично опубликованные ранее в статье [11] или в [12, 13], а также в работах [7, 14], представленных на конференцию. Последний раздел, кроме заключения, посвящен магнитным ловушкам. К этой категории установок автор относит такие устройства, в которых удержание плазмы (термоизоляция) возлагается на внешние магнитные поля, а токи проводимости в плазме не имеют существенного значения. Здесь также использованы в основном теоретические работы [15, 16, 17]. Экспериментальные работы представлены кратким описанием ионного магнетрона (идея его изложена в работе [18], но Л.А. Арцимович описывает систему больших размеров с существенно большими магнитными полями, лучшим вакуумом) и описанием установки «Огра», только что сооруженной. Экспериментальные результаты на ионном магнетроне показали, что время существования плазмы с быстрыми ионами составляет несколько миллисекунд, увеличивается с ростом H и улучшением вакуума. Доклады по ионному магнетрону и «Огре» на конференцию не представлены.

На «Огре» следует остановиться подробнее: в то время это была самая крупная в мире установка для изучения горячей плазмы. Это была система с магнитными пробками (расстояние между их центрами 12 м, внутренний диаметр вакуумной камеры 1,4 м), напряженность поля H в пробках до 8 кЭ, в средней части до 5 кЭ. Плазма создается путем диссоциации ионов D_2^+ , ускоренных до 200 кВ и инжектируемых в рабочий объем извне с помощью специального канала (системы магнитных и электрических полей). Расчетная плотность ионов D_1^+ предполагалась порядка 10^{12} см^{-3} .

Кроме систем с магнитными пробками кратко описана система с гофрированным полем и «восьмерка» — рейстрек с повернутыми в пространстве тороидальными участками. К сожалению, «восьмерка» не была у нас ни теоретически, ни, тем более, экспериментально изучена, тогда как ученые США представили весьма детальные доклады по таким системам, назвав их «стеллараторами».

Последнее, о чем пишет автор в этом разделе, — это использование высокочастотных (десятки мегагерц и выше) электромагнитных полей для устранения утечки энергии (например, через магнитные пробки, что было экспериментально проверено на небольшой модели [2]) или для нагрева плазмы (например, на ионно-циклотронном резонансе).

В заключение автор приводит, к сожалению, не оправдавшееся предсказание, «что метод освобождения энергии слияния в контролируемых условиях будет найден в течение ближайших двух десятилетий», сделанное индийским физиком Хоми Баба на Первой международной конференции по атомной энергии в 1955 г.

Автор отмечает, что в открытом обсуждении проводящихся в разных странах работ по МТР, «пожалуй, заключается самый главный шаг, который был сделан на пути к решению интересующей нас проблемы. По своему значению он является более существенным, чем результаты отдельных исследований, которые пока еще мало приблизили нас к конечной цели». Основное препятствие — это быстрое раз-

витие неустойчивости. «Поэтому кажется, что радикальным решением должно явиться изобретение системы, в котором все виды неустойчивости были бы устранены заранее». И заканчивает тем, что международное сотрудничество «должно привести к значительному сокращению срока, который нужен для того, чтобы мы пришли к намеченной цели».

В докладе А.М. Андрианова и др. [1] в основном изложены данные работ [19, 20, 21] (авторы этих работ — соавторы доклада), частично использованы данные работ [22, 23, 24, 25] — на все даны ссылки. Так, при описании экспериментов на камерах с проводящими стенками изложены данные работ [26, 27] (все их авторы — соавторы доклада), вплоть до осциллограмм, графиков и т.д. Естественно, что изложение более сжато, выводы короче и более общие:

- на всех стадиях разряда часть ($\sim 50\%$) тока течет вдоль стенок меры;
- поэтому всегда есть газоотделение со стенок;
- магнитное поле в центральной зоне продолжает нарастать и при срыве на-пряжения;
- при максимальных напряжениях разряда (120 кВ) энергия на частицу, получаемая из расчета баланса энергии, достигает 500 эВ.

Оригинальным является раздел «Исследование быстрых заряженных частиц», он не отражен в ранее опубликованных работах. Использовали камеру Вильсона для измерения энергии электронов и метод парабол Томсона для идентификации и определения энергии тяжелых заряженных частиц. Опыты с камерой Вильсона проводились на разрядной фарфоровой камере ($L = 100$ см, $D = 17,6$ см) при давлении $P_0 = 6 \cdot 10^{-2}$ торр. Разрядное напряжение 40 кВ, максимальный ток $I_{\max} = 200$ кА. Для градуировки использовали рентгеновские лучи из трубок при $U = 240$ и 275 кВ. Было показано, что для энергий больше 200 кэВ в условиях опытов существенно превалирует эффект Комптона, а не фотоэффект. По гистограммам энергетического распределения электронов разряда и градуировочным, вычитая фон, оценена граничная энергия электронов (180 кэВ), а по ней — жесткость рентгеновских квантов (320 кэВ). Было также установлено, что число квантов с энергией больше 320 кэВ не превышает 0,1%.

В методе парабол Томсона пучок частиц из разрядной камеры ($L = 80$ см, $D = 17,2$ см) через две диафрагмы ($d_1 = 1$ мм и $d_2 = 0,5$ мм) выводили в специальную камеру. Давление в разрядной камере $P_0 = 0,02—0,06$ торр (для поддержания в специальной камере высокого вакуума первая диафрагма перекрывалась быстродействующим электромагнитным клапаном). Рабочий газ — дейтерий с добавкой 4—10% гелия (для получения реперной параболы), иногда водорода. Разрядное напряжение $U_0 = 40$ кВ, максимальный ток $I_{\max} = (1,5—2)10^6$ А. Время экспозиции порядка 8 мкс, всегда наблюдались нейтроны ($\sim 10^8$ за импульс).

При наблюдениях перпендикулярно оси разряда было необходимо не менее 80 разрядов для получения едва заметных следов парабол. По оси разряда даже один импульс давал заметный след. Интересно, что на некоторых параболах, на участках, соответствующих энергии 80 кэВ (или больше), иногда получались четкие пятна диаметром 1 мм (рис. 1), что свидетельствовало о хорошей фокусировке частиц в узком интервале скоростей. Существенно, что при сохранении всех параметров разряда наблюдался большой разброс энергии частиц — чаще всего энер-

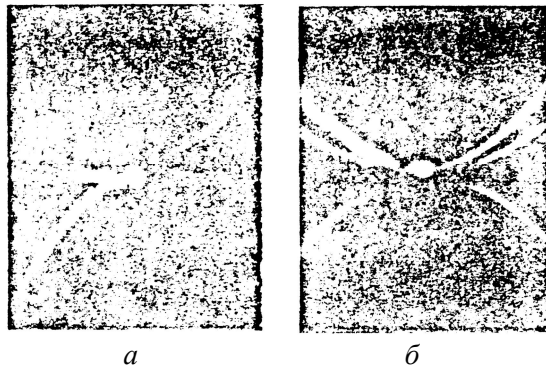


Рис. 1. Фотография парабол Томсона

- максимум интенсивности рентгеновского излучения находится вблизи анода;
- оба излучения возникают во вполне определенной области давления газа;
- энергия электромагнитных квантов примерно 300 кэВ, энергия дейтронов 200 кэВ.

Вся совокупность данных свидетельствует о единой природе жесткого рентгена и нейтронного излучения — видимо, вследствие ускорения ионов и электронов в возникающих в разряде электрических полях продольного направления. При некоторых неустойчивостях эти поля могут быть особенно большими.

В следующем разделе доклада «Разряды в камерах с металлической стенкой» изложены основные результаты работы [28] (хотя один из авторов этой работы, Д.П. Петров, — не соавтор доклада), вплоть до чертежей и гистограммы энергетического спектра нейтронов.

Последний раздел доклада посвящен теории сжатия и пульсаций плазменного столба при быстром нарастании тока. Отмечается, что качественная теория развита в работе [22], затем в работе [29] качественно рассмотрены основные физические процессы, существенные в мощном разряде с быстрым нарастанием тока; работа [30] содержит численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которые и приведены в докладе. Один из соавторов работ [29] и [30] является и соавтором доклада, но в тексте названы и все другие авторы. Графики, приведенные в докладе, взяты из работы [30], так же, как и сравнение с экспериментом. Естественно, что и выводы одинаковы.

В докладе В.С. Комелькова и др. [31] описаны результаты опытов в коротких камерах большого диаметра (фарфоровая: $L = 175$ мм, $D = 600$ мм; стеклянная: $L = 47$ мм, $D = 185$ мм) при больших максимальных значениях тока и больших скоростях нарастания тока. Для фарфоровой камеры $I_{\max} = 900$ кА, $\partial I / \partial t_{\max} = 610^{11}$ А/с, для стеклянной $I_{\max} = 1,8 \cdot 10^6$ А, $\partial I / \partial t_{\max} = 1,4 \cdot 10^{12}$ А/с. Работали и еще с одной камерой с $L = 250$ мм и $D = 250$ мм, стенки которой меняли: обычно использовался фарфор, для оптических измерений — стекло. Ток измеряли поясом Роговского, напряжение снимали с делителя. Магнитные поля и их производные измеряли магнитными зондами (дана ссылка на работу [21]). Для оптических измерений использовали монохроматор УМ-2 с фотоумножителем ФЭУ-19, выведенным через усилитель на осциллограф, а также ячейки Керра и скоростное фотографирование (СФР) в режиме фоторазвертки и в режиме «лупы времени». Нейтроны регистри-

гия была 80—170 кэВ, реже 170—200 кэВ. Параболы D_1^+ с энергиями 4—120 кэВ обнаруживались лишь при большом (> 10) числе разрядов, а при еще большем числе (≥ 25) наблюдались D_2^+ и D_2^- . Окончательные выводы таковы:

- рентгеновское излучение и быстрые дейтроны появляются одновременно;
- быстрые дейтроны ускоряются в направлении к катоду;

ровали сцинтилляционным счетчиком, экранированным от рентгена свинцом толщиной 20 мм. Осциллограммы тока и напряжения аналогичны опубликованным в работах [19, 21], на что и ссылаются авторы. Приводятся гистограммы распределения тока по радиусу для разных напряжений разряда ($U_0 = 20$ и 30 кВ) и разных давлений дейтерия ($P_0 = 10\text{—}0,05$ торр), фоторазвертка разряда, совмещенные осциллограммы тока и нейтронного импульса. Это, пожалуй, единственная работа, в которой изучали появление и движение паров металла электродов (на фарфоровой камере, электроды алюминиевые). Кроме того, в этой работе использовали предионизацию, производя разряд вспомогательной батареи ($C = 22$ мкВ, $U_0 = 20$ кВ), а после отрыва шнура от стенки включая основную батарею ($U_0 = 20$ кВ, емкость не указана). В выводах авторы отмечают, что основные характеристики разряда удовлетворительно согласуются с расчетами по работам [22] и [30]. Однако максимальная степень сжатия составила 140, что существенно больше расчетной (авторы объясняют это неполнотой захвата частиц); ток в камерах первого типа в определенных условиях ($P_0 = 0,05$ торр, $U_0 = 30$ кВ) в центральной зоне удерживается заметно дольше, чем это следует из расчета. Авторы показывают, что скорость сжатия столба плазмы линейно растет с производной тока в интервале $\partial I / \partial t = (15\text{—}12,5)10^{11}$ А/с.

Доклад С.М. Осовца и др. [6] посвящен изучению плазменного витка в поперечном магнитном поле. В нем изложена теория, описанная в работах [32] и [33], и эксперименты из работ [34, 33, 35—37]. Все авторы докладов являются (в разных сочетаниях) и соавторами указанных статей, хотя на них и не ссылаются. Теория, изложенная в работе [32], дана без каких-либо изменений, а рассмотрение витка плазмы с учетом его конечной проводимости проведено несколько иначе (например, в работе [33] введены безразмерные магнитное поле, радиус, время, скорость, а в докладе они даны в явном виде), хотя результаты, естественно, одинаковые. Доклад более сжат и написан проще. Экспериментальная часть также изложена кратко, например, не описаны первые опыты и опыты с предварительной ионизацией специально введенными электродами (есть в работе [35]), но есть и новые данные: опыты с периферическим напуском газа ранее не были описаны. Суть в том, чтобы в области устойчивой орбиты создать локально повышенную плотность газа. Опыты показали, что в этих условиях максимальная энергия ускоренных частиц примерно в 4 раза больше, чем для случая равномерного заполнения, при равных значениях тока срыва (число ускоряемых частиц меньше, и они ускоряются «в пустоту»).

В докладе Г.Г. Долгова-Савельева и др. [7] сообщается об исследовании устойчивости и нагрева плазмы в тороидальных камерах. Само перечисление установок (табл. 1), на которых проводились эксперименты, показывает, что объем работы весьма большой. Кроме того, в тексте упоминается, что камеры с диэлектрическими стенками изготовляли не только из кварца, но и из стекла и фарфора. Правда, они не описаны, сказано только, что «в камерах с диэлектрическими стенками на первой стадии разряда появляются статические заряды значительной величины...», что послужило причиной перехода к металлическим камерам. В разделе «Результаты измерений» приведены осциллограммы, полученные на камере с диаметром тора 125 см и диаметром камеры 47 см (в табл. 1 ее нет).

Все системы, кроме самой большой (о ней нет данных), без железных сердечников, все имели обмотки продольных магнитных полей. Принципиальная электротехническая схема приведена на рис. 2.

Т а б л и ц а 1.

Номер камеры	Радиус тора, см	Радиус трубы, см	Материал стенок камеры	Примечание
1	15	5	Кварц	Камера в медной оболочке
2	20	8	Медь с двумя разъемами	Продольного разъема нет
3	20	8	То же	Продольный разъем есть
4	50	13	Хромоникель с двумя разъемами	В медной оболочке
5	62,5	23,5	Хромоникель без разъемов	То же

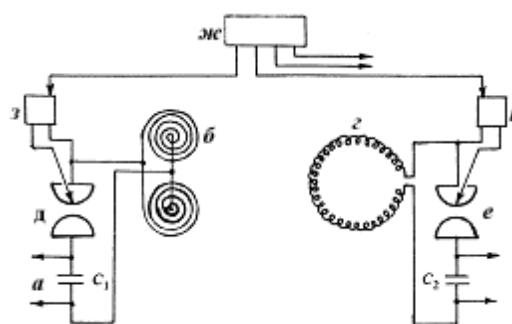


Рис. 2. Принципиальная электротехническая схема установки: а — конденсаторная батарея C_1 , питающая обмотку возбуждения; б, в — конденсаторная батарея C_2 , питающая обмотку продольного поля; г, д, е — управляемые разрядные устройства; жс — блок синхронизирующих импульсов; з, и — пусковые устройства разрядников; д, е соответственно

Измерения проводили обычными методами. Ток разряда — поясами Роговского с цепочкой RC: в камерах из диэлектрика — одним, в камерах из металла — двумя (охватывающим трубу камеры и находящимся внутри камеры). В сплошной металлической камере из тока разряда вычитался расчетный ток по камере (активное сопротивление $\approx 0,1$ Ом, индуктивное не учитывали), напряжение обхода снимали с делителя на разъеме или с витка, расположенного в экваториальной плоскости тора. Магнитные поля измеряли магнитными зондами (с катушками $0,4 \times 0,6$ см) с цепочкой RC.

Оптические измерения — СФР и спектрофотографии со стеклянной и кварцевой оптикой (со стеклянной оптикой велась регистрация хода интенсивности линий во времени). Применялось СВЧ-зондирование на волнах $\lambda = 0,4$ и $0,23$ см по прохождению сигнала.

Результаты измерений, к сожалению, не всегда связаны четко с определенной установкой, так что они имеют некий «обобщающий характер». На кварцевой камере изучали два режима: ток в разряде меняется синхронно с продольным магнитным полем; ток разряда меняется медленнее примерно в 9 раз, чем продольное поле. Установлено, что шнур сжимается 4—5 раз за разряд. Пожалуй, наиболее интересные данные получены с квазипостоянными магнитными полями на металлических камерах. Приведены осциллограммы токов и напряжений на обходе, установлено, что ток в максимуме линейно растет с напряженностью магнитного поля. Временные развертки фотографии плазменного шнура показывают, что устойчивость шнура также улучшается с ростом поля. В заключение авторы делают следующие выводы: плазма отрывается от стенок, захват магнитного поля не превышает 60%; шнур колеблется и взаимодействует со стенками; наблюдаемая проводимость соответствует температуре электронов 15—30 эВ; необходимо выяснить влияние примесей на процесс нагрева.

Работа С.Ю. Лукьянова и В.И. Синицина [25] является развитием работы [38] по спектроскопическим исследованиям плазмы быстрого сильноточного разряда ($dI/dt_{(t=0)} = 1,5 \cdot 10^{11}$ А/с, $I_{\max} = 460$ кА). Использована такая же, как в работе [38], развертка спектральных линий во времени, но применены кварцевые объективы (расширен ультрафиолет до $\lambda = 2200$ Å). Проведены измерения в смеси дейтерия (95%) и азота (5%) и в чистом дейтерии. Показано, что уже в момент первого сжатия ($\tau = 4$ мкс) вспыхивают линии азота вплоть до $N_V = 4619$ Å, энергия возбуждения которой составляет 58,98 эВ, что указывает, «по-видимому», как пишут авторы, на стремительное в это время нарастание температуры. Приведя расчетные графики распределения энергии в сплошном спектре $\ln I/I_0 = f(A)$ и нанеся экспериментально полученные точки, авторы показывают, что температура электронов $T_e \approx 10$ эВ. Для определения излучающего объема плазмы (знание его необходимо для определения плотности плазмы) были использованы фотографии, полученные с помощью СФР в спектрально разложенном свете, и измерение интенсивности (во времени) поразному коллимированных пучков света от исследуемого объема. Интенсивность континуума определялась по фототоку ($\lambda = 5000$ Å, интервал 50 Å), плотность рассчитывалась в предположении $T_e = 10\text{—}300$ эВ. При этом в диапазоне $T_e = 10\text{—}100$ эВ плотность менялась от $1,13 \cdot 10^{17}$ до $1,20 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ (для $P_0 = 0,05$ торр). Авторы отмечают, что температура $T_e = 300$ эВ приведена только для иллюстрации слабой зависимости n от T_e . В заключение авторы приводят форму линии N_{IV} ($\lambda = 3479$ Å), с точностью до 3% совпадающую с гауссовой кривой ($P_0 = 0,05$ торр, азота 5%). Отсюда была оценена температура ионов $T_i = 1,2 \cdot 10^6$ К. Окончательно авторы считают возможным определить температуру плазмы ($T_e \approx T_i \approx T \approx 10^6$ К, плотность $n = 1,2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, степень сжатия ≈ 35).

В работе И.Н. Головина и др. [14] описаны опыты по изучению прямого плазменного столба в продольном магнитном поле. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Диаметр стеклянной или фарфоровой камеры $D = 18\text{—}23$ см, длина $l_1 = 80$ см, расстояние между электродами $l_2 = 70$ см. (В некоторых опытах l_2 меняли, что прямо оговорено. Но меняли и камеры — на одном из графиков показана зависимость радиусов шнура от напряженности магнитного поля для разных электродов и разных l_2 и приведена $l_2 = 195$ см, чего при $l_1 = 80$ см быть не может...)

Емкость батареи C_2 (см. рис. 3) — от 10 000 до 100 000 мкФ, емкость батареи C_1 — от 800 до 6700 мкФ. Меняя напряжение на конденсаторах

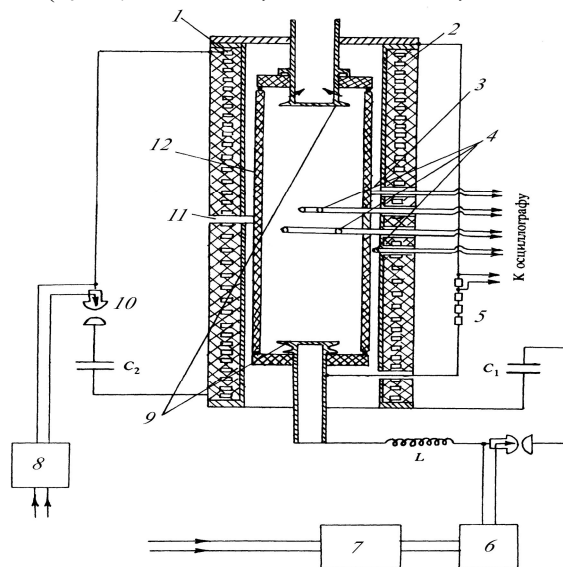


Рис. 3. Схема установки: 1 — коаксиальный обратный провод; 2 — катушка, создающая продольное магнитное поле; 3 — витки для измерения распределения продольного поля; 4 — пояса для измерения распределения тока; 5 — делитель напряжения; 6 — схема запуска; 7 — схема синхронизации; 8 — схема запуска; 9 — электроды из меди или нержавеющей стали; 10 — шаровой разрядник; 11 — щель для фотографирования; 12 — фарфоровая или стеклянная камера

и величину индуктивности, изменяли длительность первой полуволны тока от 300 до 1800 мкс, а его амплитуду — от 3 до 300 кА. Продольное магнитное поле всегда менялось значительно медленнее, чем ток разряда, а напряженность его можно было доводить до 27 кЭ. Давление газа $P_0 = 0,005\text{—}5$ торр, газ — дейтерий или аргон. Измерительная аппаратура и методы стандартные: ток — пояса Роговского (один охватывал трубу, два — непосредственно в разряде на радиусах $R_1 = 6,5$ см и $R_2 = 2,5$ см); напряжение — с низкоомного малоиндуктивного делителя; оптика — СФР в режиме развертки времени, фотографировали также спектр разряда и изменение во времени интенсивности отдельных линий (в частности, D_β).

Видно, что, как и в работе [7], проделано очень много опытов, условия разряда варьировались очень широко, применялись самые разнообразные методики (правда, не описано использование магнитных зондов). Остановимся на обсуждении результатов, так как в докладе опыты описаны очень сжато, хотя каждое из утверждений заключения обосновано соответствующими осциллограммами, графиками, СФР-граммами. Совокупность опытов приводит авторов к следующим выводам:

- в прямых разрядах с продольным магнитным полем и коаксиальным обратным проводом (при условии, что длина разряда значительно больше диаметра камеры) разряд начинается в узкой области возле оси;

- область, занятая разрядом, после пробоя расширяется со скоростью тем большей, чем больше производная тока, и тем меньшей, чем больше продольное магнитное поле;

- при выполнении условия (17) столб устойчив все время протекания тока и не достигает стенок камеры;

- невыполнение условия (17) приводит к неустойчивости, разряд занимает весь объем и касается стенок;

- в устойчивом столбе ионизация превышает 20%;

- давление магнитного поля тока равно давлению продольного магнитного поля внутри плазмы (с точностью до давления плазмы).

Эти выводы авторы интерпретируют так (в разделе «Обсуждение результатов»): пробой в центре обусловлен малой скоростью нарастания тока ($R > \omega L$) и, возможно, конфигурацией напряженности электрического поля при старте; расширение столба после пробоя — ростом плотности тока, в какой-то момент нарушающей условие (17), развиваются неустойчивости и при этом движение плазмы обеспечивает ионизацию на больших радиусах, так, чтобы выполнялось условие (17); с ростом тока столб расширяется, но растет и находящееся в нем продольное поле, что обеспечивается приращением этого магнитного поля благодаря анизотропии проводимости (винтовые линии поля и тока) (авторы ссылаются на работу С.И. Брагинского и В.Д. Шафранова 1953 г., вероятно [39]).

Доклад В.С. Комелькова [40] посвящен изучению мощных ($I_{\text{тах}} = 0,9$ МА) и быстрых разрядов в коротких стеклянных камерах; обычно отношение длины l к диаметру D составляло $l/D = 2,5\text{—}3$ [19, 21, 23, 41], в этой же работе $l/D = 1,3\text{—}0,45$, а в одной серии опытов геометрия электродов была очень своеобразной. Основные опыты сделаны с применением в качестве электродов пучков стержней («игл») в центре (диаметр пучка не указан) проводящих торцов, в остальной части изолированных вакуумной резиной (чертежа нет). Рабочий газ — дейтерий, давление $P_0 =$

$\approx 0,1\text{—}10$ торр. Диагностика обычная: ток измеряли поясами Роговского, напряжение снимали с делителя. Основной была оптическая диагностика: СФР в режимах фоторазвертки и «лупы времени» (экспозиция кадра 0,5 мкс), ячейки Керра (экспозиция 0,2 мкс). Синхронизация с разрядом с точностью 0,2—0,5 мкс.

Естественно, что в такой геометрии электродов разряд развивался совершенно иначе, чем в длинных камерах (есть некоторое сходство с развитием разряда, описанным в работе [28] и кратко изложенным в докладе [1], — разряд в камере с металлическими стенками и отношением $l/D = 0,7$). Старт разряда начинался с образования двух светящихся конусов, движущихся к центру и одновременно расширяющихся по диаметру. Продольная скорость примерно вдвое больше радиальной, смыкание конусов происходит через 1—1,5 мкс — образуется светящийся шнур. Автор все время сравнивает результаты, полученные при игольчатых электродах, с результатами при плоских электродах, но не указывает, ведется сравнение для его камер (никаких СФР-грамм с плоскими электродами не приведено) или используются литературные данные (нет конкретных ссылок, хотя в начале статьи упомянуты работы [19, 42, 23]). Подчеркивается, что при игольчатых электродах скорость сжатия почти в 3 раза больше, чем при плоских. На основании СФР-грамм построена схема движения плазмы разряда, которую можно принять как вполне возможную, но не подтвержденную прямыми опытами (например, с магнитными зондами). Часть опытов проведена с двумя оригинальными электродами: на одном из торцов (проводящих!) установлен цилиндр из 16 стержней из нержавеющей стали (сваренных по торцам проводящими кольцами) диаметром 160 мм, стержни не доходят до другого торца всего на 10 мм. А игольчатый электрод имел длину 15 мм. Разряд возникал между электродом и цилиндром стержней, затем продвигался в виде конуса внутри цилиндра к противоположному торцу. В другой геометрии на торцах были укреплены цилиндры длиной 80 и 85 мм, т.е. межэлектродный зазор составляет 85 мм, а цилиндр стержней окружал эти электроды и (или) находился под плавающим потенциалом или оба электрода — под одним, а цилиндр — под противоположным. В обеих геометриях разряд загорался между электродами и цилиндром. Также на основании СФР-грамм построена схема движения плазмы. Автор делает вывод, что опыты по продольному сжатию доказывают возможность фокусирования и получения плазменных струй с помощью направляющих электродов и что «в ряде экспериментов такое фокусирование было достигнуто».

Доклад А.А. Веденова и др. [2] написан коллективом из четырех теоретиков и трех экспериментаторов, он посвящен вопросам термоизоляции и удержания плазмы высокочастотными магнитными полями. В теоретической части авторы явно используют свои более ранние работы (например, [43]), не ссылаясь на них, вероятно, потому, что они берут их далеко не в полном объеме. Авторы отмечают, что использование ВЧ-полей целесообразно не для удержания всего давления плазмы, а только для уравнивания давления в отдельных участках ее поверхности, возлагая основное удержание на постоянное магнитное поле. Как пример рассматривается продольное магнитное поле с объемными резонаторами на концах. Сначала обсуждается движение одиночной частицы в предположении, что ее ларморовский радиус R и смещение за период колебания ВЧ-поля (а точнее, за время $\tau = 1/\Omega$, где Ω — частота ВЧ-поля) малы по сравнению с характерным размером L , на котором

существенно меняются величины полей. Принимается, что ВЧ-волна стоячая с круговой поляризацией, движение частиц «быстрое» (частоты ларморовские ω_H и частота Ω) и «медленное» (смещение за время, большее чем $1/\Omega$ и $1/\omega_H$). В этом предположении рассматривается слой на границе плазма—поле (при $Z \rightarrow +\infty$ есть только плазма, при $Z \rightarrow -\infty$ есть только поле), получено условие баланса давлений стоячей ВЧ-волны и плазмы и определена максимальная энергия удерживаемых частиц $\varepsilon_{\max}$. Показано, что столкновения всегда будут приводить к появлению частиц с $\varepsilon > \varepsilon_{\max}$, но при условии $\Omega\omega_H/\omega_0 \ll 1$ $\omega_0^2 = 4\pi e^2/m$ уход мал и определяется $\exp(\omega_0^2/\omega_H\Omega)$. Поэтому для частот $\omega_H < \Omega < \omega_H$ давление электромагнитной волны с волновым вектором вдоль постоянного магнитного поля может уравновешивать давление плазмы.

Рассматривая устойчивость границы плазма—поле в гидродинамическом приближении при сильном скинировании (длины волн возмущения существенно больше толщины переходного слоя), авторы получают области неустойчивости, зависящие от Ω , плотности плазмы ρ , амплитудного значения $\tilde{E}$, температуры T и массы частиц M . Неустойчивость поверхности имеет резонансный (по длинам волн) характер, и для обеспечения устойчивости длина границы плазма—поле должна быть не очень большой.

Эксперимент был поставлен на установке, блок-схема которой приведена на рис. 4. Продольное поле $H = 0—2000$ Э, трубка из кварца диаметром $D = 15$ мм,

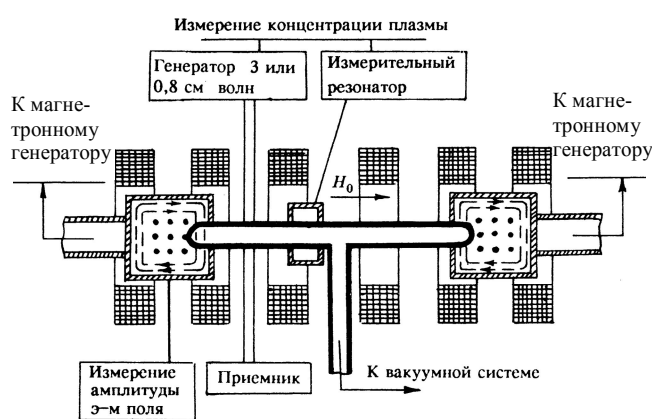


Рис. 4. Блок-схема установки

длинной $L = 400$ мм. Концы трубки входили в прямоугольные объемные резонаторы на 15 мм. Колебания типа TE_{101} возбуждались магнетронами 10-см диапазона, дающими 134 импульса длительностью 120 мкс, мощностью (регулируемой) до 400 кВт. Максимальная амплитуда ВЧ магнитного поля 60 Э в резонаторах. Газы — водород, аргон, азот, давление $P_0 = 5 \cdot 10^{-5}—5 \cdot 10^{-3}$ торр. Опреде-

ляли амплитуду магнитного поля в резонаторе и изменение концентрации плазмы путем измерения смещения собственной частоты измерительного резонатора, а также по границе прохождения электромагнитных волн ($\lambda = 3$ и 0,8 см). Разряд зажигался при возбуждении колебаний в резонаторах, сильно расстраивал их и распространялся вдоль магнитного поля, заполняя трубку.

В зависимости от амплитуды поля в резонаторе и концентрации плазмы меняется расстройка резонатора. При достаточно большой амплитуде поля расстройка уменьшается с ростом концентрации, что указывает на вытеснение плазмы ВЧ-полем из резонатора. Было установлено, что при концентрации плазмы в трубке (вне резонатора), превышающей 10^{13} см $^{-3}$, концентрация плазмы в резонаторе не превыша-

ет 10^{10} см^{-3} , т.е. ВЧ-поле практически полностью вытесняет плазму из резонатора, что качественно соответствует расчету при $H = 60 \text{ Э}$, $n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 5 \text{ эВ}$.

Доклад Р.З. Сагдеева и др. [44] описывает динамику разреженной плазмы в магнитном поле. Во введении авторы указывают, что в бесстолкновительном случае (ларморовские радиусы R много меньше размеров системы $L (R \ll L)$ и произведение ларморовской частоты ω на характерное время задачи T много больше единицы: $\omega T \gg 1$) можно разделить «быстрые» и «медленные» процессы (что было предложено в работе [45], есть ссылка). Метод исключения быстрой переменной при рассмотрении изменений состояния системы за большие времена был предложен в работе [46] (что используют авторы). В разделе «Уравнение макроскопического движения плазмы» получена система уравнений для ионной компоненты (оговорено, что для электронов уравнение отличается только массой и знаком заряда) в предположении, что отсутствует поток тепла вдоль магнитного поля. В разделе «Гидродинамика плазмы низкого давления» (считается, что $8\pi P/B^2 \ll 1$) получены уравнения, описывающие поведение плазмы в нулевом приближении, и оговорено, что они недостаточны, если силовые линии не замыкаются, а заполняют поверхность. Показано, что при равновесии давление P должно быть постоянным на поверхности: $U = -\int dl/B = \text{const}$. Показано также, что для устойчивости необходимо и достаточно выполнение неравенства $\nabla P_0 \nabla U + (\gamma P_0/U)(\nabla U)^2 < 0$. Переходя к разделу «Неустойчивость плазмы с анизотропным распределением скоростей ионов в магнитном поле», авторы рассматривают задачу в прежнем предположении отсутствия соударений и в предположениях, что инкременты развития возмущений меньше ларморовской частоты, а длины волн возмущений много больше среднего ларморовского радиуса ионов. Получив характеристическое уравнение для малых значений инкремента $P = P(K_y, K_z)$ (ось z — вдоль невозмущенного магнитного поля), авторы получают и условия возрастания возмущения как для случая $T_{\parallel} > T_{\perp}$, так и для случая $T_{\perp} > T_{\parallel}$. Очень наглядна физическая картина развития таких неустойчивостей, предлагаемая авторами. Так как линейное приближение не может ответить на вопрос о предельной амплитуде колебаний, авторы указывают, что в случае применения второго приближения в ряде простейших случаев развитие колебаний приводит к выравниванию температур $T_{\perp}$ и $T_{\parallel}$. В разделе «Исследование устойчивости цилиндрического плазменного шнура с помощью кинетического уравнения» авторы принимают, что выполняются все условия дрейфового приближения, пренебрегают температурой электронов ($T_i \gg T_e$), считают, что в равновесии магнитное поле тока есть только вне цилиндра плазмы B_{ze}^0 , а продольное поле постоянно как вне (B_{ze}^0), так и внутри (B_{zi}^0) цилиндра и сам цилиндр однороден как по оси z , так и по азимуту φ . Электрическим полем пренебрегают (оно уничтожается движением электронов по оси z). Получив дисперсионное уравнение, авторы отмечают, что оно «имеет много общего с дисперсионным уравнением, полученным В.Д. Шафрановым в магнитогидродинамическом приближении». Рассматривая три частных случая, они отмечают, что:

— при $T_{\perp} = T_{\parallel}$ «критерий устойчивости в точности совпадает с критерием, полученным В.Д. Шафрановым при $\gamma = 2$ », но инкремент зависит от волнового вектора иначе;

— при $I_0 = 0$; $H_{\varphi_0}^0 = 0$; $T_{\parallel} \neq T_{\perp}$ МГД-рассмотрение не дает неустойчивостей, а в кинетическом рассмотрении неустойчивость возможна как при $T_{\perp} > T_{\parallel}$, так и при $T_{\perp} < T_{\parallel}$;
 — возможны магнитозвуковые колебания, хотя учет теплового движения приводит к их затуханию.

Авторы отмечают, что неустойчивость, связанная с анизотропией температур, может наблюдаться при адиабатическом нагреве (см. [15] и [47]), а при быстром сжатии плазменного шнура могут ужесточиться условия устойчивости. Последний раздел «Нелинейные одномерные движения разреженной плазмы» посвящен особенностям движения разреженной плазмы, далекой от равновесия. Рассматривая случай, когда все величины зависят только от одной пространственной координаты, перпендикулярной магнитному полю в прежних предположениях ($R \ll L$ и $\omega T \gg 1$), авторы отмечают формальное сходство своих основных уравнений с уравнениями газовой динамики при $\gamma = 2$. Однако физические причины, приводящие к образованию ударной волны в газе и плазме, различны. В отличие от газа в плазме стационарным движением может быть не только установившаяся ударная волна, но и бегущая магнитозвуковая волна конечной амплитуды (она может иметь вид и одиночного импульса, т.е. того, что теперь называют солитоном).

Вероятно, нужно отметить, что в этом докладе приведены ссылки на четыре работы зарубежных авторов (1956—1957 гг.) и три работы советских ученых, но нет ссылок на явно использованные (например, [17]) работы, авторы которых являются и соавторами доклада (кроме работы [48], тогда еще не опубликованной).

В докладе Б.А. Трубникова и В.С. Кудрявцева [49] рассмотрено излучение плазмы в магнитном поле. Первая часть ее является изложением работы [50] (и частично [51]), несколько более сжатым и перестроенным, но все основные рассуждения и выкладки сохранены. Вторая часть — сокращенное изложение работы [52]. Объединяет их то, что «магнитное» (по терминологии авторов) излучение искажает форму функции распределения, однако даже в оптически прозрачной плазме это искажение невелико. А запертость излучения способствует термализации, т.е. еще уменьшает этот малый эффект.

В докладе Б.Б. Кадомцева и С.И. Брагинского [53] рассмотрен вопрос о стабилизации плазмы магнитными полями специальной конфигурации. В основном это существенно сокращенное изложение работ [54] (первый раздел доклада) и [55] (второй раздел доклада). Использована работа [16] (во втором разделе), где применена (как и в докладе) величина $U = -\int dl/H$, введенная в работе [17]. Так что доклад [53] удачно обобщает ряд работ авторов, хотя ссылок на них нет. Но работы опубликованы в «Сборнике»*, а он вышел в свет как раз к Женевской конференции.

В докладе Р.З. Сагдеева и В.Д. Шафранова [56] обсуждается поглощение энергии ВЧ электромагнитного поля в высокотемпературной плазме. В докладе использованы работы [57—60]. Авторы выделяют «столкновительные» (нерезонансные) и «бесстолкновительные» (резонансные) механизмы поглощения энергии плазмой. В докладе рассмотрены только последние, реализующиеся при циклотронном резонансе (электронов или ионов), при совпадении скорости заряда с фазовой скоро-

* «Сборник» — книга «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций»

стью ВЧ-волны (для продольного по магнитному полю движения электронов это затухание Ландау, для поперечного — при близости тепловой скорости зарядов к поперечной ветви электромагнитных колебаний — черенковское поглощение). Рассматривая тензор диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\alpha\beta}$ (использованы работы [58, 60]), авторы получают в явном виде все три его компоненты, оговаривая, что эти выражения справедливы лишь при малости ларморовского радиуса частицы по сравнению с поперечным (к магнитному полю) размером системы, изучают колебания плазменного токового шнура, стабилизированного продольным магнитным полем и находящегося в идеально проводящем кожухе. Тепловое движение учитывается, что существенно, так как именно оно приводит к циклотронному затуханию. В полученном дисперсионном уравнении не содержится черенковское поглощение. Авторы отмечают, что анализ полного дисперсионного уравнения для цилиндра является сложным, и разбирают случай однородной плазмы. Просто и наглядно изложены случаи затухания волн (обыкновенной и необыкновенной) в разных (но строго «прямых» — вдоль или перпендикулярно магнитному полю) — волнах. Дана ссылка на работу [51]. Определены края полос поглощения — при продольном распространении в соответствии с работой [57], при косом — с работой [61] (даны ссылки). Отмечено, что «представляется заманчивым использовать специфические диэлектрические свойства высокотемпературной плазмы, находящейся в магнитном поле, для зондирования (активного и пассивного)». Переходя к нелинейному рассмотрению (использована работа [59]), авторы показывают, что в случае волны, распространяющейся вдоль поля и поглощаемой на циклотронном резонансе, тепловая энергия плазмы остается постоянной (в предположении о покоящихся ионах и в пренебрежении магнитным полем волны). Возрастает только энергия вращения частиц, но для хаотизации «размешивания» фаз вращения необходима неоднородность магнитного поля. В черенковском поглощении изменяется распределение и по продольным скоростям.

В докладе С.И. Брагинского и В.Д. Шафранова [10] рассмотрены возможности нагрева тороидального плазменного шнура до термоядерных температур. Авторы широко используют свои как опубликованные в журналах [9, 62—65], так и включенные в «Сборник» работы [29, 39, 66—69] и работы других авторов, ссылаясь на опубликованные статьи [11, 51] или прямо на фамилии авторов с указанием года. Последнее особенно интересно, так как «Сборник» к моменту написания доклада еще не вышел из печати и авторы доклада называют фамилии авторов и даты выполнения работ [70—79] (приведенные номера работ установлены по фамилии автора, году выполнения и существу содержания ссылки в докладе [10]. — М.Р.). Авторы доклада явно пользовались отчетами, а возможно, и рукописями статей, готовящихся к изданию в «Сборнике».

Доклад состоит из введения, разделов «Равновесие», «Устойчивость», «Нагрев, баланс энергии», «Стабилизация слабым полем и кожухом», «Стабилизация сильным полем». Чтобы не повторять аннотации ранее рассмотренных и использованных в докладе [10] работ, приведем ссылки на них. Так, для раздела «Равновесие» основной является работа [65], но использованы и [72, 78, 79, 80]. В разделе «Устойчивость» основными, пожалуй, являются [8, 9], упомянуты [73, 80]. В разделе «Нагрев, баланс энергии» основная работа [64], но использованы [39, 62, 63, 70, 74,

77, 81, 82]. В разделе «Стабилизация слабым полем и кожухом» основные работы [8, 9], использована также [76]. В разделе «Стабилизация сильным полем» основные работы [8, 9], но есть дополнения. Конечно, выделение основных и использованных работ весьма условно, тем более что сам порядок изложения, частично и выкладки, в докладе другой. В ряде случаев использование сводится по существу только к ссылке на то, что этот вопрос был исследован такими-то авторами в таком-то году (например, [70]), но излагают его авторы доклада совершенно иначе. А доклад [53] упоминается потому, что «возможны также другие пути удержания и стабилизации плазменного шнура, например, с использованием охраняющих проводников», не рассматриваемые авторами доклада [10]. По существу в докладе [10] рассмотрены процессы, происходящие в тороидальном шнуре плазмы с током, находящимся в продольном магнитном поле. В конце рассмотрены две концепции возможной термоизоляции такого шнура — это разделы «Стабилизация слабым полем и кожухом» и «Стабилизация сильным полем». Сравнение систем авторы проводят в конце последнего раздела, однозначно показывая преимущества систем с сильным полем, т.е. систем, теперь называемых токамаками. Но заканчивают очень осторожно: «В настоящее время нельзя сделать окончательного вывода о преимуществах той или иной из этих систем. Необходимы экспериментальные исследования в обоих направлениях». История сделала этот выбор. Работы [8, 9, 64] сегодня фактически стали классическими, и доклад [10] очень хорошо обобщает и их и, пожалуй, все советские работы по тороидальному плазменному шнуру, выполненные к лету 1958 г. Во введении авторы упоминают две зарубежные работы 1957 г. [83, 84], но в тексте используют только одно числовое соотношение, полученное в работе [84].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (сентябрь 1958 г., Женева) можно считать рубежом, окончательно изменившим ситуацию с проблемой управляемого термоядерного синтеза во всем мире: после нее не осталось в этой области секретных разработок. В опубликованных до конференции и доложенных на ее заседаниях работах ученых СССР, США, Великобритании, Франции, ряда других стран (правда, представивших по 1—4 доклада, тогда как США представили 69 докладов, а СССР сделал 17 докладов и привез только что вышедшие четыре тома сборника «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций», содержащего 106 новых статей) было изложено все, что известно. Более того, атмосфера, общение ученых на конференции и во время заседаний и в кулуарах были весьма дружелюбными. Много кулуарных встреч было на выставке, работавшей там же, во Дворце наций и в специально построенных рядом павильонах. Причем обсуждались не только принципиальные физические, но и сугубо технические вопросы: элементы конструкций, методы получения «горячего» вакуума и т.д. Все же самым, пожалуй, интересным было то, что, несмотря на барьеры секретности, наука в мире развивалась одинаково. Собственно, это не было новостью — такое положение выяснилось уже на Первой Женевской конференции при обсуждении физики ядерных реакций и реакторов деления.

А в физике горячей плазмы и термоядерного синтеза это полностью подтвердилось: ученые СССР не узнали ничего принципиально нового. Для ученых США и других стран принципиально новой была работа [49] по излучению плазмы в магнитном поле (то, что теперь называют циклотронным излучением), аналогичных работ не было. Однако все основные предложения по возможным путям создания магнитного термоядерного реактора были практически одинаковы. Правда, идея использования вращательного преобразования, создаваемого без полей тока (стелларатор в виде восьмерки), в США была разработана теоретически весьма детально, а мы «выложили» только «голую идею», да еще не очень правильно объясненную. Это упрек некоторым нашим математикам, еще за год до конференции обещавшим рассмотреть топологию магнитного поля «восьмерки», но так и не выполнившим свое обещание. Следует отметить еще предложение Кристофилоса (доклад № 2446) использовать релятивистские электроны («Астрон») для создания магнитного поля с замкнутыми силовыми линиями. Идея оригинальная, вот только ее техническое воплощение так и не удалось самому автору.

Были и другие различия — у нас не было «Θ-пинчей» («Сцилла», доклад № 356), самосжатого разряда в виде слоя плазмы («Триакс», доклад № 2349), а в США систем типа Ж-0; были различия в методиках, технике получения высокого вакуума и т.д., но это уже «величины высших порядков малости», все основные идеи оказались одинаковыми. Правда, масштаб работ в США был существенно больше.

Интересно посмотреть, как с 1950 по 1958 г. у нас развивались различные направления в проблеме МТР. Строго говоря, сделать это не просто: любое деление элементов проблемы неизбежно будет более или менее условным; многие теоретические работы освещают одновременно разные аспекты проблемы. Есть, конечно, и четко направленные на решение одной вполне конкретной задачи, но немало и широких, охватывающих ряд вопросов. Поэтому к предлагаемой таблице и выводам из нее надо относиться критически — неизбежна некоторая субъективность автора, возможно смещение акцентов. Попыткой уменьшить роль субъективного отношения является, в частности, введение раздела «общетеоретические (ОТ) работы», куда отнесены такие разные материалы, как работа В.И. Когана [81] о скорости выравнивания температур и предложение Г.Н. Будкера [47] об адиабатическом нагреве, все работы С.И. Брагинского по переносам, почти чисто математическая работа Н.Н. Боголюбова и Д.Н. Зубарева [46] и «стабилизированный электронный пучок» Г.И. Будкера [85]... Основополагающие работы И.Е. Тамма и А.Д. Сахарова [86—88], работы Д.Н. Зубарева и В.Н. Климова [74, 89] по расчетам МТР выделены именно как основополагающие, как показывающие оптимизм первых лет. Есть и еще одна трудность: в работах, опубликованных в журналах в 1956—1958 гг., далеко не всегда указано время выполнения работы — приходится их относить к году публикации, если нет в архивах более раннего, точно воспроизведенного в статье отчета. В некоторых работах в «Сборнике» (например, [26, 28, 90]) дан интервал в 2—4 года, они отнесены к последнему указанному году. Деление на теоретические и экспериментальные проведено, естественно, по содержанию, но есть три работы, содержащие и новые теоретические и экспериментальные данные: это работы А.М. Андрианова и С.М. Осовца [91], С.М. Осовца и Н.Н. Щедрина [33] (существенно расширено теоретическое рассмотрение плазмы в системах Ж-0, ранее данное

С.М. Осовцом в работе [32]), Л.А. Арцимовича и др. [4]. В табл. 2 они отнесены к экспериментальным.

Т а б л и ц а 2.

Год	М	ОТ	z	Т	У	КВ	Л	Ж	Р	Всего
1951	4	5	2т	<u>2т</u> 2э	-	1	-	-	-	17
1952	1	5	1т	-	3т	-	-	-	1э	11
1953	-	2	<u>6т</u> 1э	-	1т	-	-	1т	-	11
1954	-	4	<u>2т</u> 2э	1э	-	-	1т	-	-	11
1955	-	5	-	-	-	-	-	2э	-	7
1956	-	8	<u>1т</u> 8э	1э	1т	-	2т	1э	1э	23
1957	-	11	4э	2э	4т	4	<u>3т</u> 2э	1э	1э	34
1958	-	6	<u>2т</u> 2э	<u>1т</u> 1э	<u>6т</u> 1э	12	-	-	-	31
Доклады	-	3	5	1	1	2	-	1	1	14
Σ (без док-ладов) 5		46	<u>14т</u> 17э	<u>3т</u> 7э	<u>15т</u> 1э	17	<u>6т</u> 2э	<u>1т</u> 4э	3э	155

В табл. 2 приняты следующие обозначения: М — работы основополагающие и по расчету термоядерных реакторов; ОТ — общетеоретические; z — прямые z -пинчи; Т — тороидальные системы; У — работы по устойчивости плазмы; КВ — работы по колебаниям и волнам (включая удержание и нагрев ВЧ-полями); Л — работы по системам удержания плазмы внешними магнитными полями; Ж — «Жанр-0» — работы по плазменному витку в магнитном поле, перпендикулярном плоскости витка; Р — разные; т, э — теоретическая и экспериментальная работы. Без индексов «т,э» — ОТ-работы, КВ-работы (по КВ экспериментальных работ не было, только в докладе [2] есть описание одного эксперимента).

В табл. 2 включены 155 работ, опубликованных в «Сборнике» и журналах до открытия Второй Женевской конференции, и 14 докладов на конференции. Последние не включены в графу Σ (сумма), так как в основном это изложение (иногда заметно измененное) опубликованных ранее работ. Совсем новое (не опубликованное ранее) — доклады [14, 92], сообщение в докладе [3] о термоядерной реакции, полученной в 1952 г. путем сжатия и кумуляции с помощью обычного взрывчатого вещества, и сообщение о небольшом эксперименте по термоизоляции и удержанию плазмы ВЧ электромагнитным полем в работе [2]. Не включены в таблицу обзорный доклад И.В. Курчатова [93], статья в журнале «Природа» (№ 1 за 1957 г.) Л.А. Арцимовича и С.Ю. Лукьянова. Из 155 работ (теоретических 107) посвящено (как теоретических, так и экспериментальных): прямым z -пинчам 36, колебаниям и волнам 19, неустойчивостям и их стабилизации 17, магнитным ловушкам 8, Ж-0 — 6, рельсотрон представляют всего две статьи, хотя направление создания и ускорение сгустков плазмы в дальнейшем серьезно расширилось, а рельсотрон можно считать прародителем таких систем. Практически нет статей по диагностике — только одна [94] по пьезодатчику — чисто диагностическая, да еще в одной [27] уделено серьезное внимание пьезоэлектрическому датчику. В то же время магнит-

ные зонды [41], метод развертки спектральной линии во времени [38] позволили получить новые данные, вполне сравнимые с тем новым, что давали пьезодатчики. Но в работах [38, 41] основное — получение и обсуждение экспериментальных данных, как, впрочем, и в работе [27]. В графу «Разные» (Р) попали только работа [94], работы по рельсотронам [4, 5], работа [95] по каналу искры; в строке «Доклады» — обзорный доклад Л.А. Арцимовича [3].

Видно, что прямому z -пинчу и теоретики, и, особенно, экспериментаторы уделяли большое внимание в течение всего рассматриваемого периода. Кажется, что значительно меньше внимания теоретики уделяли тороидальному пинчу, но это дефект, сугубая условность составления таблицы — ведь и ряд работ по прямому z -пинчу, и ряд общетеоретических работ и работ по устойчивости прямо применимы к тороидальному пинчу.

Вопросы устойчивости также находятся в сфере внимания теоретиков в этот период. А вот колебания, волны, взаимодействие ВЧ-полей с плазмой привлекают внимание теоретиков лишь с 1957 г. (в 1951 г. была одна работа Б.И. Давыдова [96]). Экспериментальных работ по КВ нет, но в докладах на конференции была одна, содержащая и теорию, и небольшой эксперимент [2]. Интересно, что по ловушкам после классической работы Г.И. Будкера [15] появилось еще всего пять теоретических работ, и то со сдвигом на 1—2 года, а «Огру» уже строили...

Важно было бы как-то оценить научную значимость работ, но как это сделать? Сравнить с зарубежными, а как?

Считается, что цитирование отражает научную ценность работы. Вероятно, в какой-то мере это и верно, но цитировать можно только то, что хотя бы прочитал, с чем знаком. А вот советские работы зарубежные ученые не очень-то читали: в 19 наиболее содержательных докладах ученых США (авторы: Спитцер, Розенблют, Теллер, Крускал, Пост, Так, Стикс, Колб, Колгейт или коллективы) приведено 285 ссылок, из них всего 14 на наши работы, причем в докладе Така (№ 1860) из 57 ссылок 10 наши — в Лос-Аламосе знали советские работы. А если этот «выброс» не учитывать, то из 228 ссылок имеем всего четыре: две на работы В.Д. Шафранова, по одной на доклад И.В. Курчатова и работу А.Л. Безбатченко и др. Аналогичная ситуация и с докладами ученых Великобритании: из 94 ссылок лишь четыре на наши работы: две — на работы В.Д. Шафранова, по одной — на М.А. Леонтовича и М.Д. Габовича. Советские ученые значительно лучше знали западную литературу. Динамика цитирования в работах «Сборника», в опубликованных до осени 1958 г. работах и докладах на Женевской конференции показана в табл. 3. Видно, что доля

Т а б л и ц а 3.

Год	Всего ссылок	Из них на зарубежные работы	%
1955	24	9	37,5
1956	21	3	14,3
1957	97	37	38,1
1958	91	20	21,9
Женева	113	41	36,2
Примечание. В работе [98] из 26 ссылок 20 на зарубежные работы			

ссылок ученых США и Великобритании на советские работы меньше 5%, тогда как ученые СССР в 3—7 раз шире знают и используют западную научную литературу. Конечно, есть ряд оригинальных, пионерских работ, где вообще нет ссылок (на пример, [97]) или есть ссылки только на классиков и свои более ранние работы (на пример, [15]). Но есть и другие, содержащие по существу аналитический обзор состояния науки в данной области, наиболее яркий пример — работа [98].

Интересно, конечно, и «взаимоцитирование» отечественных авторов и, особенно, по моему мнению, вынесение благодарностей («за инициирование», «обсуждение», «поддержку» и т.д.). Их получил М.А. Леонтович — в 46 работах. В девяти работах благодарности вынесены Л.А. Арцимовичу и Д.А. Франк-Каменецкому, в семи — С.И. Брагинскому, в шести — Г.И. Будкеру и С.М. Осовцу, в пяти — Б.И. Давыдову. По 2 или 3 благодарности имеют А.М. Андрианов, А.Д. Бирюк, М.С. Иоффе, В.И. Коган, С.Ю. Лукьянов, А.Б. Мигдал, А.Д. Сахаров, В.С. Фурсов, по одной еще 15 сотрудников. С «взаимоцитированием» и «самоцитированием», т.е. ссылками на свои предыдущие работы, вопрос сложнее. Не случайно в наших докладах на Женевской конференции часто приводится ссылка на авторов работ (иногда и с указанием года выполнения), но нет ни названий их, ни указания на публикацию. И это понятно, так как основное число публикаций было в еще не вышедшем до конференции «Сборнике». Поэтому в очень «неравноправных» условиях оказались опубликованные ранее работы и работы, вышедшие в «Сборнике». Если судить только по опубликованным работам, то больше всего ссылок (включая те, что даны в статьях «Сборника») на работы М.А. Леонтовича и С.М. Осовца [22] — 16 ссылок, В.Д. Шафранова [9] — 13 ссылок, Л.А. Арцимовича и др. [21] — 12 ссылок, на любую из других — шесть и меньше. На работу В.Д. Шафранова [8], аналогичную работе [9], но более широкую и более детальную, всего четыре ссылки, хотя она-то, пожалуй, и стала классической. Если судить не по отдельным статьям, а по авторам (совокупности работ индивидуальных и в соавторстве), то картина еще менее показательная: С.М. Осовец — соавтор четырех цитируемых более 5 раз работ; Л.А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов — соавторы трех цитируемых более 5 раз работ; А.М. Андрианов, И.М. Подгорный, В.И. Синицин, Н.В. Филиппов — соавторы двух таких работ. А М.А. Леонтович, получивший 46 благодарностей, С.И. Брагинский, Г.И. Будкер, Б.Б. Кадомцев, В.Д. Шафранов, работы которых стали классическими, встречаются всего по одному разу. Очевидно, что количество публикаций с участием данного автора тоже мало что отражает. Теперь «самоцитирование». Кого цитировать тем, кто изучает систему, направление, которое не изучает никто другой? Пример: системы Ж-0 изучали только в секторе С.М. Осовца. Основополагающая работа [32], и во всех работах этого направления [33, 34, 35, 36, 37] она приводится, а дальше в последующих ссылаются на нее и предыдущие. И только в одной работе сотрудников другого сектора [99] есть ссылка на работу [32], на остальные ссылок нет. Направление-то было внутренне замкнутым. Наверное, единственно правильный путь — судить по тому, как стали использовать данные (предложения, результаты опытов) другие ученые и сколь долго их использовали. Навсегда вошли в физику «пробки Будкера», «предел Шафранова—Крускала», понимание переносов по С.И. Брагинскому, Min B по Б.Б. Кадомцеву.

Вероятно, интересно сравнить и начало работ в разных странах. В докладе Теллера (США, № 2410) утверждается, что обсуждение возможности управляемого синтеза проводилось в Лос-Аламосе автором, Э. Ферми, Дж. фон Нейманом, Дж. Таком и Л. Альваресом еще во время войны, что «были известны некоторые общие элементарные факты» (автор перечисляет их). «В 1952—1953 гг. успешное искусственное высвобождение термоядерной энергии стимулировало начало экспериментальных работ». Теллер указывает, что самосжатые разряды начали получать в Лос-Аламосе, затем Бэйкер и Колгейт в Калифорнии «и еще позднее в других местах». Он называет Н. Кристофилоса (система «Астрон»), Л. Спитцера (стеллараторы), Р. Поста и Г. Йорка (магнитные зеркала) и указывает, где ведутся соответствующие работы. Интересно то, что работы развернули широким фронтом в организациях, в основном работающих на военных (Лос-Аламос, Ок-Ридж, Ливерморская лаборатория, Военно-морская лаборатория), и в ряде исследовательских центров в университетах и фирмах (Принстон-ский, Нью-Йоркский, Калифорнийский, Техасский университеты, Университет в Теннесси, лаборатории чистой и прикладной физики Дж. Гопкинса, Стенфордский научный институт, Массачусетский технологический институт, Аргоннская национальная лаборатория, Технологический институт Стивенса), научная лаборатория фирмы IBM и т.д.). Поддерживали работы ряд фирм, в том числе такие, как «Вестингауз электрик», «Вашингтонская электротехническая», «Дженерал электрик». В ссылках докладов США названо около 30 организаций. Видно, что между учеными были очень близкие связи, во многих докладах соавторами являются сотрудники разных организаций, особенно часто это Ок-Ридж и Лос-Аламос с Ливермором. Правда, из докладов видно, что фирмы в основном принимали участие в проектировании и сооружении установок, а не в проведении экспериментов. Но ведь без установок и опыты проводить не на чем.

В Англии (доклад Тонемана № 78) работу начали в 1947 г. в Лондоне, в 1948 г. в Оксфорде (откуда в 1951 г. перебазировались в Харуэлл, а лондонскую группу — в Олдермастон). С 1956 г. в центре по разработке атомного оружия начала работать небольшая группа. В ссылках в докладах называются еще Кембридж, Британский университет, фирмы «Электрик Виккерс» и «Ассошиэйтед Электрик Индастрис».

Физикой плазмы занимались уже много лет и в ряде организаций нашей страны, но физикой холодной, газоразрядной плазмы. Конечно, в такой плазме многое происходит так же, как и в горячей, — исследования последней начинались не на пустом месте. Это четко видно по ссылкам и на отечественную, и на зарубежную литературу в подавляющем большинстве наших работ. Да и в зарубежных, хотя и мало, но есть ссылки не только на работы по термоядерным исследованиям — уже упоминалась работа М.Д. Габовича, а в докладе США (№ 1860) есть ссылки на работы Л.А. Арцимовича, Л.Д. Ландау (1936 г.), А.И. Ахиезера и Я.Б. Файнберга (1949 г.), Г.В. Гордеева (1953 г.), А.А. Лугиной и Г.Я. Малышева (1955 г.), А.И. Ахиезера и Р.В. Головина (1956 г.) (кроме ссылок на работы по МТР [9, 11, 21]). К работам по термоядерному синтезу к моменту открытия Второй Женевской конференции уже подключились СКБ2МЭП (теперь НИИЭФА им. Ефремова), Украинский физико-технический институт, Сухумский физико-технический институт. В НИИЭФА построили установку «Альфа» (аналог английской ZETA), примерно в это же время начали работать в Сухуми, но серьезного опыта в области фи-

зики плазмы не было ни в одной из этих организаций. А вот в УФТИ он был, на Женеву были представлены три доклада: по теории высокочастотных колебаний; по экспериментам по электронному резонансу и волноводным свойствам плазмы, а также по изучению поведения плазмOIDов (плазменных сгустков) в неоднородном магнитном поле; по теории простых и ударных магнитогидродинамических волн.

Видно, что в 1951—1958 гг. практически все основные работы по термоядерному синтезу были выполнены в ИАЭ им. И.В. Курчатова. К концу 1987 г. в исследованиях по управляемому синтезу участвовали лаборатории более двадцати организаций. Правда, в некоторых из них работали в этой области по 2—3 теоретика, но и эксперименты на установках небольших и средних размеров велись примерно в десяти организациях. Эксперименты стали дорогими, стоимость средней установки выражается цифрой с семью нулями, а до коммерческого реактора еще далеко.

ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

Как отмечалось в обзоре «Физика плазмы в проблеме электромагнитного разделения изотопов», в связи с работами по управляемому термоядерному синтезу (УТС) ряд ведущих сотрудников отдела электроаппаратуры (ОЭА) вместе со своими коллективами переключились на эту новую тематику уже в 1951—1952 гг. Организационно они были оформлены в секторы Бюро электрических приборов (БЭП), входящего в состав ОЭА. Работы были особо секретными и велись в специально построенном небольшом здании. В 1957 г. было решено начать сооружение значительной по размерам (в масштабах того времени) установки «Огра», чему И.В. Курчатов придавал большое значение. Уже в феврале 1958 г. он освободил И.Н. Головина от обязанностей первого заместителя директора, назначил его начальником С-49, а затем «Объекта О» («Огра»), входящего в ОЭА (наверное, стоит отметить, что еще раньше в связи с тем, что И.Н. Головин занят особо важной научной работой, И.В. Курчатов поручил читать все приходящие на его имя бумаги В.В. Гончарову). В состав «Объекта О» были включены С-49 и С-53 (А.В. Честный). Созданы в нем свое КБ, мастерские, службы вакуума и электротехники и т.д. Все время шло усиление состава «Объекта О» приемом новых сотрудников, в основном переводами из других подразделений института; практиковали прикомандирование сотрудников на 2—3 месяца. В июне 1959 г. «Объект О» был выведен из ОЭА в прямое подчинение дирекции института.

Для экспериментальной проверки идей Г.И. Будкера по использованию стабилизированного релятивистского электронного пучка в ОЭА в 1957 г. была создана Лаборатория новых методов ускорения (ЛНМУ) в составе секторов Г.И. Будкера (С-36) и А.А. Наумова (С-32), весной 1958 г. начато сооружение установки Б-3. Но уже в апреле 1958 г. ряд сотрудников ЛНМУ были переведены в Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР (ИЯФ СО АН СССР), а в мае того же года член-корреспондент АН СССР Г.И. Будкер был выбран директором этого института, в связи с чем стал начальником ЛНМУ и С-36 «по совместительству, без оплаты». Постепенно в течение 1960—1962 гг. большинство сотрудников ЛНМУ реально переехали в Новосибирск, а оставшиеся переведены в другие секторы. ЛНМУ, составлявшая ядро ИЯФ, перестала существовать.

Описанные реорганизации в ОЭА почти не отразились на работе секторов БЭП и собственно ОЭА, но некоторые изменения в распределении работ произошли: в БЭП был переведен сектор В.М. Глаголева (С-48), образован новый сектор Д.А. Франк-Каменецкого (С-50); в ОЭА группа С.М. Нафтулина преобразована в сектор (С-31), ликвидирован сектор Б.А. Алексеева (С-39, химия изотопов). Секторы А.М. Андрианова (С-42), П.М. Морозова (С-37), Г.Я. Щепкина (С-38), группа В.С.П. Максимова активно включались в работы по электрореактивным двигателям: ионных с объемной ионизацией (С-37), ионных с поверхностной ионизацией (группа В), плазменных импульсных (С-42), плазменных стационарных (С-38). В БЭП строили новые установки, привлекая к их сооружению и мастерские собственно ОЭА. В марте 1958 г. за сооружение установок «Малый токамак» и ПР-2 премируются большие группы рабочих мастерских ОЭА и БЭП (следует отметить, что ПР-2 — установка, на которой был экспериментально доказан принцип Min B — M.P.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов А.М., Базилевская О.А., Брагинский С.И., Брежнев Б.Г., Ковальский И.Г., Подгорный И.М., Прохоров Ю.Г., Филиппов Н.В., Филиппов Т.Н., Хвоцинский С., Храброе В.А. Экспериментальное исследование импульсных разрядов при больших силах тока. — В кн: Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. — М.: Атомиздат, 1959, Докл. Сов. ученых (далее Доклады), т. 1, с. 31.
2. Веденов А.А., Волков Т.Ф., Рудаков Л.И., Сагдеев Р.З., Глаголев В.М., Елисеев Г.А., Хилиль В.В. Термоизоляция и удержание плазмы высокочастотным магнитным полем. — Доклады, т. 1, с. 143.
3. Арцимович Л.А. Исследования по управляемым термоядерным реакциям в СССР. — Доклады, т. 1, с. 5.
4. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 3.
5. Подгорный И.М., Чуватин С.А., Быков Г.А., Письменный В.Д. Исследование процесса электродинамического ускорения сгустков плазмы (II). — В сб.: Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций (далее Сборник), т. IV. — М.: Изд. АН СССР, 1958, с. 222.
6. Осовец С.М., Наседкин Ю.Ф., Павлов Е.И., Петров Ю.Ф., Щедрин Н.И. Плазменный виток в поперечном магнитном поле. — Доклады, т. 1, с. 65.
7. Долгов-Савельев Г.Г., Иванов Д.П., Мухоматов В.С., Разумова К.А., Стрелков В.С., Шепелев М.Н., Явлинский Н.А. Исследование устойчивости и нагрева плазмы в тороидальных камерах. — Доклады, т. 1, с. 85.
8. Шафранов В.Д. Об устойчивости плазменного шнура при наличии продольного магнитного поля и проводящего кожуха. — Сборник, т. II, с. 130.
9. Шафранов В.Д. Об устойчивости цилиндрического газового проводника в магнитном поле. — Атомная энергия, 1956, № 5, с. 38.
10. Брагинский С.И., Шафранов В.Д. К теории высокотемпературного плазменного шнура. — Доклады, т. 1, с. 221.
11. Безбатченко А.Л., Головин И.Н., Иванов Д.П., Кириллов В.Д., Явлинский Н.А. Исследование газового разряда с большой силой тока в продольном магнитном поле. — Атомная энергия, 1956, № 5, с. 26.
12. Кириллов В.Д. Измерение проводимости плазмы при длительном протекании тока. — Сборник, т. II, с. 212.
13. Безбатченко А.Л., Головин И.Н., Козлов П.И., Стрелков В.С., Явлинский Н.А. Безэлектродный разряд с большой силой тока в тороидальной камере с продольным магнитным полем. — Сборник, т. IV, с. 116.
14. Головин И.Н., Иванов Д.П., Кириллов В.Д., Петров Д.П., Разумова К.А., Ялинский Н.А. Устойчивый плазменный столб в продольном магнитном поле. — Доклады, т. 1, с. 120.

15. Будкер Г.И. Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками. К вопросу о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую (физические принципы и предварительные расчеты). — Сборник, т. III, с. 3.
16. Кадомцев Б.Б. Магнитные ловушки для плазмы. — Сборник, т. IV, с. 353.
17. Кадомцев Б.Б. О гидродинамике плазмы низкого давления. — Сборник, т. IV, с. 16.
18. Юшманов Е.Е. Радиальное распределение потенциала в цилиндрической магнитной ловушке при магнетронном способе инжекции ионов. — Сборник, т. IV, с. 235.
19. Арцимович Л.А., Андрианов А.М., Доброхотов Е.И., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Синицин В.И., Филиппов Н.В. Жесткое излучение импульсных разрядов. — Атомная энергия, 1956, № 3, с. 84.
20. Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М. Жесткое рентгеновское излучение, сопровождающее разряд в газе. — Атомная энергия, 1956, № 3, с. 97.
21. Арцимович Л.А., Андрианов А.М., Базилевская О.А., Прохоров Ю.Г., Филиппов Н.В. Исследование импульсных разрядов с большой силой тока. — Атомная энергия, 1956, № 3, с. 76.
22. Леонтович М.А., Осовец С.М. О механизме сжатия тока при быстром и мощном газовом разряде. — Атомная энергия, 1956, № 3, с. 81.
23. Лукьянов С.Ю., Синицин В.И. Спектроскопические исследования мощного импульсного разряда в водороде. — Атомная энергия, 1956, № 3, с. 88.
24. Подгорный И.М., Чуватин С.А. Рентгеновское излучение при мощном импульсном разряде в ксеноне. — ДАН СССР, 1957, т. 117, с. 795.
25. Лукьянов С.Ю., Синицин В.И. Спектроскопические исследования высокотемпературной плазмы. — Доклады, т. I, с. 99.
26. Андрианов А.М., Базилевская О.А., Прохоров Ю.Г. Исследование импульсного разряда в дейтерии при скоростях нарастания тока до 10^{12} и напряжениях до 120 кВ. — Сборник, т. IV, с. 182.
27. Филиппов Н.В. Исследование давлений в мощном импульсном газовом разряде с помощью пьезоэлектрического измерителя. — Сборник, т. III, с. 231.
28. Петров Д.П., Филиппов Н.В., Филиппова Т.И., Храбров В.А. Мощный импульсный газовый разряд в камерах с проводящими стенками. — Сборник, т. IV, с. 170.
29. Брагинский С.И., Мигдал А.Б. Процессы в плазменном столбе при быстром нарастании тока. — Сборник, т. II, с. 20.
30. Брагинский С.И., Гельфанд И.М., Федоренко Р.П. Теория сжатия и пульсаций плазменного столба в мощном импульсном разряде. — Сборник, т. IV, с. 201.
31. Комельков В.С., Скворцов Ю.В., Церевитинов С.С. Развитие мощного разряда в дейтерии. — Доклады, т. I, с. 53.
32. Осовец С.М. Плазменный виток в электромагнитном поле. — Сборник, т. II, с. 238.
33. Осовец С.М., Щедрин Н.И. Плазменный виток при наличии активного сопротивления. — Сборник, т. III, с. 196.
34. Наседкин Ю.Ф., Осовец С.М. Исследование мощного кольцевого газового разряда при наличии равновесной орбиты. — Сборник, т. III, с. 182.
35. Осовец С.М., Петров Ю.Ф., Щедрин Н.И. Исследование газового разряда в односвязной области. — Сборник, т. II, с. 242.
36. Наседкин Ю.Ф. Исследование кольцевого газового разряда в поперечном магнитном поле. — Сборник, т. II, с. 264.
37. Наседкин Ю.Ф., Павлов Е.И. Влияние формы магнитного поля на кольцевой газовый разряд. — Сборник, т. III, с. 214.
38. Лукьянов С.Ю., Синицин В.И. Спектроскопическое исследование мощного импульсного разряда в водороде. — ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 848.
39. Брагинский С.И., Шафранов В.Д. Плазменный шнур при наличии продольного магнитного поля. — Сборник, т. II, с. 26.
40. Комельков В.С. Движение плазмы мощных разрядов в собственном магнитном поле тока. — Доклады, т. I, с. 133.
41. Андрианов А.М., Базилевская О.А., Прохоров Ю.Г. Исследование импульсных разрядов в газах при силе тока 500 кА. — Сборник, т. II, с. 185.
42. Борзунов Н.А., Орлинский Д.В., Осовец С.М. Исследование мощного импульсного разряда в газах с помощью скоростной фотосъемки. — Атомная энергия, 1958, № 4, с. 149.

43. Сагдеев Р.З. Об удержании плазмы давлением стоячей электромагнитной волной. — Сборник, т. III, с. 346.
44. Сагдеев Р.З., Кадомцев Б.Б., Рудаков Л.Н., Веденов А.А. Динамика разреженной плазмы в магнитном поле. — Доклады, т. I, с. 152.
45. Беляев С.Т. Кинетическое уравнение для разреженных газов в сильных полях. — Сборник, т. III, с. 50.
46. Боголюбов Н.Н., Зубарев Д.Н. Метод асимптотического приближения для систем с вращающейся фазой и его применение к движению заряженных частиц в магнитном поле. — Укр. матем. журн., 1956, т. VII.
47. Будкер Г.И. Бетатронный метод разогрева плазмы до высоких температур. — Сборник, т. I, с. 122.
48. Сагдеев Р.З., Веденов А.А. О возможном механизме инжекции в атмосферах звезд. — В кн.: Вопросы космологии. 1989.
49. Трубников Б.А., Кудрявцев В.С. Излучение плазмы в магнитном поле. — Доклады, т. I, с. 165.
50. Трубников Б.А., Бажанова А.Е. Магнитное излучение слоя плазмы. — Сборник, т. III, с. 121.
51. Трубников Б.А. Излучение плазмы в магнитном поле. — ДАН СССР, 1958, т. 118, № 5.
52. Кудрявцев В.С. Функции распределения электронов в плазме, находящейся в магнитном поле. — Сборник, т. III, с. 114.
53. Кадомцев Б.Б., Брагинский С.И. Стабилизация плазмы с помощью неоднородных магнитных полей. — Доклады, т. I, с. 175.
54. Брагинский С.И., Кадомцев Б.Б. Стабилизация плазмы с помощью охраняющих проводников. — Сборник, т. III, с. 300.
55. Кадомцев Б.Б. Магнитные ловушки с «гофрированным» полем. — Сборник, т. III, с. 285.
56. Сагдеев Р.З., Шафранов В.Д. Поглощение энергии высокочастотного электромагнитного поля в высокотемпературной плазме. — Доклады, т. I, с. 202.
57. Шафранов В.Д. Распространение электромагнитного поля в среде с пространственной дисперсией. — ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 1475.
58. Шафранов В.Д. К выводу тензора диэлектрической проницаемости плазмы. — Сборник, т. IV, с. 416.
59. Сагдеев Р.З. О поглощении электромагнитной волны, распространяющейся вдоль постоянного магнитного поля в плазме. — Сборник, т. IV, с. 422.
60. Шафранов В.Д. Показатель преломления плазмы в магнитном поле в области ионного циклотронного резонанса. — Сборник, т. IV, с. 426.
61. Брагинский С.И., Казанцев А.П. Магнитогидродинамические волны в разреженной плазме. — Сборник, т. IV, с. 24.
62. Брагинский С.И. О поведении полностью ионизованной плазмы в сильном магнитном поле. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 645.
63. Брагинский С.И. О типах колебаний плазмы в магнитном поле. — ДАН СССР, 1957, т. 115, с. 475.
64. Брагинский С.И. Явление переноса в полностью ионизованной двухтемпературной плазме. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 459.
65. Шафранов В.Д. О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 710.
66. Брагинский С.И. Стягивание плазмы под действием собственного магнитного поля. — Сборник, т. I, с. 115.
67. Брагинский С.И. Потоки частиц и тепла поперек сильного магнитного поля в полностью ионизованной двухтемпературной плазме. — Сборник, т. I, с. 178.
68. Брагинский С.И. Исследование осевой области плазменного шнура. — Сборник, т. I, с. 229.
69. Шафранов В.Д. Об устойчивости плазменного шнура с распределенным током. — Сборник, т. IV, с. 61.
70. Галицкий В.М., Мигдал А.Б. Диэлектрическая постоянная высокотемпературной замагниченной плазмы и оценка лучистой теплопроводности. — Сборник, т. I, с. 161.
71. Леонтович М.А., Шафранов В.Д. Об устойчивости гибкого провода в продольном магнитном поле. — Сборник, т. I, с. 207.
72. Леонтович М.А. Магнитное поле линейного тока, окруженного идеально проводящим цилиндром с разъемом. — Сборник, т. I, с. 222.
73. Трубников Б.А. О неустойчивости цилиндра плазмы. — Сборник, т. I, с. 289.
74. Зубарев Д.Н., Климов В.И. Стационарные режимы магнитного термоядерного реактора. — Сборник, т. I, с. 249.

75. **Арцимович Л.А.** О прохождении больших токов через плазму при наличии продольного магнитного поля. — Сборник, т. II, с. 81.
76. **Арцимович Л.А.** Магнитный поток в сжимающемся цилиндре. — Сборник, т. II, с. 87.
77. **Коган В.И.** О выходе термоядерных реакций. — Сборник, т. II, с. 109.
78. **Будкер Г.И.** Некоторые вопросы, связанные с пространственной устойчивостью кольцевого тока в плазме. — Сборник, т. III, с. 32.
79. **Полуектов-Николадзе Н.М.** К расчетам квазистационарного электромагнитного поля в системе с тороидальной симметрией. — Сборник, т. IV, с. 70.
80. **Леонтович А.М.** О силах, действующих на прямолинейный ток, находящийся внутри проводящей цилиндрической трубы. — Сборник, т. I, с. 110.
81. **Давыдов Б.И.** О влиянии колебаний плазмы на ее электропроводность и теплопроводность. — Сборник, т. I, с. 77.
82. **Брагинский С.И., Шафранов В.Д.** Плазменный шнур с потерей тепла на электроды. — Сборник, т. II, с. 3.
83. **Taylor R.J.** Proc. Phys. Soc., 1957, vol. B70, p. 1049.
84. **Rosenbluth M.M.** — In.: Proc. 3rd Intern. Conf. Ionisation Phenomene in Cases. — Venice, 1957.
85. **Будкер Г.И.** Релятивистский стабилизированный электронный пучок. — Атомная энергия, 1956, № 5, с. 9.
86. **Тамм И.Е.** Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. 1. — Сборник, т. I, с. 3.
87. **Сахаров А.Д.** Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. II. — Сборник, т. I, с. 20.
88. **Тамм И.Е.** Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. III. — Сборник, т. I, с. 21.
89. **Зубарев Д.Н., Климов В.Н.** К теории температурного скачка на границе плазмы в магнитном поле. — Сборник, т. I, с. 138.
90. **Андерсон О. и др.** — В кн.: Тр. III Междунар. конф. по газовому разряду (Венеция), 1957.
91. **Андрианов А.М., Базилевская О.А., Лукьянов С.Ю., Осовец С.М., Петров Ю.Ф., Подгорный И.М., Явлинский Н.А.** Исследование нагревания водородной плазмы в малых тороидальных системах. — Сборник, т. I, с. 42.
92. **Синельников К.Д. и др.** Экспериментальные исследования электронного резонанса и волноводных свойств плазмы. Исследование плазменных сгустков. — Доклады, т. 1, с. 110.
93. **Курчатов И.В.** О возможности создания термоядерных реакций в газовом разряде. — Атомная энергия, 1956, № 3, с. 5.
94. **Комельков В.С., Синицин В.И.** Пьезоэлектрический метод исследования, мощного газового разряда. — Сборник, т. I, с. 234.
95. **Комельков В.С., Парфенов Д.С.** Расширение канала искры в воздухе при токах около $2 \cdot 10^6$ А — ДАН СССР, 1956, т. III, с. 1215.
96. **Давыдов Б.И.** О зажигании безэлектродного разряда. — Сборник, т. I, с. 89.
97. **Осовец С.М.** Об удержании плазмы бегущим магнитным полем. — Сборник, т. IV, с. 3.
98. **Коган В.И.** Уширение спектральных линий в высокотемпературной плазме. — Сборник, т. IV, с. 258.
99. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** О гашении колебаний плазменного шнура. — Сборник, т. IV, с. 391.

(Продолжение следует)