

«БИКС» (Англия) показала на конференции фильм, посвященный применению подобных аппаратов на строительстве наземных и подводных газонефтепроводов. Появились новые типы  $\gamma$ -дефектоскопов (В. Осуховский и др., ПНР), рентгеновских интроскопов (Б. И. Леонов и др., СССР), бетатронных интроскопов (В. И. Горбунов и др., СССР).

В ряде докладов были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по выбору и обоснованию параметров радиометрической дефектоскопии (З. Годлевский, ПНР; К. Синклер и др., США), по ее применению для контроля качества керамики (З. Годлевский, ПНР) и проката (В. И. Горбунов и др., СССР). В последние годы все отчетливее выявляется тенденция автоматизации основных процессов радиационной дефектоскопии: экспониметрия (Г. Баслер, ФРГ), расшифровка радиограмм с помощью ЭВМ (В. Г. Абрамов и др., СССР; Б. Достер и др., США).

На секции «НМК в реакторной технологии» было представлено 13 докладов, посвященных применению автоматических ультразвуковых дефектоскопов (В. Деутш, ФРГ; А. Сэмел, Франция; К. Абенд и др., ФРГ) и вихревых аппаратов (Ф. Ферстер и Мейер, ФРГ), предназначенных для контроля качества труб твэлов и парогенераторов в процессе их изготовления; разработке автоматических систем контроля содержания и распределения делящихся изотопов в урановом или плутониевом ядерном горючем — твэлов (Н. Бейер и др., США; М. Дестрибатс и др., Франция); разработке и использованию акустических, ультразвуковых и радиоизотопных приборов и аппаратов для контроля качества баков и патрубков ядерных реакторов в процессе их эксплуатации и ремонта (О. Реймхард, США; В. Ратх, ФРГ; А. Н. Майоров и др., СССР). Большое внимание было уделено комплексным системам НМК и их взаимосвязи с технологией изготовления твэлов, позволившей значительно повысить ресурс и технико-экономические показатели их использования (Х. Федик и др., США; П. Пикард и др., Франция); опыту и результатам комплексного применения НМК при обследованиях 40 ядерных реакторов различного назначения, проведенных в США при их монтаже, ремонте и в процессе эксплуатации в период с 1963 по 1972 гг. (К. Лаутзенвейзер, США); применению термографической установки фирмы «АГА» для контроля

фильтрационного оборудования, используемого при получении ядерного горючего.

На организованной специализированной выставке современных средств неразрушающих испытаний участвовали 54 фирмы из 32 стран. Наиболее широко были представлены рентгеновские и радиоизотопные аппараты (152 экспоната), ультразвуковые (85) и электромагнитные приборы (69). Среди новых приборов следует отметить приборы акустической эмиссии фирм «Леонард» (Франция) и «Дуниган-Эндрек» (США — Великобритания), предназначенные для контроля корпусов реакторов в процессе эксплуатации, установки для рентгено-телевизионного контроля фирм «Филипс-Мюллер» и «Зайферт» (ФРГ)  $\gamma$ -дефектоскопы фирм «АГС», (Франция), «К. С. Продактс» (Англия), «Пикер-Андеркс» (США — Дания) и др., рентгеновские аппараты фирм «Бальто» (Бельгия), «Филипс» (ФРГ) и др., вспомогательное оборудование для промышленной радиографии фирм «Ковол» (ФРГ), «Геверкен» (Швеция) и др., автоматизированная линия для комплексного электромагнитного и ультразвукового контроля аустенитных и ферромагнитных труб диаметром до 60 мм фирмы «АСИА» (Швеция), линейные ускорители «Вериян-Линатрон-2000» (США) на 8 Мэв, 2000 р/мин на 1 м и «Супер-Х» (Англия) на 9 Мэв, 1500 р/мин на 1 м. Заметна общая тенденция — увеличение числа фирм, разрабатывающих и производящих оборудование для неразрушающих испытаний, а также увеличение объемов реализации их продукции. Однако ведущее положение по-прежнему сохраняется за крупными фирмами, специализирующимися длительное время в этой области, таких, как «Зауэрвайн», ФРГ ( $\gamma$ -дефектоскопы), «Крауткрамера», ФРГ — США (ультразвуковые приборы), «Ферстер», ФРГ (электромагнитные приборы), «Филипс», ФРГ, «Бальто», Бельгия (рентгеновское оборудование) и пр.

В последние годы значительно повысился технический уровень новых разработок, получили широкое применение унифицированные приборные узлы и блоки, увеличился объем производства средств неразрушающего контроля.

Конференция и выставка были организованы Международным комитетом по неразрушающему контролю.

МАЙОРОВ А. Н.

### III Международный симпозиум по удержанию плазмы в тороидальных системах

С 26 по 30 марта 1973 г. в Гархинге (ФРГ) проходил III Международный симпозиум по удержанию плазмы в тороидальных системах, организованный Институтом физики плазмы им. Макса Планка при поддержке Европейского физического общества\*.

Участники симпозиума почтили память академика Л. А. Арцимовича.

В работе симпозиума приняли участие 179 делегатов из 12 стран, было заслушано 80 докладов. Большая

\* Первая подобного рода конференция состоялась в Принстоне (США) в 1966 г., вторая — в Дубне (СССР) в 1969 г.

часть докладов была посвящена вопросам создания, удержания и нагрева плазмы в установках типа «Токамак». Доклады, представленные на симпозиум, были отпечатаны до начала симпозиума и розданы его участникам.

Как известно, до 1969 г. системы типа «Токамак» изучались только в Советском Союзе и только после конференции в Дубне исследования в этом направлении начали интенсивно развиваться в других странах. В настоящее время за рубежом построено и введено в действие более десяти установок токамак, близких по размерам к крупнейшей советской установке Т-4 ИАЭ им. И. В. Курчатова. Накануне симпозиума были

начаты эксперименты на установке ТФР (Фонтенэ-о-Роз, Франция). Эта установка по своим показателям значительно превосходит Т-4 (напряженность ее тороидального магнитного поля 60 кэ, отношение большого радиуса тора к малому  $R/a = 98/20$ ), и в течение ближайших лет она будет крупнейшей в мире.

Экспериментальные данные, полученные на зарубежных установках, в основном совпадают с результатами советских исследований. В докладе Н. Фюрта (Принстон) отмечено, что потери энергии из плазмы на установках ST и АТС в типичных для токамака режимах разряда (радиационные потери малы и ток в плазме составляет  $\sim 60$  кА) достаточно хорошо описываются псевдоклассической формулой, предложенной Л. А. Арцимовичем. Согласно предварительным данным, при токах  $\sim 120$  кА наблюдается отклонение от этой формулы в сторону увеличения потерь. На японской установке IFT-2 энергетическое время жизни плазмы  $\tau_E$  составляет  $\sim 20$  мсек и соответствует эмпирической формуле  $\tau_E \sim H\theta a^2$ , предложенной С. В. Мироновым на основании экспериментальных данных, полученных на Т-3 (ИАЭ им. И. В. Курчатова). Эта формула по существу близка к псевдоклассической. Ранее в советских работах было показано, что псевдоклассическая теория грубо описывает результаты экспериментов, в частности она не объясняет возрастание времени удержания плазмы при увеличении ее плотности.

Д. Дючс и др. (США) представили обзорный доклад, в котором подытожены результаты численного моделирования процессов переноса в плазме токамака. Известно пять полумпирических моделей, приводящих неплохое совпадение с экспериментом. Согласно всем моделям, электронная теплопроводность должна превышать неоклассическую на фактор от нескольких единиц до нескольких десятков. Однако указанные модели либо вообще не учитывают влияния примесей, либо учитывают его недостаточно последовательно. Так, сравнительно простой учет влияния примесей (через  $Z_{\text{эф}}$  и радиационные потери с линейчатым излучением) позволил американским физикам, работающим на установке «Ормак» (Ок-Ридж, США), сделать вывод, что в их системе электронная теплопроводность по крайней мере в пять раз меньше псевдоклассической и близка к неоклассической, в то время как скорость диффузии является псевдоклассической. Несколько лет назад между советскими и американскими физиками возникли разногласия в вопросе о соотношении между энергетическим  $\tau_E$  и диффузионным  $\tau_p$  временами удержания плазмы, т. е. по существу в вопросе о том, какой из механизмов потерь — теплопроводность или диффузия — является преобладающим. Из результатов экспериментов, проведенных на установках Т-3 и ТМ-3 (ИАЭ им. И. В. Курчатова), следовало, что  $\tau_p \gg \tau_E$ , т. е. преобладает аномальная электронная теплопроводность. В работах американских физиков, выполненных на установке ST и доложенных на конференциях в Мэдисоне (1971 г.) и Гренобле (1972 г.), утверждалось, что  $\tau_E \sim \tau_p$  и что нет необходимости предполагать наличие аномальной электронной теплопроводности.

Следует отметить, что такого же мнения придерживаются физики, работающие на «Ормаке». В то же время по результатам последних экспериментов на ST, представленным на данном симпозиуме, получается  $\tau_E \approx \frac{1}{5} \tau_p$ .

Несколько иначе обстоит дело с вопросом о теплопроводности ионов. Все имеющиеся экспериментальные данные о величинах температуры ионов хорошо соответствуют известной формуле Л. А. Арцимовича, полученной в предположении, что единственным механизмом потерь энергии ионами является неоклассическая теплопроводность, а частоты соударений соответствуют области «плато» на зависимости коэффициента температуропроводности от частоты. На этом основании советские физики несколько лет назад сделали вывод о классическом характере поведения ионов в токамаке. Этому выводу не противоречили и результаты, полученные позднее американскими исследователями. Несколько настораживали появившиеся в последнее время указания о том, что температура ионов продолжает соответствовать формуле для «плато», в то время как параметры плазмы, согласно оценкам, должны соответствовать области редких соударений. Такой же эффект был обнаружен и на установке «Ормак», на которой удалось продвинуться, по-видимому, дальше в область редких соударений. Наметившееся расхождение экспериментальных данных с неоклассической теорией, согласно результатам, полученным на «Ормаке», устраняется, если учитывать, что потери энергии ионами происходят за счет перезарядки. Таким образом, и в области редких соударений ионная теплопроводность, по-видимому, следует неоклассическому закону. Однако этот вывод сделан на основании предположения о кулоновском механизме обмена энергией между электронами и ионами. Если поток энергии от электронов к ионам превышает кулоновский, то ионная теплопроводность должна быть аномальной. Серьезным аргументом в пользу неоклассической ионной теплопроводности, который не связан с указанным выше предположением, могут служить доложенные на симпозиуме результаты экспериментов по адиабатическому сжатию плазмы на установке АТС.

Важной проблемой является исследование возможности получения устойчивой плазмы при низких значениях параметра устойчивости  $q$ . Известно, что при уменьшении  $q$  до трех-четырех в плазме развивается неустойчивость типа срыва. В докладе, посвященном работам на установке «Ормак», отмечено, что в области  $q(a) < 5$  ( $a$  — радиус диафрагмы) снижение  $q$  приводит к уменьшению времени удержания плазмы даже в отсутствие неустойчивости срыва. В докладе, посвященном экспериментам на установке Т-6 (СССР), показано, что в том случае, когда поверхность плазменного шнура расположена достаточно близко к поверхности проводящего кожуха, т. е.  $a/b > 0,8$  ( $b$  — радиус поперечного сечения проводящего кожуха), удается получить ряды с  $q(a) \approx 1,2$ , сохраняющие устойчивость в течение 1—2 мсек. На основании этих данных, а также экспериментов на установке «Алкатор» (США), в которых получена относительно устойчивая плазма при  $q \approx 1,7$ , можно заключить, что область значений  $1 < q(a) < 2$  не является абсолютно запретной для токамака. Неустойчивость срыва возникает также при больших величинах  $q(a)$ , если плотность плазмы превышает некоторое критическое значение [приблизительно  $(3 \div 5) \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>]. В докладе Н. Фюрта несколько детализирована идея о радиационном охлаждении периферии плазменного шнура как одной из возможных причин контрагирования сжатия токового канала, наблюдаемого перед наступлением неустойчивости срыва. Однако механизм неустойчивости срыва по-прежнему остается неясным. Фотографии свечения плазменного шнура, полученные на установке АТС,

позволили Н. Фюрту сделать вывод, что расширение шнура в процессе неустойчивости срыва происходит в результате развития не крупно-, а мелкокомасштабных возмущений, которые практически не влияют на форму поверхности плазменного шнура.

Большое внимание на конференции было уделено вопросам загрязнения плазмы примесями, поступающими со стенок камеры, и потерям энергии из плазмы вследствие процессов перезарядки ионов на примесях и нейтральном газе. Защите плазмы от воздействия стенок в последние годы уделяют все большее внимание. Один из возможных способов решения этой проблемы — использование дивертора; такой вариант обсуждался в докладе японских физиков. На симпозиуме стало известно, что установка с локальным дивертором сооружается в Калэме (Англия). Большой интерес вызвал доклад о «перстеньковом» токамаке, построенном в ИАЭ им. И. В. Курчатова. В этой установке в отличие от обычного токамака поперечное сечение плазмы имеет вытянутую форму. Интерес к такой системе объясняется тем, что согласно теоретическим расчетам, в установках указанного типа возможно удастся получить более высокие параметры плазмы.

На симпозиуме широко обсуждались проблемы удержания и нагрева плазмы в системах типа стелларатора. На установках «Гелиотрон Д» (Япония), «Сатурн» (СССР), «Прото-Клео» (Англия) наблюдается удовлетворительное согласие скорости диффузионного распада плазмы с предсказаниями неоклассической теории. В то же время на стеллараторах JIPP (Япония) и Тор-1 (СССР) наблюдается существенное расхождение с неоклассической теорией как по абсолютным значениям времени жизни плазмы, так и по характеру его зависимости от параметров плазмы и магнитного поля.

Несколько докладов было посвящено новым конструкциям магнитных систем для создания магнитного поля стеллараторной конфигурации. Оригинальная магнитная система — однозаходный торсатрон «Винт-20» — исследуется в ХФТИ (СССР). В этой установке единственный винтовой проводник, расположенный внутри вакуумной камеры, создает как продольную, так и поперечную компоненты магнитного поля. На конференции сообщалось о проекте большого стелларатора W-VII, строительство которого начато в Институте физики плазмы в Гархинге (ФРГ). Установка имеет большой радиус 200 см, радиус плазмы 22 см и напряженность магнитного поля до 40 кэ.

Из докладов, посвященных системам с внутренними проводниками, наибольший интерес представляет обзорный доклад по работам, выполненным на сфераторе с левитирующим кольцом (Принстон, США). В диапазоне электронных температур 0,1—10 эв время жизни плазмы увеличивается с ростом температуры и падает с увеличением плотности, что соответствует псевдоклассической теории. При дальнейшем увеличении температуры и при переходе в область редких соударений вид зависимости меняется и приобретает бомовский характер  $\tau \approx \tau_{бom}$ .

Несколько докладов было посвящено изучению конфигурации «Белт-пинч». Заслуживают внимания параметры двух крупных импульсных пинчей, строящихся в ФРГ с энергосодержанием источников питания более 1 Мдж. В одной из них, строящейся в Гархинге, предполагается увеличить батарею до 3 Мдж и довести продольный ток в плазме до 0,9 Ма. Вторая установка строится в Юлихе (ФРГ), ее батарея рассчитана на 1,1 Мдж, что позволит довести ток в плазме

до 0,5 Ма. На этих установках планируется начать физические исследования в конце 1973 г.

В докладе, в котором рассмотрены результаты работ на установке «Дублет-II» (США), показано, что дублетная конфигурация существует только в короткий промежуток времени (~1 мсек) и при токах 500 ка. При меньших токах (~100 ка) и больших длительностях (~20 мсек) в плазме образуются два шнура. Предполагается, что в 1974 г. установка «Дублет-II» будет перестроена в перстеньковый токамак.

Вопросам нагрева плазмы в замкнутых установках было посвящено специальное заседание конференции, на котором обсуждались ВЧ- и СВЧ-методы нагрева и нагрев инжекцией быстрых атомов. Наиболее интересные результаты получены на стеллараторе «Ураган», где достигнуты величины  $nT \approx 10^{15}$  эв/см<sup>3</sup>. Показано, что если использовать смесь двух газов, то нагрев наблюдается как в области ионно-циклотронной частоты, так и в области ион-ионного резонанса. Аналогичная работа проводилась в Принстоне на установке ST, где в конце 1973 г. предполагается ввести в плазму мощность 1—4 Мвт на частотах ионно-циклотронного резонанса и его второй гармоники. На установке «Алкатер» (США) проводится подготовка к экспериментам по нагреву плазмы в диапазоне частот нижнегибридного резонанса. В настоящее время в Англии исследуется возможность нагрева плазмы методом магнитной накачки. Вопросам теории такого нагрева были посвящены два доклада французских ученых. В Гренобле (Франция) сооружаются стелларатор «Вега» и токамак «Шетула», на которых предполагается исследовать ВЧ-методы нагрева плазмы.

Нейтральная инжекция в замкнутые установки была рассмотрена в пяти докладах. На установке «Клео» (Англия) осуществлена инжекция пучка атомов мощностью 40 квт. Аналогичные эксперименты будут проведены на установках «Ормак» (США), ТФР (Франция) и АТС (США). Большое внимание уделяется теоретическим вопросам инжекции быстрых атомов. В трех докладах обсуждались вопросы влияния нейтрального газа и неоднородности магнитного поля на удержании быстрых захваченных ионов, вращения плазмы вследствие инжекции и др.

Большая часть теоретических докладов посвящена двум основным темам: устойчивость плазмы и процессы переноса в плазме. В нескольких докладах рассмотрена теория линейной устойчивости установок типа «Токамак» с вытянутыми сечениями магнитных поверхностей. В докладе О. Розерфорда (США) представлена нелинейная теория тиринг-неустойчивости. В докладе Розенблюта (США) сделана попытка объяснить неустойчивость срыва нелинейным развитием винтовой неустойчивости с  $m = 1$ . Рассчитанные величины выброса на напряжении и смещения плазменного шнура намного меньше наблюдаемых экспериментально. В то же время это пока единственная теоретическая модель, которая правильно предсказывает знак выброса напряжения и направление смещения шнура.

В заключение следует отметить, что симпозиум продемонстрировал всевозрастающую концентрацию усилий большинства стран к исследованиям поведения плазмы в системах типа токамака. Большое число уже действующих и сооружаемых в разных странах крупных установок такого типа позволяет надеяться, что в ближайшее время станет более ясной перспективность такого направления для создания термоядерного реактора.

АЛИКАЕВ В. В., БРЕВНОВ Н. Н., МУХОВАТОВ В. С.