

## Исследования по проблеме управляемого термоядерного синтеза

С. Д. Фанченко

В отличие от Второй международной конференции по применению атомной энергии в мирных целях 1958 г., положившей начало широкому научному обсуждению исследований по осуществлению управляемого термоядерного синтеза, на Третьей конференции этой проблеме было посвящено лишь одно трехчасовое пленарное заседание для общего обзора состояния исследований в различных странах мира. Для детального же обсуждения этой проблемы и широкого обмена научной информацией теперь регулярно созываются международные конференции МАГАТЭ по физике высокотемпературной плазмы. Первая такая конференция состоялась в 1961 г. в Зальцбурге (Австрия), а следующую намечено провести в сентябре 1965 г. в Калэме (Великобритания).

На заседании по управляемому термоядерному синтезу было заслушано четыре обзорных доклада:

1) доклад 297 академика Л. А. Арцимовича «Исследования по проблеме управляемого ядерного синтеза и физике высокотемпературной плазмы в СССР»;

2) доклад 195 А. Снелла и др. «Исследования управляемых термоядерных реакций в США»;

3) доклад 882 А. Шлютера (ФРГ) «Исследования по управляемому ядерному синтезу в Западной Европе»;

4) доклад 881 К. Н. Уотсона-Манро (Австралия) «Развитие исследований по управляемому ядерному синтезу и физике плазмы в странах мира (помимо Европы, Северной Америки и СССР)».

Затем состоялось обсуждение, в котором с краткими сообщениями выступили М. Трошери (Франция), Т. Консоли (Франция), Дж. Адамс (Великобритания), И. Н. Головин (СССР), К. Фушима (Япония), К. Уотсон-Манро (Австралия).

Поскольку полный текст доклада академика Л. А. Арцимовича опубликован в октябрьском номере журнала «Атомная энергия» за 1964 г., здесь достаточно будет указать, что в нем дан подробный обзор успехов советских ученых в решении проблем удержания и нагрева плазмы, в частности, в осуществлении магнитных ловушек с комбинированным полем, об устойчивом удержании плазменного шнура в тороидальных установках с сильным внешним продольным магнитным полем, турбулентном и циклотронном нагревах и высокочастотной динамической стабилизации плазмы и т. д.

### ИССЛЕДОВАНИЯ В США

В обзорном докладе А. Снелла и др. сообщается в основном о развитии тех направлений исследований, которые обсуждались на предыдущей конференции.

**Ловушки с магнитными пробками.** На установках «Алиса» и «Тейбл-Топ» успешно испытана стабилизация плазмы по методу Иоффе. На установке «Алиса» для этой цели использовалось 12 токопроводящих стержней, причем плотность плазмы с температурой 20 *кэв* удалось повысить до  $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  по сравнению с величиной  $10^8 \text{ см}^{-3}$ , достигаемой в этой ловушке при отсутствии стабилизирующих полей. На установке «Тейбл-Топ» четко наблюдалась желобковая неустойчивость плазмы, которая подавлялась при переходе к комбинированному магнитному полю ловушки за счет применения четырех или шести токонесущих стержней по методу Иоффе. Но и в отсутствии стабилизирующих полей в установках «Тейбл-Топ» и «Той-Топ» в определенных режимах работы (при высокой температуре электронов) удавалось подавлять магнитно-гидродинамические неустойчивости за счет конечных ларморовских радиусов и обусловленной наличием холодной плазмы проводимости на электродах, расположенные вне магнитных пробок.

В опытах по инжекции пучка ионов  $\text{H}_2^+$  в установку DCX-1 с лоренцевской ионизацией в магнитном поле удавалось ввести в ловушку не более  $10^{12}$  протонов (максимальная плотность плазмы в центре  $10^8 \text{ см}^{-3}$ ). Этот предел, видимо, обусловлен проявлением микро-неустойчивостей.

При инжекции ионов  $\text{H}_2^+$  с энергией 600 *кэв* в магнитную ловушку DCX-2 на литиевой дуге с силой тока 25 *а* диссоциирует 40–50% ионов. В ловушке достигнута плотность плазмы  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ , подробно изучен энергетический спектр протонов. Интересно отметить, что в этой установке, представляющей собой обычную магнитную ловушку с пробками, никогда не наблюдалось проявлений желобковой неустойчивости.

В некоторых лабораториях продолжалось исследование тэтраонов. Была сделана попытка стабилизации плазмы в тэтраоне с помощью квадрупольного магнитного поля, но пока что положительных результатов не получено.

**Установка «Астрон».** С 1 августа 1964 г. начата инжекция релятивистских электронов для образования *E*-слоя, магнитное поле которого предполагается использовать для устойчивого удержания плазмы. Используется индукционный линейный ускоритель электронов на энергию 4,1 *Мэв* (от 5 до 60 посылок электронов в секунду, длительность каждой посылки 0,25 *мксек*). Первые опыты показали, что время жизни релятивистских электронов *E*-слоя составляет не 5 *сек*, как ожидалось, а лишь около 50 *мксек*. В качестве возможной



причины неустойчивости  $E$ -слоя выдвигается взаимодействие электронов с сильными электромагнитными колебаниями, развивающимися в полости установки.

Исследования тороидальных ловушек. На установке «Стелларатор-С» продолжаются исследования токового нагрева, очистки и удержания плазмы. Применение дивертора позволило снизить концентрацию наиболее трудноустраняемых примесей кислорода в водородной плазме в 80 раз, т. е. до 0,05%. Почти полностью сведен баланс поступления и потерь энергии при токовом нагреве плазмы, но наблюдаются не вполне объяснимые потери плазмы из ловушки, увеличивающиеся при росте тока; эти потери могут быть приписаны турбулентной диффузии, вызванной наличием тока. Начаты опыты по циклотронному нагреву ионов в «Стеллараторе-С». В аналогичных опытах в ловушке с магнитными пробками достигнута температура ионов  $\sim 1$  кэВ.

В тороидальной установке «Левитрон» (с кольцевым токопроводящим сердечником внутри плазмы) обнаружена неустойчивость плазмы, приводящая к локальным искажениям магнитных поверхностей и уходу электронов с энергиями свыше 100 эВ при плотности плазмы  $10^{12} - 10^{13}$  см $^{-3}$ . Предполагается, что это мелкомасштабная неустойчивость, которая возникает из-за конечного сопротивления плазмы при применении токового нагрева. Строится новый вариант «Левитрона» с высокочастотным нагревом плазмы, где согласно теоретическим представлениям и предварительным экспериментальным результатам указанной неустойчивости не должно быть.

Другие направления. Из новых направлений экспериментальных исследований отмечены нагрев плазмы за счет взаимодействия с пучками электронов, электронный циклотронный нагрев плазмы в непрерывном режиме, удержание и стабилизация плазмы в аксиально симметричных и тороидальных ловушках с возрастающим к периферии квазистационарным магнитным полем токов, которые протекают в одном направлении через систему из четырех проводников, расположенных внутри вакуумной камеры. В прямолинейной установке используются четыре токопроводящих стержня, параллельных оси симметрии, в тороидальной установке — четыре токопроводящих кольца, проложенных вдоль периферии тора.

## ПЛАЗМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ

Как показал доклад А. Шлотера, положение с исследованиями физики высокотемпературной плазмы в Западной Европе претерпело со времени Второй Женевской конференции значительные изменения.

Если в 1958 г. экспериментальные исследования проводились в широких масштабах фактически только в Великобритании, то сейчас в них активно включились Франция, ФРГ и другие страны, усилия которых координируются «Евратомом». Всего в Западной Европе над проблемой управляемых термоядерных реакций работают 43 научные организации. В докладе Шлотера отмечены следующие основные научные коллективы: термоядерный центр Калэм в Великобритании (110 физиков, годовой бюджет 10 млн. долл.); научное объединение в составе западногерманского института физики плазмы в Гархинге (99 физиков, годовой бюджет 2 млн. долл.) и французских центров Фонтене-о-Роз (75 физиков) и Сакле (17 физиков); научное объединение в составе итальянской лаборатории плазмы во Фраскати, голландских институтов в Ютфасе и Амстердаме и западногерманского центра Юлих (под Аахеном); инсти-

тут физики плазмы в Стокгольме (Швеция); датская научная лаборатория в Ризе; лаборатория физики плазмы Парижского университета в Орсе; плазменный отдел института им. Макса Планка (Мюнхен, ФРГ). Деятельность этих западноевропейских научных организаций координируется семинаром, носящим название «Европейская исследовательская группа по синтезу». Кроме того, каждое из перечисленных научных объединений имеет свой объединенный совет. Проводится широкая программа экспериментов. Исследуются аксиально симметричные сильноточные разряды (самосжатый разряд «Tiber» и трубчатый самосжатый разряд «Faust» в Калэме, трубчатый самосжатый разряд в Фонтене-о-Роз и Гархинге, установка с самосжимающимся тонким цилиндрическим слоем плазмы «Мирапи» во Фраскати) и сильноточные тороидальные разряды («Зета» в Калэме, установки типа «Левитрон» в Стокгольме и в Олдермастоне, две установки в Ютфасе). Проводятся исследования на магнитных ловушках с пробками («ММ-II» и «DECA-II» в Фонтене-о-Роз, «Феникс» и MTSE в Калэме, ловушка с полем остроконечной геометрии в Ютфасе) и на тороидальных ловушках стеллараторного типа («Вендельштайн» в Мюнхене). Изучаются тэтатроны: обычные тэтатроны в Калэме, Юлихе и Гархинге, тэтатрон «Нариди» с секционированием витка для снижения индуктивности и повышения э. д. с. обхода во Фраскати, тороидальный тэтатрон «M + S» с гофрированным полем в вариантах «Lupus» и «Quasilimus» в Мюнхене. В Калэме проводится эксперимент по сжатию плазмы в магнитном поле остроконечной геометрии Spindle Cusp. Во Фраскати исследуется динамическое сжатие плазмы (установка «Мафин II» с коммулятивным взрывом проводящего цилиндра, охватывающего магнитное поле). В Сакле построены установки для высокочастотного удержания плазмы PLEIADE, CIRCE, ICARE, в последней из которых мощность ВЧ-поля достигает 1 Мвт. В Ютфасе, Фонтене-о-Роз и Юлихе проводятся опыты по инжекции плазмы и столкновению плазмидов и др. Среди полученных результатов можно отметить следующие.

Магнитные ловушки с комбинированным полем. Добавление магнитного поля 6 токопроводящих стержней по методу Иоффе к полю ловушки с магнитными пробками MTSE (Калэм) удлинило время удержания плазмы с  $10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  сек. На французской ловушке с пробками «DECA-II», заполняемой путем инжекции ступка плазмы, включение стабилизирующего квадратного магнитного поля удлинило время удержания плазмы с  $2 \cdot 10^{-5}$  (до  $1 \div 2 \cdot 10^{-4}$  сек) в диапазоне плотностей  $10^{10} - 10^{13}$  см $^{-3}$ . Применение стабилизирующих комбинированных полей планируется и на других установках. Сообщается об успешной стабилизации плазмы комбинированным полем в тэтатронах (Калэм, Юлих).

Исследование неустойчивостей плазмы. На установке «Faust» проведены специальные опыты по сравнению устойчивости плазмы в обычном и трубчатом самосжатом разряде в аналогичных условиях. Хотя удержание во втором случае оказалось несколько лучше, уровень флуктуаций в плазме был в обоих случаях сравнимой величины. Авторы приписывают возникновение неустойчивости конечной проводимости плазмы разряда с результирующим нарушением вмораживаемости поля в плазму. Этот вывод подкрепляется теоретическими расчетами и модельным опытом по наблюдению неустойчивостей ртутной струи в магнитном поле с конфигурацией, характерной для трубчатого самосжатого разряда. В Гархинге обнаружено



быстрое развитие обусловленных конечной проводимостью неустойчивостей в плазме тэтатронов во время захвата в плазме первоначального магнитного поля.

В Мюнхене и Гархинге теоретически, а в Сакле экспериментально изучаются мелкомасштабные неустойчивости плазмы в ловушках с магнитными пробками, в частности ионная циклотронная неустойчивость.

В Стокгольме и Амстердаме изучается метод нагрева плазмы путем придания ей макроскопического вращения с последующей диссипацией энергии этого вращения в плазме.

**Другие исследования.** В некоторых лабораториях исследуются различные методы накопления плазмы в магнитных ловушках: инжекция ионов, инжекция ступок плазмы, инжекция нейтральных атомов. В магнитную ловушку «Феникс» инъецируется пучок нейтральных атомов с энергией 20 *кэв*. Используется лоренцевская ионизация атомов в магнитном поле ловушки. Достигнута плотность плазмы  $10^9 \text{ см}^{-3}$ .

В Мюнхене экспериментально изучался тороидальный дрейф плазмы. В установке «M + S» гофрировка магнитного поля позволила удлинить время существования плазмы, ограничиваемое тороидальным дрейфом, в три раза.

В установке «Мирапи» в цилиндрическую вакуумную камеру вдувается тонкий цилиндрический слой порошка  $\text{AlLiD}_4$ . Мощная ультрафиолетовая лампа-вспышка производит начальную ионизацию. Затем к торцам цилиндра прикладывается высокое напряжение и происходит быстрое схлопывание цилиндрического слоя плазмы. Достигнута максимальная плотность плазмы  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

В Гархинге подготавливается опыт по нагреву плазмы путем инжекции в нее пучка ионов с энергией 300 *кэв* (ток пучка 0,5 *а*).

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ЯПОНИИ И АВСТРАЛИИ

Как сообщается в докладе Уотсона-Манро, исследования по программе управляемого термоядерного синтеза проводятся в Сиднейском университете в Австралии (установка SUPPER — источник плазмы с плотностью  $10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и температурой 1 *эв*, генератор ВЧ-колебаний мощностью 1 *Мвт* на частоте 9 *Мгц* для исследования циклотронного резонанса в плазме; тороидальная установка для динамической стабилизации плазмы вращающимся полем; установки для исследования волн в плазме) и в нескольких исследовательских центрах Японии (университеты в Нагое, Киото, Токио, Нихоне, Осаке, Токуку, Национальная электротехническая лаборатория, компания «Токио шибара электрик» и др.). Небольшие эксперименты проводятся в странах Африки и Латинской Америки. В Индии сделан ряд теоретических исследований по физике плазмы.

В Японии большое внимание уделяется тороидальным ловушкам, исследуются тороидальная ловушка с гофрированным полем «Гелиотрон» (Киото), тороидальная ловушка с «волнистым» полем (Токио), плазменный бетатрон (Токио), стелларатор с ВЧ-нагревом плазмы (Осака). Исследуются также ловушки с магнитными пробками: установка «НХ» с инжекцией молекулярных ионов в пробкотрон (Осака), установка с магнитным полем остроконечной конфигурации под названием «Химера» (Осака), установка по исследованию диффузии плазмы поперек магнитного поля (Токио).

В некоторых лабораториях ведутся работы на тэтатронах, причем в Нихоне найден режим устойчивого сжатия плазмы медленно нарастающим полем ( $H_{\text{макс}} = 8 \text{ кгс}$ , полупериод колебаний поля 34 *мксек*). Имеются установки по исследованию трубчатого самосжатого разряда (Национальная электротехническая лаборатория) и многоступенчатого адиабатического сжатия плазмы (Нагоя, Нихон).

Большой размах имеют эксперименты по прохождению волн и циклотронному резонансу в холодной плазме, которые проводятся на установке «QP» (Нагоя), представляющей собой пеннинговский источник чистой плазмы с плотностью  $10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и температурой 1 *эв*, и на установке «AWRA-2» (Токуку) для наблюдения резонансного поглощения сильных альфвеновских волн. Получены интересные экспериментальные и теоретические результаты.

В целом обзор термоядерных исследований на конференции показал, что эти исследования широко развиваются во всем мире и уже фактически превратились в самостоятельную отрасль науки.

Все участники обсуждения единодушно отмечали, что в период между конференциями в рассматриваемой области достигнут весьма значительный прогресс. Одним из важнейших достижений было признано открытие методов подавления крупномасштабных магнитогидродинамических неустойчивостей плазмы и, в частности, экспериментальная разработка советскими исследователями ловушек с комбинированными магнитными полями.

Однако выполненные за последние годы глубокие экспериментальные и теоретические исследования вскрыли и новые трудности осуществления управляемой термоядерной реакции, для преодоления которых потребуются еще годы напряженной исследовательской работы. Сейчас на эти исследования, по словам председателя английской комиссии по атомной энергии У. Пенни, ежегодно расходуется во всем мире не менее 100 млн. долл. Притом, как подчеркивали многие выступавшие, задача освоения энергии управляемого термоядерного синтеза настолько важна для будущего человечества, что вполне оправдывает затрачиваемые огромные средства и усилия.

## Изотопы и излучения

А. С. Штань

Третья международная конференция по применению атомной энергии в мирных целях была посвящена в основном ядерной энергетике и реакторостроению. Тем не менее были рассмотрены также интересные вопросы в области производства и применения изотопов\*.

\* Перечень докладов советских ученых опубликован в «Атомной энергии», 17, вып. 3, 235 (1964), а спи-

сок докладов зарубежных ученых в «Атомной технике за рубежом», № 8, 27 (1964).

\*\* В круглых скобках указаны номера докладов.