

**ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ИАЭ им. И.В. КУРЧАТОВА ЗА 1963—1965 гг.**

М.К. Романовский
Обзор¹

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1962—1965 гг. шло бурное развитие физики плазмы и не только физики высокотемпературной плазмы. Развивались работы по электрореактивным двигателям (ЭРД), химии плазмы, взаимодействию плазмы с твердым телом, электрическому разряду, диагностике плазмы. В ИАЭ основное внимание было сосредоточено

¹ Продолжение. Начало обзора в ВАНТе. Сер. Термоядерный синтез, 2002—2004 гг., вып. 1—3, 2005 г.

на термоядерных исследованиях и ЭРД, а электрическими разрядами, плазмохимией почти не занимались (хотя отдельные работы были). В 1962 г. в Париже состоялась 6-я Международная конференция по ионизационным явлениям в газах, труды конференции составили четыре толстых тома, напечатанных мелким (мельче газетного!) шрифтом. Наш институт представил семь докладов (четыре теоретические работы, две экспериментальные и одна по диагностике [1—7]).

В 1964 г. состоялась 3-я Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. На ней был представлен один обзорный доклад Л.А. Арцимовича [8]. В нем дано по необходимости краткое (время доклада строго ограничено. — Прим. М.Р.¹) изложение основных результатов работ по управляемому термоядерному синтезу в СССР с 1958 г. до лета 1964 г. и фактически только перечислены работы по физике высокотемпературной плазмы и организации, где они в то время проводились. Описаны опыты на «Огре-1» с диссоциацией H_2^+ на остаточном газе, переход на диссоциацию на литиевой дуге и отмечено, что при работе на дуге поднялась плотность плазмы до $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ и исчезли колебания, характерные для желобковой неустойчивости. Сравнительно подробно описаны работы на ловушках с комбинированными магнитными полями (даже есть осциллограмма и графики, полученные на ПР-5), описана «Огра-2» и дано фото установки (но результатов нет). Приведена схема «Токамак», отмечено отличие от «Зеты», описано применение управляющих витков и приведены осциллограммы напряжения на обходе, тока и интерферограммы в устойчивом режиме. Довольно много внимания уделено взаимодействию ВЧ- и СВЧ-полей с плазмой (стабилизация, нагрев). Описан метод турбулентного нагрева, приведены полученные результаты и сказано: «...Метод очень перспективен».

При изложении работ автор называл организации, где именно они проводились: ИАЭ, ЛФТИ, ХФТИ, СФТИ, Радиотехнический институт, МГУ, ИЯФ СО АН СССР.

В том же 1964 г., но несколько позже (в октябре), состоялся семинар по физике плазмы в Триесте (Албания), организованный Интернациональным центром теоретической физики. Интересно, что во введении в «Физику плазмы» (издание докладов на семинаре) указаны как две первые задачи: «довести предмет до студентов, главным образом из развивающихся стран...» и «ввести молодых исследователей в эту область больших проблем и способов их решения», а в списке участников — представители США, Англии, Италии, Франции, ФРГ, Австрии, Индии, Дании, Японии, Бельгии, Швеции, Канады, Чехословакии, т.е. стран, где велись (в том или ином объеме, но велись!) исследования по физике высокотемпературной и астрофизической плазмы. Правда, был один представитель Южной Африки, но докладов из этой страны не было. Так что семинар успешно выполнил только третий пункт: предоставить возможность провести коллоквиум среди экспертов. С докладами выступили 19 человек, в том числе из СССР: М.С. Иоффе, Б.Б. Кадомцев, Р.З. Сагдеев [9—12]. Просто участников семинара (не докладчиков) из СССР не было.

Большой доклад М.С. Иоффе [9] — 28 страниц, по существу, лекция, в которой автор дал основные сведения о пробкотронах, рассмотрел характерные для них неустойчивости (привел таблицу с параметрами 11 таких установок с указанием типов наблю-

¹ М.Р. — Михаил Романовский.

даемых на них неустойчивостей), рассказал об установках с гибридными магнитными полями $\text{Min } B$, описал установку ПР-5 и довольно детально рассказал об измерениях времени жизни плазмы и ее зависимости от различных параметров [13, 14]. Доклад Б.Б. Кадомцева [10] содержит: 1. Введение, 2. Тепловые флуктуации в плазме, 3. Кинетическое уравнение для волн, 4. Взаимодействие частиц с волнами, 5. Нелинейное взаимодействие ленгмюровских и ионно-звуковых волн, 6. Аппроксимация слабых связей, 7. Полуэмпирические приближения. Автор работ [11, 12] Р.З. Сагдеев перешел из ИАЭ в ИЯФ СО АН СССР, поэтому его доклады можно не рассматривать.

В 1965 г. в Белграде (Югославия) состоялась 7-я конференция по ионизационным явлениям в газах. Она была первой конференцией, на которую кроме официальной делегации выехала и большая группа «научных туристов» от Государственного комитета по использованию атомной энергии (ГК АЭ СССР)², всего, вместе с туристами АН СССР, более 60 человек. Статус «научных туристов» мало отличался от статуса делегатов — одинаково участвовали в заседаниях, делали доклады и т.д. Всего разные учреждения СССР представили около 70 докладов, ИАЭ представил 19 докладов [15—33], в том числе девять теоретических работ (из них одна — обзор), девять экспериментальных и одна по диагностике. Вероятно, следует отметить, что нет ни одной работы по изучению нагрева и удержания плазмы в адиабатических ловушках, тороидальных системах (кроме, пожалуй, работы [19]), наиболее активно исследуемых с целью создания условий для получения управляемой термоядерной реакции. Видимо, такие работы «придержали» для 2-й конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: было известно, что она состоится в этом же году в Калэме (Англия).

В Калэме была весьма представительная конференция (представлены 26 стран и три международных организации, в ее работе участвовали 268 человек). На эту конференцию выехала группа «научных туристов» из ГК АЭ, и это было в последний раз — больше «научных туристов» наше ведомство не посылало, несмотря на все ходатайства. ИАЭ представил 17 докладов, а Б.Б. Кадомцев сделал еще обзор по всем представленным теоретическим работам [34—52].

Работы, представленные на конференцию в Париже, рассматривать не будем, так как большинство из них нашло отражение в позже опубликованных статьях, а ссылок на них очень немного. Работы, представленные на конференцию в Белграде, рассмотрим в конце обзора, перед работами, представленными на конференцию в Калэме. Это даст единое представление о том, с чем ИАЭ вышел на эту конференцию. Нужно отметить, что конференция в Белграде была в конце августа, а конференция в Калэме — в сентябре.

С 1963 г. начал выходить сборник «Вопросы теории плазмы» под редакцией академика М.А. Леонтовича, в котором до 1965 г. было опубликовано 16 работ сотрудников ИАЭ [53—68].

За период от конференции в Зальцбурге (1962 г.) до конференции в Калэме (1965 г.) сотрудниками ИАЭ только в пяти ведущих журналах (ЖЭТФ, ЖТФ, «Атомная энергия», ДАН, «Ядерный синтез») было опубликовано более 260 статей. Отдельные статьи публиковались и в других журналах («Теплофизика высоких

² ИАЭ формально входил в АН СССР, но выезды за рубеж оформлял ГК АЭ СССР.

температур», «Успехи физических наук», «Приборы и техника эксперимента»), но все, кроме обзора в УФН, были по физике низкотемпературной плазмы или диагностике, а не по управляемому термоядерному синтезу. Так что за этот период число опубликованных работ (статей, докладов) превысило 340. Это не считая препринтов, а их выходило 9—16 за год, которые учитывались как научные работы (наравне с закрытыми отчетами), но в то время не считались публикацией: на некоторых даже печатали, что препринт «предназначен для публикации» и ссылаться на него можно только с разрешения авторов. Правда, большая часть препринтов была опубликована в виде статей, иногда заметно переработанных и расширенных, а те, которые авторы не захотели опубликовать, вероятно, не следует рассматривать.

Следует отметить, что с 1963 г. начал выходить отдельными выпусками журнал «Физика плазмы — ускорители — термоядерные исследования», ранее бывший «часть С» «Журнала ядерной энергии». Публикаций оригинальных советских работ в нем сравнительно немного (да и то часто несколько измененные статьи из отечественных журналов), но с 1964 г. регулярно пошли переводы из журнала «Атомная энергия», а в 1965 г. уже остались почти одни переводы: в т. 7 (1965 г.) таких статей 14 (оригинальных нет), в т. 8 (1966 г.) 38 переводов и 2 оригинальных. Однако с 1967 г. переводов не стало, хотя оригинальных работ публиковали тоже немного.

Естественно, что дать более-менее развернутые аннотации всех работ (как это сделано в «Термоядерных исследованиях» за 1950—1958 гг. и 1958—1962 гг.) практически невозможно, да, вероятно, и нецелесообразно. Видимо, работы следует сгруппировать по направлениям (что далеко не всегда однозначно!) и, опираясь на обзорные статьи и доклады, выделить то, что привлекало в это время основное внимание ученых. Если судить по количеству публикаций, то наибольший интерес вызывали вопросы устойчивости и колебаний плазмы (в сумме 92 работы опубликованы в основных журналах, правда, главным образом теоретических). Затем идут работы по ловушкам и тороидальным системам (26 и 23 соответственно). Казалось бы, с этих работ и надо начать, тем более что в обзорных докладах на последней (в рассматриваемый период) Международной конференции (в Калэме, 1965 г.) и по экспериментальным (докладывал Спицер, США), и по теоретическим работам (докладывал Б.Б. Кадомцев, СССР) основное внимание было уделено этим же направлениям. Да и в четырех первых сборниках «Вопросы теории плазмы», вышедших до 1967 г., более половины посвящено рассмотрению устойчивости, колебаний, равновесия, переноса, причем в списках литературы встречаются одни и те же статьи (разумеется, среди многих других, не пересекающихся). И все же такие работы составляют около половины всех опубликованных, а как быть с остальными? Существенно увеличилось число теоретических работ общего характера, например, обзорных работ, посвященных дрейфовой теории движения частиц [53], столкновениям частиц в полностью ионизованной плазме [54], переносам в плазме [55], термодинамике плазмы [56], геометрии магнитного поля [57] и так далее, практически никак не привязанных к конкретным термоядерным установкам. Поэтому, вероятно, следует начать с рассмотрения некоторых общетеоретических работ, затем работ, посвященных вопросам определения (и рекомендаций), создания условий, необходимых для создания стационарного магнитного термоядерного реактора. Приняв, что процессы переноса классические (а наблюдаемые более быстрые отнести к

проявлениям турбулентных процессов), надо будет обеспечить равновесие и устойчивость плазмы. Вопросам переносов было посвящено довольно много работ в 1957—1958 гг. С.И. Брагинского и В.Д. Шафранова (например, [69—73], и особенно важна работа С.И. Брагинского [74]). В 1962 г. опубликована его же работа [55] (реально обзор), в 1965 г. работа В.Д. Шафранова [75] по теплопроводности в тороидальных системах и работа Петвиашвили и др. [76], причем последняя уже по электропроводности турбулентной плазмы. Видимо, работы [75] и [76] надо рассмотреть: [75] вместе с «торами», а [76] вместе с турбулентностью.

Особенно интересна и важна работа А.А. Галева и Р.З. Сагдеева [77], в которой было доказано, что «аномальная диффузия» поперек магнитного поля в тороидальных системах является классической и определяется особенностями движения «запертых» частиц. Предложенная авторами теория получила название «неоклассической», но это уже в 1967 г., да и авторы перешли в ИЯФ СО АН СССР.

2. ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

По существу, это обзорные работы (кроме, пожалуй, [56]), списки литературы содержат от 11 до 216 наименований источников (в основном более 30 в каждой статье) с четкой направленностью — приобщить к физике плазмы тех, кто начинает заниматься ею (или интересуется серьезно): в ряде статей даны задачи (например, работы [61] [63] и другие), в приложениях даны выводы использованных формул и т.д.

Сборник «Вопросы теории плазмы» открывается статьей Д.В. Сивухина [53], которая содержит § 1. **Движение заряженной частицы в постоянном и однородном магнитном поле** (получены постоянство полной энергии частицы, циклотронная частота ω , ларморовский радиус r , магнитный момент частицы μ); § 2. **Движение ведущего центра** (пояснено само понятие «ведущий центр», рассмотрены скорость его дрейфа в поле внешней не электрической силы F , в электрическом поле E , в неоднородном магнитном поле $\nabla B \neq 0$); § 3. **Происхождение дрейфов** (даны наглядные пояснения физической природы дрейфов); § 4. **О сглаживании и усреднении величин, содержащих быстро колеблющиеся слагаемые**; § 5. **Полная система уравнений движения в дрейфовом приближении** (показана адиабатическая инвариантность μ , получена продольная сила $\mu \nabla B$); § 6. **Более точная система уравнений движения в дрейфовом приближении**; § 7. **Вывод некоторых вспомогательных формул**; § 8. **Вывод последовательной системы уравнений движения в дрейфовом приближении**; § 9. **Другой подход к уравнению движения ведущего центра**; § 10. **Примеры** (пояснена физика адиабатической инвариантности величины $P_{\perp}/B = \text{const}$ при $\nabla B \neq 0$, принципа действия «пробкотрона», магнитного поля Земли как ловушки и др.); § 11. **Дрейфовые интегралы движения в постоянном электрическом и магнитном полях** (рассмотрены «трансляционная симметрия», «осевая симметрия», «винтовая симметрия»); § 12. **Теорема Лиувилля в дрейфовом приближении**; § 13. **Об обобщении дрейфовой теории на случай сильных поперечных электрических полей**. Работа [53] точно и аккуратно показывает возможности метода дрейфового приближения, весьма широко используемого в физике плазмы (библиография — 18 источников).

Работа Б.А. Трубникова [54] содержит три главы, разбитые на двадцать параграфов.

Глава I. **Пробные частицы в плазме:** § 1. **Сила «трения» при рассеянии в поле Кулона;** § 2. **«Кулоновский логарифм» и роль дальних пролетов;** § 3. **Средняя сила, действующая на частицу в плазме;** § 4. **Пробные частицы в плазме;** § 5. **Скорость изменения моментов;** § 6. **Особенности кулоновского взаимодействия. Введение потенциальных функций ψ и φ** (автор вводит «индивидуальные» потенциальные функции ψ и φ , относящиеся к частицам сорта β -полевых); § 7. **Использование сечений рассеяния** (вводит понятия сечений, показывает их связь с коэффициентами переносов, временами релаксации и т.д.).

Глава II. **Кинетическое уравнение для частиц с кулоновским взаимодействием:** § 8. **Движение частиц в фазовом пространстве** (пространство скоростей, а не импульсов); § 9. **Выражение для потока;** § 10. **Сила динамического трения и тензор диффузии;** § 11. **Кинетическое уравнение при кулоновском взаимодействии** (автор отмечает, что введенные функции ψ и φ «...не имеют какого-либо простого физического смысла, однако их наглядное истолкование не представляет труда», и дает это истолкование); § 12. **Кинетическое уравнение с учетом поляризации среды** (рассмотрены соотношения парных и множественных столкновений).

Глава III. **Кинетические явления в высокотемпературной плазме:** § 13. **Пробная частица в среде покоящихся бесконечно тяжелых полевых частиц;** § 14. **Решение кинетического уравнения для предыдущего случая «простейшее время релаксации»;** § 15. **Сферически-симметричное распределение полевых частиц** (частицы с конечной массой, одинаковой по величине скоростью V , направление скоростей сферически симметрично); § 16. **Явление «убегающих электронов»** (дано объяснение явления); § 17. **Максвелловское распределение полевых частиц. Времена релаксации;** § 18. **Плоский поток в равновесной плазме** (рассмотрены передача импульса, отклонение частиц и обмен энергией для разных соотношений энергий электронов и ионов); § 19. **Передача энергии** (более детально рассмотрена передача энергии); § 20. **Установление равновесия в двухкомпонентной плазме** (введено «время выравнивания температур» и показано, что разность температур убывает экспоненциально). Работа [54] написана простым, понятным языком, интересно использованы введенные автором потенциальные функции и электростатические аналогии (библиография — 23 источника).

Работа С.И. Брагинского [55] является развитием его же работы [74], содержит восемь параграфов: § 1. **Уравнение переноса** (получены уравнения непрерывности, переноса импульса, переноса энергии); § 2. **Уравнение переноса простой плазмы (сводка результатов)** (приведены коэффициенты электропроводности, теплопроводности, вязкости параллельно и перпендикулярно магнитному полю); § 3. **Кинетика простой плазмы;** § 4. **Кинетика простой плазмы (количественное рассмотрение)** (рассмотрены упрощение перекрестных столкновительных членов, уравнение для поправок, решение уравнений (4.12) и (4.15)³, симметрия кинетических коэффициентов); § 5. **Некоторые парадоксы;** § 6. **Гидродина-**

³ Номера уравнений см. в работе [55].

мическое описание плазмы (рассмотрены уравнение непрерывности и квазинейтральность, уравнения движения, закон Ома, уравнения переноса тепла и энергии); § 7. **Многокомпонентная плазма** (рассмотрены диффузия в тройной смеси, диффузия в слабо ионизованном газе; § 8. **Примеры** (рассмотрены пинч-эффект, магнитогидродинамические волны, затухание магнитогидродинамических волн (альфвеновская волна, быстрая магнитозвуковая волна, столкновения с нейтралами, столкновения между разными ионами)). Библиография — 39 источников.

Работа А.А. Веденова [56] посвящена статистической термодинамике плазмы и содержит три параграфа: § 1. **Классическая система с кулоновским взаимодействием** (приведены три задачи с решениями); § 2. **Квантовая система с кулоновским взаимодействием**; § 3. **Степень ионизации плазмы** (получена формула Саха). Библиографии нет.

В работе А.И. Морозова и Л.С. Соловьева [60] — введение, семь параграфов, двадцать пять подпараграфов: § 1. **Уравнения движения** (подпараграфы: **Интегралы уравнений движения, Исключения циклических координат, Оценка области движения частицы в электромагнитном поле, Условия абсолютного удержания частицы в адиабатической ловушке** (приведены две задачи с решениями)); § 2. **Движение заряженной частицы в постоянных однородных полях** (введен дрейф, но подробно он рассмотрен в § 3); § 3. **Движение частиц в дрейфовом приближении** (подпараграфы: **Постановка задачи, Вывод дрейфовых уравнений** (рассмотрено иначе, чем в работе [53]), **Интерпретация дрейфовых уравнений, Интегралы дрейфовых уравнений, Движение частиц в адиабатической ловушке** (рассмотрены поле «пробкотрона», гофрированная ловушка, параболическое оси u поле; выделены «пролетные» и «запертые» частицы), **Дрейфовая теория в случае сильного электрического поля** (вывод дрейфовых уравнений дан в Приложении), **Продольный адиабатический инвариант, Влияние излучений**; в конце § 3 даны три задачи с решениями; § 4. **Движение заряженных частиц в высокочастотном электромагнитном поле** (подпараграфы: **Высокочастотный потенциал, Движение частиц в ловушке с переменным полем**); в конце § 4 приведена задача с решением; § 5. **Усреднение уравнений движения по пространственному периоду поля** (подпараграфы: **Движение частиц в знакопеременном электростатическом поле, Движение частиц в знакопеременном магнитостатическом поле, Движение магнитного диполя в неоднородном магнитном поле**); в конце § 5 даны две задачи с решениями; § 6. **Движение частиц во вращающемся электромагнитном поле** (подпараграфы: **Общие соотношения, Случай однородного вращающегося поля, Движение частиц при наличии постоянного аксиально-симметричного поля**; § 7. **Движение частиц в тороидальных магнитостатических полях** (подпараграфы: **Понятие об абсолютной ловушке, Тороидальный дрейф, Примеры абсолютных ловушек** (рассмотрено движение в поле кольца с током, в тороидальном гофрированном магнитном поле)). В работе [60] есть пять приложений: **Метод усреднения** (дан вывод некоторых основных формул усреднения систем дифференциальных уравнений); **Вывод формулы (3.15). Дрейфовые уравнения**; **Вывод формулы (3.17). Обобщение дрейфовой теории на случай сильного электрического поля**; **Движение частиц в тороидальном магнитном поле в**

дрейфовом приближении; Об индукционном электрическом поле. Работа [60] явно может быть серьезным учебным пособием. Пониманию материала весьма помогают чертежи, всего их 30. Библиография — 31 источник.

Сравнительно короткая работа Т.Ф. Волкова [65] (16 страниц) посвящена методу гидродинамического описания бесстолкновительной плазмы. Исходя из кинетических уравнений без столкновительных членов, автор получает гидродинамические уравнения и отмечает, что в применении к газу они не имеют смысла, но в плазме существуют самосогласованные поля, заменяющие столкновения, связывающие частицы. Затем автор рассматривает замагниченную плазму, получает систему уравнений, описывающих поведение плазмы в сильном магнитном поле. (Интересно, что существенна анизотропия тензора давления, т.е. именно отсутствие столкновений. — Прим. М.Р.) Библиография — 11 источников.

В работе Д.В. Сивухина [67] рассмотрены кулоновские столкновения в полностью ионизованной плазме. Работа [67] содержит 19 параграфов: § 1. **Трудности теории кулоновских столкновений**; § 2. **Столкновение двух частиц** («столкновение» — если несущественно время, «взаимодействие» — если время надо учитывать); § 3. **Средние скорости изменения энергии и импульса пробной частицы в плазме**; § 4. **Дебаевское экранирование и дебаевский радиус**; § 5. **Вычисление кулоновского логарифма** (рассмотрено очень подробно); § 6. **Обмен энергией между пробной частицей и плазмой. Общие формулы**; § 7. **Критическая скорость и максимальная передача энергии** (рассмотрены все три случая возможных отношений массы полевых m и пробных m^* частиц: $m^*/m \gg 1$; $m^*/m \ll 1$; $m^*/m \approx 1$); § 8. **Относительная роль ионной и электронной компонент в обмене энергией плазмы с моноэнергетическим пучком невзаимодействующих частиц**; § 9. **Выравнивание температур в двухкомпонентной плазме**; § 10. **Изменение импульса пробной частицы, движущейся в плазме**; § 11. **Пробег быстрого иона в плазме** (подчеркнуто торможение на электронах); § 12. **Релаксационные времена и длины свободного пробега**; § 13. **Явление убегающих электронов**; § 14. **Уравнение Фоккера—Планка** (получено уравнение Фоккера—Планка); § 15. **Связь тензора диффузий и коэффициента динамического трения с функцией распределения. Кинетическое уравнение в форме Ландау**; § 16. **Тензор диффузии и коэффициент динамического трения при изотропном распределении полевых частиц в пространстве импульсов** (рассмотрены: первый случай — скорости v^* полевых частиц одного и того же типа одинаковы по абсолютной величине, но равномерно распределены по направлениям; второй случай — скорости электронов и ионов распределены по Максвеллу); § 17. **Применение кинетического уравнения к задаче об обмене энергиями между различными компонентами плазмы**; § 18. **Выход ионов из магнитной ловушки с магнитными пробками вследствие столкновений** (делается вывод о малой перспективности пробкотронов в качестве термоядерных реакторов); § 19. **О природе и устранении расходимостей в теории парных столкновений** (показана природа расходимостей в предположении о мгновенности столкновений, но учет времени столкновения практически не влияет на результат). Работа иллюстрирована 13 рисунками. Библиография — 23 источника.

Работа А.А. Веденова [78] является обзором по плазме твердых тел, хотя автор ее так не обозначил: использованы 61 зарубежная работа и 25 отечественных (в том числе четыре работы автора, из них три в соавторстве с Е.П. Велиховым, Л.И. Рудаковым, Ю.Б. Пономаренко). В работе [78] семь разделов: 1) **Колебания плазмы твердых тел** (показано, что в электронной плазме металлов могут существовать ленгмюровские колебания, а из сравнения с экспериментом следует, что у многих металлов эта плазма образована валентными электронами, в сильном магнитном поле в такой плазме могут распространяться спиральные волны, что подтверждает эксперимент; в нейтральной плазме полуметаллов и полупроводников могут еще существовать электронно-дырочные звуковые волны, а в магнитном поле — и альфвеновские, и магнитозвуковые волны; в заряженной плазме полупроводников возникает магнитоплазменный резонанс); 2) **Течения плазмы** (объяснен скачок потенциала в месте резкого изменения сечения металлического проводника; показано, что в зависимости от условий создания неравновесных концентраций носителей зарядов нейтральной плазмы она может быть как диамагнетиком, так и парамагнетиком); 3) **Устойчивость течений** (показано, что течения будут неустойчивыми (пучковая неустойчивость), если скорость относительного движения электронов и дырок будет больше суммы их тепловых (или фермиевских) скоростей; при пропускании сильного тока возникает пинч-эффект, в сильном продольном ($E \times H$) — винтовая неустойчивость); 4) **Взаимодействие колебаний решетки с плазмой** (рассмотрено взаимовлияние колебаний решетки (создающих переменные электрические поля) с плазмой, приводящее к изменению скорости звука, появлению аномалии на кривой дисперсии, усилению и генерации (или затуханию) звука, усилению (и генерации) магнитных возбуждений в ферромагнетиках, ферритах и т.д.); 5) **Взаимодействие волн** (рассмотрено кратко в довольно общем виде); 6) **Возникновение турбулентности в плазме твердых тел** (рассмотрены «мягкий» (ссылка на работу Л.Д. Ландау) и «жесткий» [79] режимы возникновения турбулентности; в опытах наблюдали оба режима); 7) **Задачи теории и эксперимента** (автор указывает на ряд интересных, но не ясных вопросов, целесообразность проверки некоторых соотношений, приведенных в [78]). Работе [78] уделено много внимания потому, что другие физики-плазменщики в ИАЭ плазмой твердых тел не занимались.

3. РАВНОВЕСИЕ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Равновесие плазмы в магнитном поле рассматривали в очень многих работах 1951—1958 гг., начиная с основополагающих работ И.Е. Тамма и А.Д. Сахарова [80—82]. Исследовали равновесие прямого шнура плазмы (работы [72, 83, 84] и др.), тороидального плазменного шнура (работы [69, 85, 86] и др.), токовых и бестоковых ловушек с различными конфигурациями магнитного поля (работы [71, 87—93] и др.). Однако интерес к этому вопросу остался большим, за 1963—1965 гг. было опубликовано (разумеется, только сотрудниками ИАЭ. — Прим. М.Р.) около двадцати работ. Следует отметить, что равновесие зависит как от токов, протекающих в плазме, так и от магнитных полей, создаваемых токами во внешних проводниках. Исследованием магнитных полей, создаваемых без токов в плазме, занимались в

ИАЭ А.И. Морозов и Л.С. Соловьев (работы [94—103]). В основном это работы по тороидальным магнитным поверхностям, многие проводили методами численного счета в сотрудничестве с работниками Института прикладной математики. Несколько выделяется работа тех же авторов [57] — она существенно шире, в большей степени является обзором, правда, в основном работ отечественных авторов (на зарубежных авторов есть всего четыре ссылки, хотя авторы и отмечают большое значение работы Л. Спитцера [104]). Авторы работы [57] начинают с общих замечаний и введения основных понятий (**силовые линии и магнитные трубки, удельный объем магнитной трубки, тороидальные магнитные поля** и т.д.), которыми далее и пользуются, рассматривая «поля с замкнутыми силовыми линиями» (§ 4), «прямое поле с винтовой симметрией» (§ 5), «устойчивость магнитного поля» (§ 6), «изгибание магнитного поля» (§ 7), «поле вблизи данной магнитной поверхности» (§ 8), «магнитное поле в окрестности особых точек и линий» (§ 9). Уже из этого видно, что авторами рассмотрен очень широкий круг возможных конфигураций магнитных полей. Чтению работы помогает большое число чертежей (59 рисунков). Похоже, что статья [57] охватила все известные в то время формы магнитных полей, их деформации и устойчивость. Более поздняя работа [103] несколько развивает работы тех же авторов, в ней проведен численный расчет внутренней сепаратрисы.

Вопросам равновесия плазмы с током в 1951—1962 гг. уделили много внимания Б.Б. Кадомцев, С.И. Брагинский и особенно В.Д. Шафранов (работы: [71, 72, 83, 89, 91—93, 105] и др.). В 1963—1965 гг. вышли работы В.Д. Шафранова [58, 106—113].

Работа [58] большая (38 страниц, девять параграфов), в известном смысле суммирует ранее опубликованные работы по равновесию токовых систем (список литературы — 39 наименований). В самом начале (§ 1. **Общие замечания**) автор подчеркивает, что «в настоящей работе рассматриваются только такие свойства равновесных конфигураций, которые вытекают из уравнений равновесия»; очень просто и наглядно доказывает, что простой кольцевой шнур плазмы не может удерживаться ни одним продольным магнитным полем (без тока в шнуре), ни одним током в шнуре без дополнительного магнитного поля. По существу, последнее положение автор математически строго доказывает в § 2. **Теорема вириала**. В § 3. **Некоторые свойства равновесных конфигураций** автор получает выражение $U = \oint dl/B = \text{const}$ и, отмечая, что впервые эту формулу получил Б.Б. Кадомцев [89] для магнитных поверхностей с замкнутыми силовыми линиями, распространяет применение ее на поверхности с незамкнутыми силовыми линиями. В этом же параграфе автор использует так называемые поверхностные величины, сохраняющие постоянство на каждой магнитной поверхности и являющиеся функциями друг друга при условии идеальности проводимости плазмы (т.е. для времени меньше скин-слоя. — Прим. М.Р.). В § 4. **Другая форма уравнения равновесия** автор путем иных, чем ранее, рассуждений и выкладок получает идентичное полученному в § 3 выражение для U и показывает, что U представляет собой «удельный объем» магнитного поля (отношение геометрического объема трубки dv к проходящему через нее магнитному потоку $d\Phi$): $U = \frac{dS}{dS} \frac{dl}{B} = \frac{dv}{d\Phi}$, где dS — площадь сечения трубки по нормали

к ней.) Далее автор доказывает невозможность создания осесимметричной равновесной конфигурации без продольного тока. В § 5. **Вариационный принцип** автор показывает, что условия равновесия можно получить из требования, чтобы вариации некоторого функционала Q обращались в ноль. Выбрав некоторые значения Q при определенных (для каждого значения Q своих) дополнительных условиях, автор показывает, что первая вариация $\delta Q = 0$ определяет равновесие, а вторая $\delta^2 Q$ позволяет определить устойчивость данного равновесного состояния (интересно, что при второй вариации нужно учитывать реальные физические условия возможности отклонения, тогда как для первой вариации это несущественно. — Прим. М.Р.). В качестве примера использования вариационного принципа автор применяет его к тонкому тороидальному шнуру. В § 6. **Равновесие в некоторых конкретных системах** автор подробно рассматривает равновесие в токовых системах с тороидальной симметрией (типа «Токамак» и «Зета»).

Существенно, что автор получает ряд формул, содержащих величины, доступные для экспериментальных измерений (баланс давлений, величину смещения плазменного шнура относительно кожуха, время удержания и другие), хотя и оговаривает, что при изменении давления, силы тока, его распределения по сечению шнура изменяется величина смещения, «что является одним из серьезных недостатков тороидальной системы с токовым удержанием», и высказывает предложение об автоматическом регулировании величины внешнего поля для ликвидации этого недостатка. В конце § 6 автор указывает, что для систем типа стелларатор и систем с гофрированными полями аналогичные расчеты громоздки из-за сложности магнитных полей, и приводит соответствующие кривые из работы Грина и Джонсона для «трехзаходного» тороидального поля.

В коротком § 7. **Гидродинамическая аналогия равновесных конфигураций** автор показывает, что «каждая равновесная конфигурация имеет аналог в виде некоторого стационарного течения несжимаемой жидкости. В § 8. **Диффузия и дрейфы в равновесной конфигурации** автор отмечает, что исходные уравнения магнитной гидростатики, ранее использованные для описания равновесия, дают приближенные решения, так как не учитывают дрейфовые и диффузионные движения плазмы, если ее гидродинамическая скорость равна нулю. Используя обобщенный закон Ома из работы [55] и уравнение баланса тепла, автор получает выражение для суммарного потока плазмы, проходящего через поверхность, $P = \text{const}$ (P — давление), и показывает, что возможны условия, когда такой поток может быть равен нулю (например, в тонком тороидальном шнуре потоки замыкаются внутри сечения шнура. — Прим. М.Р.). Затем автор рассматривает нестационарные условия. В заключение § 8 автор отмечает, что «...закон Ома и полученные из него выводы имеют более ограниченную область применимости, чем уравнение равновесия».

§ 9. **О равновесии плазмы с неизотропным давлением** посвящен вопросам удержания плазмы в течение времени, малом по сравнению с временем кулоновских столкновений. Так как законы движения плазмы вдоль и поперек магнитного поля различны, то на какое-то время могут установиться разные давления P : $P_{\perp} \neq P_{\parallel}$. Автор показывает, что в этом случае в областях, где есть градиент напряженности магнитного поля, возникает сила, действующая вдоль силовых линий, поэтому для

неизотропной плазмы нет необходимости в создании конфигураций с тороидальными магнитными поверхностями, и приводит пример такой конфигурации (по существу, поле идеализированной адиабатической зеркальной ловушки. — Прим. М.Р.). Автор отмечает: «Центр тяжести проблемы удержания переносится не на условия равновесия, а на кинетику зарядов в магнитном поле, которая определяет реальное отношение между p_{\perp} и p_{\parallel} и распределение давлений в конфигурации».

Наверно, стоит отдельно отметить работу [106]. Дело в том, что в это время в ряде экспериментов на токамаках и стеллараторах наблюдался в тороидальных системах уход плазмы на наружные стенки, существенно более быстрый, чем предсказывала классическая теория. Естественно, что теоретики искали объяснения, и Ю.В. Вандакуров опубликовал работу [114], где утверждал, что в тороидальных системах с более сильным продольным магнитным полем, чем поле тока, возникает смещение плазмы к наружной стенке со скоростью, обратно пропорциональной проводимости плазмы и большому радиусу тора, т.е. стационарного состояния нет. В работе [106] было доказано, что дрейфовые потоки замыкаются внутри плазмы, стационарное состояние существует и объяснять «аномальные» потери только наличием дрейфов неправильно. Точку над i поставила работа [77] только в 1967 г.!

В работе [107] автор получил формулы для тороидальных поправок (искажений, связанных с тороидальностью. — Прим. М.Р.) к распределению магнитного поля, плотности тока и давления плазмы в тороидальном плазменном шнуре в первом приближении по ρ/R (ρ и R — малый и большой радиусы тора соответственно). Автор широко использует полученный им в работе [92] коэффициент асимметрии магнитного поля $\Lambda(\rho)$, а для системы типа «левитрон» (тороидальный плазменный шнур с твердым проводящим сердечником, здесь без проводящего кожуха, изучали в США. — Прим. М.Р.) получает $\Lambda(\rho)$ в более общем виде.

Работы [108 и 109] посвящены одному вопросу — равновесию плазменного шнура, не обладающего осевой симметрией. В работе [108] определено равновесное положение круглого шнура плазмы в идеально проводящем кожухе, когда ось шнура (или кожуха) является пространственной кривой, а граница шнура резкая (нет объемных токов ни в шнуре, ни вне его. — Прим. М.Р.). Рассмотрено искажение плазменного шнура щелями в проводящем кожухе.

В работе [109] автор произвел расчет смещения плазменного шнура с резкой границей, удерживаемой в равновесии продольным магнитным полем, в тороидальных камерах, имеющих форму восьмерок, составленных из дуг окружности и прямых участков; получил зависимость величины смещения шнура круглого сечения от давления плазмы. Во второй части этой работы рассмотрен шнур с распределенным током и получено уравнение для смещения магнитных поверхностей с заданным радиусом сечения. Расчеты показали, что в системах типа восьмерки условия равновесия допускают давление плазмы 3—5% от давления магнитного поля.

Работа [112] развивает работы [108 и 109] на случай, когда камера (соленоид) не является идеально проводящей, т.е. когда конфигурация магнитного поля определяется заданным распределением тока на проводящих поверхностях, а не их положением. Показано, что существует критическое давление плазмы, при повыше-

нии которого тороидальные поверхности отсутствуют и удержание плазмы в принципе невозможно.

В работах [110 и 111] рассмотрен один и тот же вопрос — удержание плазмы в тороидальных системах с помощью проводящих диафрагм. В работе [110] получено выражение, определяющее смещение шнура в экваториальной плоскости токамака при наличии такой диафрагмы. В работе [111] в предположении постоянства давления по сечению шнура получено уточненное выражение для смещения и определено максимальное значение $\beta_m = 8\pi\rho/B^2$ в зависимости от радиуса шнура a (отверстие в диафрагме), радиуса сечения камеры b и радиуса самой камеры R (камера непроводящая).

В работе [113] рассмотрен баланс давлений плазмы и магнитного поля и показано, что поправки на тороидальность поля даже для крутых торов не превышают 5%.

В работе А.И. Морозова и Л.С. Соловьева [115] показано, что в тороидальных магнитных полях, представляемых в виде вложенных магнитных поверхностей, наличие произвольно малых статических возмущений приводит к конечным изменениям плазменных конфигураций. В системе с распределенными токами это приводит к расщеплению магнитных поверхностей и образованию волокон или к тому, что при наличии сколь угодно малых возмущений поля появляются области, где первые производные давления и тока по радиусу обращаются в ноль, что существенно для устойчивости. В частности, процесс развития неустойчивости может привести к образованию устойчивости волокнистой структуры.

4. КОЛЕБАНИЯ, ВОЛНЫ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Как уже отмечалось, разделение этих вопросов крайне трудно (если не невозможно). Предприняв попытку это сделать, автор убедился, что неоднократно приходится в разделе **Колебания** писать о «неустойчивостях», и наоборот. Получается чисто условное разделение... Интерес к неустойчивости и колебаниям возрастал по мере развития и теоретических, и экспериментальных работ. Уже в работе [81] выделен § 5. **Проблема плазменной неустойчивости**, кончающийся словами: «...В настоящее время проблема только поставлена». Первой работой о колебаниях и влиянии их на теплопроводность и электропроводность была работа [116] (обе работы — 1951 г. — Прим. М.Р.). К концу 1958 г. было опубликовано уже 36 работ сотрудников ИАЭ по колебаниям, волнам и неустойчивости, а к концу 1962 г. — еще более 40, в том числе обзор работ по устойчивости [117]. К 2-й конференции по управляемому синтезу (Калэм, 1965 г.) сотрудники ИАЭ опубликовали по этому направлению еще более 90 работ, причем ряд из них являются обзорами, хотя и не называются так (например, [10, 59, 61, 62] и др.).

К этому времени уже установилось разделение неустойчивости плазмы на гидромагнитные (гидродинамические), связанные с перемещением макроскопических участков плазмы, и кинетические, обусловленные существенным различием движения групп частиц, находящихся в одном объеме. Но и те, и другие часто связаны с возникновением и развитием различных колебаний, хотя и не всегда колебания приводят к неустойчивости. Видимо, следует все же начать с некоторых обзорных работ, хотя это немного нарушит хронологию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов В.А., Коган В.И.** Резонансный перенос излучения в разреженной плазме. — В кн.: Труды 6-й Международной конференции по ионизационным явлениям в газах. — Париж, 1963, т. III, с. 419.
2. **Абрамов В.А., Тарасов Ю.А.** Неравновесное состояние аргоно-цезиевой плазмы. — Там же, с. 423.
3. **Велихов Е.П., Дыхне А.М.** Турбулентция плазмы, создаваемая ионизационной неустойчивостью в сильном магнитном поле. — Там же, т. IV, с. 511.
4. **Коган В.И.** Об обобщении теории Хольцмарка, учитывающем тепловое движение ушряющих ионов. — Там же, т. III, с. 415.
5. **Аретов Г.Н., Комельков В.С., Пергамент М.И., Церевитинов С.С., Васильев В.И.** Структура плазматидов коаксиального инжектора. — Там же, т. IV, с. 273.
6. **Грошев А.Л., Кузнецов В.В., Малахов Н.Р., Семашко Н.Н.** Источник водородных ионов для зеркальной ловушки Огра. — Там же, с. 273.
7. **Кудрин Л.П., Шолин Г.В.** Новые методы диагностики плазмы путем использования данных спектроскопии. — Там же, т. III, с. 433.
8. **Арцимович Л.А.** Исследование по проблеме управляемого термоядерного синтеза и физике высокотемпературной плазмы в СССР. Доклад на Третьей международной конференции по мирному использованию атомной энергии (1964 г.). — Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 4, с. 269.
9. **Иоффе М.С.** Магнитные ловушки. — Физика плазмы, с. 449; в кн.: Труды семинара в Триесте (1964). — Вена: АЕА, 1965.
10. **Кадомцев Б.Б.** Турбулентность плазмы. — Там же, с. 543.
11. **Сагдеев Р.З.** Затухание Ландау и конечная проводимость неустойчивой плазмы. — Там же, с. 555.
12. **Сагдеев Р.З.** Асимптотические методы в гидромагнитной теории устойчивости. — Там же, с. 625. (В сноске отмечено, что работа выполнена Г.М. Заславским, С.С. Моисеевым и Р.З. Сагдеевым.)
13. **Байбородов Ю.Т., Иоффе М.С., Петров В.М., Соболев Р.И.** Адиабатическая ловушка с комбинированным магнитным полем. — Атомная энергия, 1963, т. 14, вып. 5, с. 443.
14. **Иоффе М.С., Соболев Р.И.** Удержание плазмы в ловушке с комбинированным магнитным полем. — Там же, 1964, т. 17, вып. 5, с. 366.
15. **Велихов Е.П., Дыхне А.М.** Волна неравновесной ионизации в газе. — В кн.: Труды 7-й Международной конференции по ионизационным явлениям в газах. — Белград, 1965, т. II, с. 43.
16. **Коган В.И., Чашечкин Ю.Д.** О влиянии примеси многозарядных ионов на температуру дейтериевой плазмы. — Там же, с. 109.
17. **Васильев В.И., Комельков В.С., Церевитинов С.С.** Прохождение плазменных сгустков через магнитное поле. — Там же, с. 166.
18. **Мазитов Р.К., Фридман А.М.** Затухание плазменных колебаний в магнитном поле. — Там же, с. 427.
19. **Кован И.А., Козоровецкий М.Л., Русанов В.Д., Смирнов В.П., Титов А.В.** Турбулентный нагрев плазмы в тороидальных ловушках и исследование косых магнитозвуковых волн большой амплитуды. — Там же, с. 481.
20. **Абрамов В.А., Коган В.И.** О теории радиационных потерь в неравновесной плазме. — Там же, с. 603.
21. **Кадомцев Б.Б.** Неустойчивости плазмы. — Там же, с. 610.
22. **Недоспасов А.В., Соболев С.С.** Положительный столб тлеющего разряда в магнитном поле. — Там же, с. 633.
23. **Незлин М.В., Солнцев А.М.** О неустойчивости плазменного пучка в продольном магнитном поле. — Там же, с. 658.
24. **Незлин М.В., Сапожников Г.Н., Солнцев А.М.** Продольные колебания электронов в ограниченно электронном пучке, проходящем через разреженный газ. — Там же, с. 658.
25. **Велихов Е.П., Дыхне А.М., Шипук И.Я.** Ионизационная неустойчивость плазмы с горячими электронами. — Там же, с. 675.
26. **Загородников С.П., Смолкин Г.Е., Шолин Г.В.** Ионизация ударной волной в разреженной плазме. — Там же, с. 791.
27. **Колесников Ю.В., Филиппов Н.В., Филиппова Т.И.** Динамика плазменной оболочки нецилиндрического z -пинча на стадии, предшествующей кумуляции. — Там же, с. 833.
28. **Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П.** Зондирование плазмы электромагнитными волнами. — Там же, с. 116.

29. **Подгорный И.М., Шолин Г.В.** Измерение температуры электронов плазмы низкой концентрации по относительной интенсивности спектральных линий. — Там же, с. 178.
30. **Аретов Г.Н., Пергамент М.И., Степаненко М.М., Ярославский А.И.** Структура и генерация плазменных сгустков в коаксиальном инжекторе с улучшенными электротехническими параметрами и вакуумными условиями. — Там же, с. 289.
31. **Артеменков Л., Клочков И., Кузнецов В., Кулешов В., Малахов Н., Мухин П., Панов Д., Свечков В., Семашко Н.** Инжектор быстрых атомов водорода. — Там же, с. 294.
32. **Азизов Э., Комельков В., Скворцов Ю., Терещенко В.** Некоторые характеристики каскадных импульсных ускорителей плазмы. — Там же, с. 306.
33. **Коган В.И.** О нагреве плотной среды гигантским лазерным импульсом. — Там же, с. 395.
34. **Кадомцев Б.Б.** Исследования в области управляемого термоядерного синтеза. Обзор теоретических изысканий. Доклад на конференции в Калэме (1965). — Физика плазмы и исследования в области управляемого термоядерного синтеза. — Вена: АЕА, 1966, т. I, с. 25.
35. **Готт Ю.В., Иоффе М.С., Юшманов Е.Е.** Накопление плазмы с горячими ионами на установке ПР-5. — Там же, с. 35.
36. **Трубников Б.А.** Устойчивость плазмы в пробкотроне со стабилизирующими стержнями. — Там же, с. 83.
37. **Соловьев Л.С., Шафранов В.Д.** Замкнутые конфигурации с минимумом B . — Там же, с. 169.
38. **Кадомцев Б.Б., Погуце О.П.** Неустойчивость и связанные с ней макроскопические эффекты в тороидальных разрядах. — Там же, с. 365.
39. **Артеменков Л.И., Васильев Р.П., Галкин И.В., Головин И.Н., Жильцов В.А., Зубарев В.Ф., Каганов О.Н., Клочков Н.И., Коняев В.П., Кузнецов В.В., Лихтенштейн В.Х., Масленников Е.А., Мухин П.А., Некрасов А.Н., Панов Д.А., Пистуневич В.И., Пустовойт Ю.М., Свищев В.С., Семашко Н.Н., Терешкин А.Н., Тушабрамашвили К.З., Чуянов В.А., Чухин И.А., Юшкевич В.И.** Получение горячей плазмы на установке Огра-П с инжекцией в магнитную ловушку быстрых атомов водорода. — Там же, т. II, с. 45.
40. **Бабичев А.П., Буряк Е.М., Горбунова Е.Ф., Карчевский А.И., Муромкин Ю.А.** Инжекция плазменных сгустков в пробочную ловушку с адиабатическим сжатием плазмы. Установка АСПА. — Там же, с. 191.
41. **Орлинский Д.В., Осовец С.М., Синицын В.И.** Динамическая стабилизация плазменного шнура. — Там же, с. 313.
42. **Бреус С.Н., Курдюмов В.Н., Левин М.Л., Осовец С.М., Попова Н.Я., Попов И.А., Ходатаев К.В., Шимчук В.П.** Взаимодействие высокочастотной бегущей волны с плазмой на установке «Дельта-2» — Там же, т. I, с. 573.
43. **Филиппов Н.В., Филиппова Т.Н.** Явления, сопровождающие образование плотного плазменного фокуса при кумуляции нецилиндрического z -пинча. — Там же, т. II, с. 405.
44. **Демичев В.Ф., Матюхин В.Д., Никологорский А.В., Струнников В.М.** Поворот плазменной струи в магнитном поле. — Там же, с. 511.
45. **Мухоматов В.С.** Равновесие плазменного шнура на установке Токамак-5. — Там же, с. 577.
46. **Арцимович Л.А., Афросимов В.В., Гладковский И.П., Мирнов С.В., Петров М.П., Стрелков В.С.** Джоулев нагрев плазмы на тороидальной установке Токамак-3. — Там же, с. 595.
47. **Виноградова Н.Д., Разумова К.А.** Неустойчивости высших мод в токамаке. — Там же, с. 617.
48. **Горбунов Е.П.** Плотность электронов на установке токамак, измеренная микроволновым методом. — Там же, с. 629.
49. **Горелик Л.Л., Разумова К.А., Синицын В.И.** Энергетические потери плазмы в тороидальной камере Токамак-2. — Там же, с. 647.
50. **Иванов Д.П., Парфенов Д.С.** Тороидальный разряд в переменном продольном магнитном поле. — Там же, с. 659.
51. **Бабькин М.В., Гаврин П.П., Завойский Е.К., Рудаков Л.И., Скорюпин В.А.** Турбулентный нагрев плазмы током прямого разряда. — Там же, с. 851.
52. **Аликаев В.В., Глаголев В.М., Морозов С.А.** Нагрев электронов плазмы СВЧ-полями в адиабатической ловушке. — Там же, с. 877.
53. **Сивухин Д.В.** Дрейфовая теория движения заряженной частицы в электромагнитных полях. — Вопросы теории плазмы, 1963, т. I, с. 7.
54. **Трубников Б.А.** Столкновение частиц в полностью ионизованной плазме. — Там же, с. 98.

55. **Брагинский С.И.** Явления переноса в плазме. — Там же, с. 183.
56. **Веденов А.А.** Термодинамика плазмы. — Там же, с. 273.
57. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** Геометрия магнитного поля. — Там же, т. II, с. 3.
58. **Шафранов В.Д.** Равновесие плазмы в магнитном поле. — Там же, с. 92.
59. **Кадо́мцев Б.Б.** Гидромагнитная устойчивость плазмы. — Там же, с. 132.
60. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** Движение заряженных частиц в электромагнитных полях. — Там же, с. 177.
61. **Шафранов В.Д.** Электромагнитные волны в плазме. — Там же, т. III, с. 3*.
62. **Михайловский А.Б.** Колебания неоднородной плазмы. — Там же, с. 141.
63. **Веденов А.А.** Введение в теорию слаботурбулентной плазмы. — Там же, с. 203.
64. **Соловьев Л.С.** Симметричные магнитогидродинамические течения и винтовые волны в круглом плазменном цилиндре. — Там же, с. 245.
65. **Волков Т.Ф.** Гидродинамическое описание сильно разреженной плазмы. — Там же, 1964, т. IV, с. 3.
66. **Сагдеев Р.З.** Коллективные процессы и ударные волны в разреженной плазме. — Там же, с. 20.
67. **Сивухин Д.В.** Кулоновские столкновения в полностью ионизованной плазме. — Там же, с. 81.
68. **Кадо́мцев Б.Б.** Турбулентность плазмы. — Там же, с. 188.
69. **Будкер Г.И.** Вопросы, связанные с дрейфом частиц в тороидальном магнитном термоядерном реакторе. — В сб.: Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. — М.: Изд-во АН СССР, 1958, т. I, с. 66 (далее Сборник).
70. **Брагинский С.И., Мигдал А.Б.** Процессы в плазменном столбе при быстром нарастании тока. — Сборник, т. II, с. 20.
71. **Брагинский С.И.** О поведении полностью ионизованной плазмы в сильном магнитном поле. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 645.
72. **Брагинский С.И., Шафранов В.Д.** Плазменный шнур при наличии продольного магнитного поля. — Сборник, т. II, с. 26.
73. **Брагинский С.И., Шафранов В.Д.** Плазменный шнур с потерей тепла на электроды. — Там же, с. 3.
74. **Брагинский С.И.** Явление переноса в полностью ионизованной двухтемпературной плазме. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 459.
75. **Шафранов В.Д.** О классической теплопроводности в тороидальном плазменном шнуре. — Атомная энергия, 1965, т. 19, № 2, с. 120.
76. **Петвиашвили В.Н., Разашвили Р.Р., Циннадзе Н.Л.** Электропроводность турбулентной плазмы. — Ядерный синтез, 1965, т. 5, вып. 4, с. 550.
77. **Галеев А.А., Сагдеев Р.З.** Явления переноса в разреженной плазме в тороидальных ловушках. — ЖЭТФ, 1963, т. 53, вып. 1, с. 34.
78. **Веденов А.А.** Плазма твердых тел. — УФН, 1964, т. 84, вып. 4, с. 533.
79. **Веденов А.А., Пономаренко Ю.Б.** О возникновении турбулентности. — ЖЭТФ, 1964, т. 46, вып. 6, с. 2247.
80. **Тамм И.Е.** Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. I. — Сборник, т. I, с. 3.
81. **Сахаров А.Д.** Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. II. — Там же, с. 20.
82. **Тамм И.Е.** Теория магнитного термоядерного реактора. Ч. III. — Там же, с. 21.
83. **Леонтович А.М.** О силах, действующих на прямолинейный ток, находящийся внутри проводящей цилиндрической трубы. — Там же, с. 110.
84. **Брагинский С.И.** Стягивание плазмы под действием собственного магнитного поля. — Там же, с. 115.
85. **Осовец С.М.** Плазменный виток в электромагнитном поле. — Там же, т. II, с. 238.
86. **Будкер Г.И.** Некоторые вопросы, связанные с пространственной устойчивостью кольцевого тока в плазме. — Там же, т. III, с. 32.
87. **Кадо́мцев Б.Б.** Магнитные ловушки с «гофрированным» полем. — Там же, с. 285.
88. **Кадо́мцев Б.Б.** Магнитные ловушки для плазмы. — Там же, т. IV, с. 353.
89. **Кадо́мцев Б.Б.** О гидродинамике плазмы низкого давления. — Там же, с. 16.
90. **Шафранов В.Д.** О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 710.
91. **Шафранов В.Д.** О равновесии плазменного тора в магнитном поле. — Там же, 1959, т. 37, вып. 4(10), с. 1088.

92. **Шафранов В.Д.** Равновесие тороидального плазменного шнура в магнитном поле. — Атомная энергия, 1961, т. 13, вып. 6, с. 521.
93. **Кадо́мцев Б.Б.** О равновесии плазмы при винтовой симметрии. — ЖЭТФ, 1959, т. 37, вып. 5(11), с. 1353.
94. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** Движение частиц в винтовом тороидальном магнитном поле. — ЖТФ, 1960, т. 30, вып. 3, с. 271.
95. **Кораблев Л.В., Морозов А.И., Соловьев Л.С.** О магнитных поверхностях. — Там же, 1961, т. 31, вып. 10, с. 1153.
96. **Гельфанд И.М., Граев М.И., Зуев Н.М. и др.** Магнитные поверхности трехзаходного винтового магнитного поля, возмущенного гофрированным полем. — Там же, с. 1164.
97. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** Кинетическое рассмотрение некоторых равновесных плазменных конфигураций. — ЖЭТФ, 1961, т. 40, вып. 5, с. 13—16.
98. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** О типичной структуре тороидального магнитного поля. — Там же, 1963, т. 45, вып. 10, с. 955.
99. **Зуева Н.М., Морозов А.И., Соловьев Л.С.** О существовании магнитных поверхностей периодического магнитного поля с большой продольной составляющей с точностью до 4-го порядка малости. — Там же, 1962, т. 32, вып. 7, с. 897.
100. **Гельфанд И.М., Граев М.И., Зуева Н.М., Михайлова М.С., Морозов А.И.** Пример тороидального магнитного поля, не обладающего магнитными поверхностями. — ДАН, 1962, т. 143, № 1, с. 81.
101. **Гельфанд И.М., Граев М.И., Зуева Н.М., Михайлова М.С.** О структуре магнитного тороидального поля, не обладающего магнитными поверхностями. — Там же, 1963, т. 148, № 6, с. 1286.
102. **Зуева Н.М., Михайлова М.С., Морозов А.И.** Пример структуры магнитного поля с разрушающимися магнитными поверхностями. — Там же, т. 153, № 4, с. 801.
103. **Граев М.И., Михайлова М.С., Морозов А.И.** О структуре несимметричных магнитных тороидальных полей. — ЖТФ, 1965, т. 35, вып. 7, с. 1189.
104. **Спитцер Л.** Исследования на стеллараторе. — В кн.: Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Избранные доклады иностранных ученых. Физика горячей плазмы. — М.: Атомиздат, 1959, с. 505.
105. **Брагинский С.И., Кадо́мцев Б.Б.** Стабилизация плазмы с помощью охраняющих проводников. — Сборник, т. III, с. 300.
106. **Шафранов В.Д.** К вопросу о равновесном состоянии кольцевого плазменного шнура. — ЖТФ, 1963, т. 33, вып. 2, с. 137.
107. **Шафранов В.Д.** Равновесие плазменного шнура малой тороидальности с произвольным распределением тока по сечению. — Ядерный синтез, 1963, т. 3, № 3, с. 183.
108. **Шафранов В.Д.** Равновесие плазменного шнура, не обладающего осевой симметрией. Ч. I. — Там же, 1964, т. 4, № 2, с. 114.
109. **Шафранов В.Д.** Равновесие плазменного шнура, не обладающего осевой симметрией. Ч. II. — Там же, № 3, с. 232.
110. **Шафранов В.Д.** О влиянии проводящей диафрагмы на равновесие плазмы в установках Токамак. — Атомная энергия, 1965, т. 18, № 3, с. 255.
111. **Шафранов В.Д.** Удержание плазмы в тороидальном магнитном поле с помощью проводящей диафрагмы. — Ядерный синтез, 1965, т. 5, № 2, с. 150.
112. **Шафранов В.Д.** О равновесии пространственного плазменного шнура в продольном магнитном поле в стационарных условиях. — Атомная энергия, 1965, т. 18, № 5, с. 443.
113. **Шафранов В.Д.** О балансе давлений в тороидальном плазменном шнуре. — Там же, т. 19, № 2, с. 175.
114. **Вандакуров Ю.В.** О стационарном состоянии тонкого кольцевого плазменного шнура с конечной проводимостью. — ЖТФ, 1960, т. 3, вып. 9, с. 1134.
115. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** Равновесие плазменного шнура с винтовыми возмущениями. — ДАН, 1964, т. 158, № 4, с. 831.
116. **Давыдов Б.И.** О влиянии колебаний плазмы на ее электропроводность и теплопроводность. — Сборник, т. I, с. 77.
117. **Веденов А.А., Велихов Е.П., Сагдеев Р.З.** Устойчивость плазмы. — УФН, 1961, т. 73, вып. 4, с. 701.

* Большая часть работы (12 параграфов из 15) была издана в препринте ИАЭ-194, 1960.

(Продолжение следует)