

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

211-53  
2 13

БИБЛИОТЕКА


# Атомная энергия

147471

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:  
А. Н. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ,  
Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), П. Н. ГОЛОВИН,  
Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАНИННИ,  
П. Ф. КВАРЦХАВА, П. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора),  
А. К. КРАСНИ, А. В. ЛЕВЕДИНСКИЙ, А. И. МЕНДУХОВСКИЙ,  
М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор),  
Н. И. НОВИКОВ, В. С. ФУРСОВ, В. В. ШЕВЧЕНКО,  
К. Э. ЭРГЛИС, М. И. ЯКУТОВИЧ

ЯНВАРЬ  
ТОМ 14 1963 ВЫП. 1

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. П. Ф. СКОРИНЫ



## БРИТАНСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА \*

Джон Кокрофт

(Научно-исследовательский центр по атомной энергии,  
Харуэлл, Англия)

Британские исследования в области управляемого термоядерного синтеза начались в сороковых годах в Ливерпуле. Круг с группой своих сотрудников возбуждал мощные искровые разряды в дейтерии, надеясь обнаружить нейтроны, но его постигла неудача. Каузинс и Уэр [1], работавшие под руководством Томсона, пропускали токи до 15 000 а в тороидальном разряде и наблюдали пинч-эффект, который был изучен за десять лет до этого Тонксом в аргоне и водороде. Они обнаружили, что разряд блуждал поперек тора, демонстрируя таким образом один из типов неустойчивости самосжатых разрядов. В Оксфорде Тонеман и его коллеги начали работу с линейными разрядами, а позднее с тороидальными разрядами и также наблюдали пинч-эффект. Большинство результатов этой работы было опубликовано в 1951—1952 гг.

С целью расширения размаха работ их центры в течение 1952—1956 гг. были переведены из Имперского колледжа в исследовательские лаборатории фирмы «Ассошиэйтед электрикал индастриз» в Олдермастоне, а из Оксфорда — в Харуэлл. Винтовые неустойчивости в стеклянном торе с внутренним диаметром 10 см наблюдали Карратерс и Дашенпорт [2]. Эпоха конструирования торов больших размеров началась с конструирования металлического тора диаметром 30 см, построенного для изучения пинч-эффекта при значительно более силь-

ных токах. В этом торе ток — 10 ка протекал в течение  $10^{-8}$  сек. Начались спектроскопические измерения. На основе доплеровского уширения спектральных линий оценили ионную температуру, равную  $\sim 10^5$  °К. В этом торе обнаружили винтовую неустойчивость и было признано необходимым прикладывать продольное поле  $B_z$  для того, чтобы стабилизировать разряд и предотвратить его скручивание и касание им стенок камеры.

Эти результаты были достаточно обнадеживающими, чтобы в 1955 г. начать работу по созданию тора диаметром 1 м, названного позднее «Зета», с целью увеличения силы тока в газе до  $10^8$  а. Одной из причин перехода к торам большого диаметра было стремление уменьшить влияние примесей, поступающих в разряд с металлических стенок. В то же время группа из фирмы «Ассошиэйтед электрикал индастриз» во главе с Уэром начала конструирование в Олдермастоне установки «Сентр» — тора с внутренним диаметром 30 см.

В апреле 1956 г. произошло знаменательное событие — визит в Англию правительственной делегации СССР, в составе которой был И. В. Курчатов. Я не встречал И. В. Курчатова прежде. На меня произвели большое впечатление его живой ум и страстность разговора о сотрудничестве в области атомной энергии. У нас была очень оживленная дискуссия на ступеньках клуба «Атенеум», где в своих предложениях И. В. Курчатов шел так далеко, что я не мог ответить взаим-

\* Перевод с английского.

ностью и не имел никаких представлений о том, как продолжить эту дискуссию. Он предложил прочитать лекцию в Харуэлле, и я согласился договориться об этом. 25 апреля И. В. Курчатов прочитал лекцию в Харуэллском конференц-зале о работах Института атомной энергии в Москве по линейному нестабилизированному самосжатию разряда. В этих опытах токи в диапазоне от 100 кэ до 2 млн. а пропускали через прямые трубы диаметрами до 60 см в различных газах — от водорода до ксенона. Теоретические расчеты, предшествовавшие экспериментальной работе, предсказывали, что увеличение температуры благодаря сжатию разряда должно происходить до такого уровня, где (D — D)-реакция будет создавать мощную вспышку нейтронов. Высокоскоростная фотография запечатлела картину, показавшую быстрое сжатие разряда и его последующие колебания.

В 1952 г. вскоре после начала экспериментов с самосжатием разрядом было обнаружено, что разряд в дейтерии являлся источником нейтронов. Нейтроны всегда наблюдались в коротких импульсах с крутым фронтом. Хотя вначале думали, что поведение нейтронов могло быть объяснено механизмом термоядерного синтеза, серьезные сомнения начали возникать, когда выяснилось, что нейтроны появлялись при токах, меньших, чем это необходимо для протекания термоядерной реакции. Обнаружили, что в момент первого сжатия нейтроны не появляются. Они появляются при втором сжатии, поэтому стали думать, что вдоль оси разрядной трубки в результате неустойчивости плазмы возникали электрические поля, которые могли ускорять дейтроны в прямом процессе и таким образом приводили к появлению нейтронов в результате (D — D)-реакции классическим, нетермоядерным путем.

К сентябрю 1957 г. была построена установка «Зета», которая работала приблизительно в течение месяца до того, как в октябре была проведена конференция в Принстоне, на которой были доложены результаты наших исследований в этой области, а также результаты исследований США. В стабилизированных самосжатых разрядах при токах 200 кэ на основе измерений доплеровского уширения спектральных линий примесей ионная температура оценивалась в 5 млн. градусов и впервые наблюдалось образова-

ние нейтронов в стабилизированных разрядах. Вскоре после этого харуэллские результаты и некоторые результаты исследований в США были опубликованы в журнале «Нейтчур». Впервые был снят покров с британских и американских термоядерных исследований. Это вызвало громадный интерес печати и привело к слишком большому оптимизму относительно перспектив получения в ближайшем будущем энергии термоядерного синтеза.

Наибольший интерес вызывал вопрос, действительно ли наблюдаемые нейтроны получались в результате настоящей управляемой термоядерной реакции. Заметка, опубликованная в «Нейтчур» [3], специально указывала, что полученный до сих пор нейтронный поток был недостаточен для обеспечения нужной точности измерения, чтобы показать, что именно термоядерный процесс вызвал появление нейтронов. Мы подчеркивали снова и снова, что потребуются многие годы напряженной работы, чтобы построить лабораторную термоядерную установку, которая производила бы больше энергии, чем поглощала, и что после этого потребуются еще долгие годы для разработки полномасштабной энергетической установки [4]. Нам не верили.

Все это предшествовало весьма волнующему событию Женевской конференции 1958 г. по мирному использованию атомной энергии, когда впервые работа по управляемым термоядерным реакциям была всесторонне обсуждена между Востоком и Западом. Великолепная выставка действующих моделей термоядерных устройств была создана американцами, впервые рассекретившими принстонский стелларатор, ливерморские установки с магнитными пробками, лос-алемосскую «Спаллу» и ок-риджскую установку DCX. Советские ученые представили модели «Огры» и «Альфы» — машины, аналогичной «Зете». Постройка их в удивительно короткий 6-месячный срок явилась потрясающим подвигом. Несмотря на это изобилие открытий, неудовимая, действительно термоядерная реакция не была заявлена или осуществлена. К этому времени мы значительно лучше стали понимать, какими иными механизмами могут осуществляться (D — D)-реакции синтеза.

Рассекречивание работ по управляемым термоядерным реакциям позволило продол-

жить наши обсуждения с И. В. Курчатовым, начатые в Лондоне. Я был приглашен посетить Институт атомной энергии в Москве в ноябре 1958 г.

Вместе с д-ром Тонеманом, м-ром Пизом и другими коллегами мы вылетели в Москву на скоростном реактивном ТУ 8 ноября 1958 г., и я был тепло встречен И. В. Курчатовым и членами Академии наук СССР. В течение следующей недели мы изучали работу Института, руководимого И. В. Курчатовым, в области управляемого синтеза. На нас произвело сильное впечатление разнообразие изучаемых экспериментальных устройств, особенно насыщенность оборудованием, а также большой энтузиазм сотрудников Института, что было отражением энтузиазма и энергии самого И. В. Курчатова. Нас пригласили на завтрак в его дом на территории Института, где я встретил господу Курчатову и сестру проф. Сяньельникова, которого я хорошо знал по его работе с Капицей в Кембридже. Мои коллеги получили также возможность посетить Институт электрофизической аппаратуры в Ленинграде, пока я находился в Дубне.

В ответ на наш визит делегация СССР посетила Харуэлла в апреле 1959 г. и совсем недавно делегация физиков из Харуэлла и Калхэма, возглавляемая д-ром Дж. Адамсом, посетила Россию для обсуждения работ, проводимых в СССР и Соединенном Королевстве. Таким образом, инициатива И. В. Курчатова в апреле 1956 г. явилась плодотворным вкладом в международное сотрудничество в этой области.

Три года спустя после Второй Женевской конференции был сделан новый обзор результатов на конференции в Зальцбурге. В течение предшествующих ей трех лет произошло значительное развитие техники, используемой для выдержки тока, что происходит в высокотемпературных разрядах. Радиационные потери из плазмы в инфракрасном диапазоне измеряются инфракрасным спектрометром, находящимся на расстоянии 10 см от плазмы. Для этого теперь употребляется полупроводниковый детектор *n*-типа из сурьмянистого индия, использующий пиндодронный резонанс. Это позволяет проводить разрешенные во времени измерения импульсов излучения с длинами волн в диапазоне 0,1—2 мк и с временем разрешения  $\sim 1$  мксек. Электростатические

анализаторы измеряют спектр электронов, попадающих на стенки разрядной трубки. Современные вакуумные ультрафиолетовые спектрометры позволяют существенно увеличить выбор спектральных линий, доступных для диагностики; более того, в этом спектральном диапазоне теперь возможны точные измерения ширины линий и интенсивности континуума Ar (VIII), Xe (IX).

В течение этого же периода была реконструирована «Зета». Чтобы отделаться от неприятных мощных пристеночных дуг, был установлен гофрированный лайнер из нержавеющей стали, причем сталь была такой тонкой, что лайнер почти не шунтировал разряд. Стало возможным прогревать внутренность лайнера, в результате чего удалось достичь лучшего вакуума с предельным давлением порядка  $10^{-6}$  мм рт. ст. Была установлена большая конденсаторная батарея, позволяющая получать токи до 900 кА. Указанные мероприятия, как об этом сообщалось в Зальцбурге, привели к полному отсутствию электрических пробоев в торе на протяжении нескольких сотен тысяч разрядов с токами 200—600 кА и при наличии продольного магнитного поля  $B_z = 1800$  гс.

В результате улучшения диагностической техники и обеспечения лучшего режима работы «Зета» было сделано много измерений и были выявлены две главные причины потерь энергии. Один механизм потерь объясняется излучением ионов примесей. Почти все это излучение находится в ультрафиолетовой области в диапазоне длин волн  $< 1600$  Å. На рис. 1 показано, что радиационные потери с ростом начального давления газа изменяются от 10 до 100% от вкладываемой в разряд энергии.

При давлениях меньше чем  $10^{-3}$  мм рт. ст. Гибсон и Мейсон при помощи зондов обнаружили присутствие плазмы вблизи стенок. Согласно простой классической картине, перемещение плазмы поперек магнитного поля должно было бы происходить в результате медленной поперечной диффузии. Было показано, что плотность электронов вблизи стенок равна приблизительно  $3 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ; была также измерена энергия электронов, достигающих стенок, при помощи электростатического анализатора. Эти электроны имели максвелловское распределение с температурой 15—50 эв в зависимости от давления и присутствия примесей. Высокие

температуры электронов наблюдались при низких давлениях. При  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. температура электронов составляла несколько электронвольт и только небольшая часть энергии терялась этим путем. Диффузия плазмы наблюдалась вместе с флуктуациями электрического поля. Напряженность электрических полей по величине равна

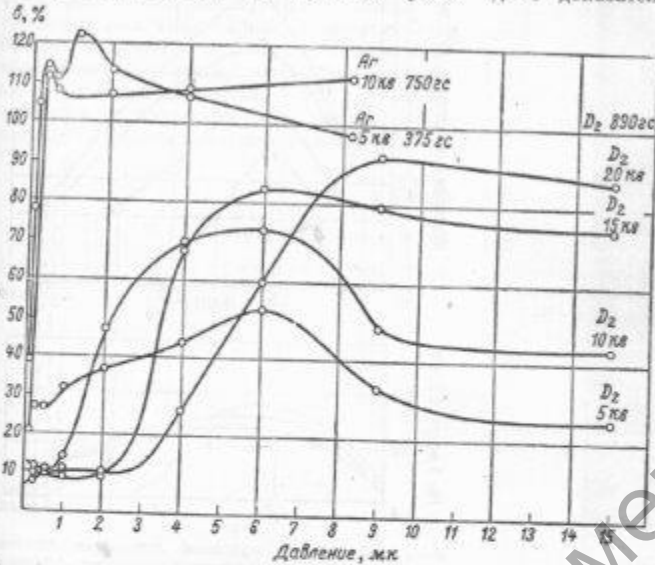


Рис. 1. Отношение энергии излучения к полной энергии плазмы  $\delta$  как функция давления.

50 e/cm и направлена преимущественно поперек магнитного поля. Поэтому имеет место хорошо известная диффузия плазмы как целого в скрещенных полях E и B. Это движение плазмы наблюдалось также спектроскопическим способом по доплеровскому уширению спектральных линий элементов примесей. Доплеровское уширение согласуется с моделью, в которой (в условиях эксперимента) хаотическое движение ионов соответствует температуре 400 эв, общей для всех ионов, а их упорядоченная скорость около  $10^8$  см/сек находится в согласии с измерениями флуктуационного электрического поля [5].

Еще более замечательный результат был получен путем спектроскопического анализа

истории пов дення ионов примесей в плазме. Рис. 2 показывает последовательное возбуждение спектральных линий элементов примесей, специально добавляемых к рабочему газу. Интенсивность линий достигает максимума и затем уменьшается по мере образования нового сорта ионов. Эти измерения дают доказательства изменения плотности

плазмы и показывают, что в добавление к так называемому эффекту откачки — потерям плазмы на стенках — имеет место инжекция холодного газа со стенок за счет испарения и униполярных дуг, так что общее количество газа в плазме сначала растет до максимальной величины, а затем снова падает (рис. 3). Когда линейная плотность плазмы падает до  $6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-1</sup>, имеет место резкое уменьшение тока и одновременно появляются убегающие электроны, вызывающие эмиссию рентгеновых лучей. Большая часть общей энергии, запасенной в торе, в конце импульса рассеивается этим способом. Электронная температура плазмы была измерена при помощи микроволновой, инфракрасной и ультрафиолетовой спектроскопической техники и оказалась в пределах  $(2-4) \cdot 10^5$  °C. Общим итогом двухлетней работы на «Зете» является значительно лучшее понимание физики плазмы, но малый прогресс на пути высоких температур.

В будущем исследование в Англии по проблеме управляемых термоядерных реакций будут перебазированы в новую Калхэмскую лабораторию, возглавляемую д-ром Дж. Адамсом. Эта лаборатория будет полностью несекретным исследовательским учреждением, и туда будут приглашаться ученые из всех стран. Мы особенно надеемся принимать у себя ученых из Института им. И. В. Курчатова.

Среди установок, которые должны быть смонтированы для плазменных исследова-

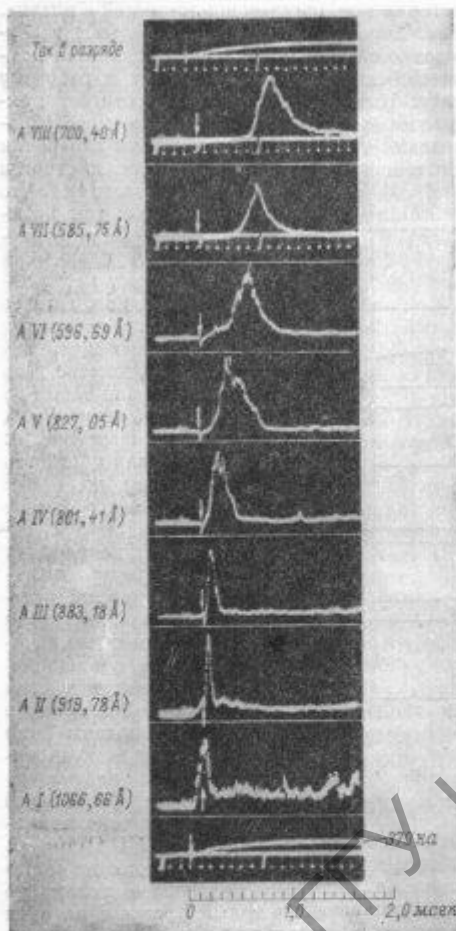


Рис. 2. Изменение интенсивности спектральных линий при ионизации ионизации аргона в дейтериевой плазме.

Давление  $D_2 = 1/2$  мм. рт. ст.; добавка аргона 10%; батарея с энергией 3 Мэв;  $V = 10$  кВ;  $B_z = 800$  эс.

ний, будет улучшенный вариант «Феникса» — устройства, описанного в Зальцбурге и разрабатываемого Исследовательским центром по атомному оружию в Олдермастоне. «Феникс» — установка с магнитными пробками и с инжекцией. В эту машину инжек-

тируются нейтральные атомы водорода, получаемые путем диссоциации 90 кэв ионов  $H_0^+$ . В процессе молекулярной диссоциации небольшая часть нейтральных атомов образуется в высоковозбужденных состояниях,

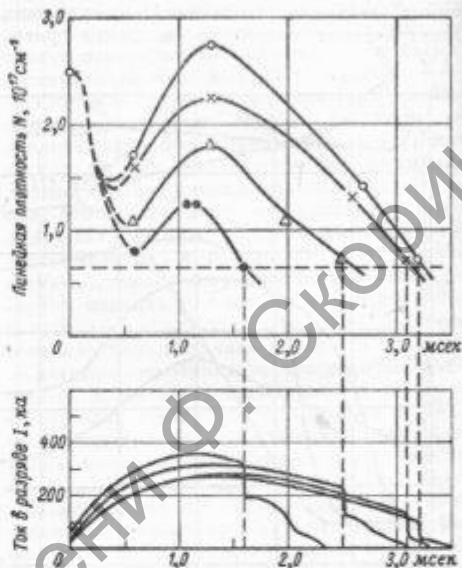


Рис. 3. Изменение линейной плотности плазмы, определенной по спектроскопическим данным, в зависимости от времени:

Значение величины  $\beta_p$  — отношения величин составляющей магнитного поля  $B_p$  к начальному значению  $B_z$  стабилизирующего магнитного поля:  $\circ - 4,9$ ;  $\times - 3,8$ ;  $\triangle - 3,6$ ;  $\bullet - 1,9$ .

и затем они ионизируются лоренцевой силой в магнитном поле ловушки. Вероятность ионизации зависит от векторного произведения скорости частиц на напряженность магнитного поля: В результате эффекта лоренцевой ионизации начальная скорость накопления плазмы возрастает в несколько сотен раз.

Другим устройством, которое будет монтироваться в Калхэме, является установка с остроконечной геометрией. В этом эксперименте плазма образуется и подогревается путем столкновения двух ударных волн и затем адиабатически сжимается в быстронарастающем остроконечном магнит-

ном поле. До сих пор была получена плазма с плотностью ионов  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> и относительно низкой температурой в 200 000° С. До сих пор в равновесной фазе, когда магнитное давление и давление плазмы были почти одинаковы, никаких крупномасштабных неустойчивостей не наблюдалось.

Работа по θ-пинчу также будет переведена в Калхэм, причем для нее будет использована новая малоиндуктивная конденсаторная батарея с энергией 1 Мдж. В первой установке было обнаружено, что плазма вращается с линейной скоростью  $2 \cdot 10^7$  см/сек; это приводит к неустойчивости, в результате которой плазма расщепляется на два

цилиндра, вращающихся вокруг общей оси.

Все эти работы нашей и многих других лабораторий показывают, что физика плазмы продолжает быть областью весьма интересных исследований. В этой работе нами руководит ясное понимание необычайной важности для человечества ее конечной цели, и мы располагаем теперь неограниченными преимуществами, вытекающими из международного сотрудничества. Мы всегда будем помнить Игоря Курчатова за его вклад в эту область исследований и неизменный к ней интерес.

Поступила в Редакцию 30/VIII 1962 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cousins, Ware. Proc. Phys. Soc., B 64, 159 (1951).
2. Carruthers, Davenport. Proc. Phys. Soc., B70, 49 (1957).
3. Nature, 181, 217 (1958).
4. J. Cockcroft. New Scientist, 3, No. 63 (1958).
5. Джонс, Вильсон. Доклад № 57, представленный на Международную конференцию по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Зальцбург, МАГАТЭ, 1961.



РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. ШОРИНЫ