

загрязнений в энергонапряженных режимах токамака. Были представлены результаты, полученные на установке DIVA в режиме работы с покрытием стенок тонким (~ 1 мк) слоем графита, осаждавшимся либо из газовой фазы (разряды в метане), либо путем распыления графитовой диафрагмы. В последнем случае слой графита был очень рыхлым. Устойчивый разряд был получен только при одновременном включении дивертора. Параметры разряда мало отличались от полученных в условиях титанового распыления. Сделан вывод о перспективности таких методов защиты стенок.

Другой возможный способ защиты стенок — покрытие их слоем кислорода. В работе Х. Верникеля (ФРГ) и др. методом резонансной флюоресценции исследовалось распыление нержавеющей стали, покрытой слоем окислов, оказавшееся в 15 раз слабее, чем у неокрытого образца. Очистка происходит под действием бомбардировки поверхности водородом, дейтерием и гелием в количествах соот-

ветственно 10^{18} , $4 \cdot 10^{17}$ и $1 \cdot 10^{17}$ атомов. Таким образом при интенсивности бомбардирующего потока $\sim 10^{15}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ защитного слоя хватило бы на импульсы длительностью 100—500 с. Подобный вариант защиты предстоит испытать в будущем.

Итак, за последние 5 лет достигнут серьезный прогресс на пути получения чистой плазмы в токамаках с помощью новых методов очистки стенок, титанового распыления и применения графитовых диафрагм. Дальнейшее увеличение энергонапряженности и длительности разрядов заставит искать новые методы борьбы с примесями. Самый перспективный из них — применение магнитных диверторов, хотя возможны и альтернативные методы. Одна из ближайших задач заключается в исследовании поведения плазмы и примесей в условиях длительных рабочих импульсов (10—30 с). Первой установкой, на которой предполагаются такие исследования, будет JET.

МИРНОВ С. В.

Вторая Международная конференция по импульсным энергосистемам

Конференция проходила 12—14 июня 1979 г. в Лаббоке (США). Она была организована электроинженерным факультетом Техасского технологического университета и Южным отделением IEEE. Участвовали 270 представителей многих стран и организаций. Каждый день работы конференции начинался пленарным заседанием, на котором заслушивались три доклада (по 30 мин); затем продолжалась на трех одновременно работающих секциях. На пленарных заседаниях с докладами выступили советские представители: Г. А. Месяц («Мегавольтовые наносекундные коммутаторы») и А. М. Пасеников («Ускорительный модуль установки «Ангара-5»).

На пленарных заседаниях были представлены обзоры по различным направлениям термоядерного синтеза с инерциальным удержанием. Г. Кэнаван (Министерство энергетики США) рассмотрел состояние работ и планы по программе стеклянных лазеров (установки «Шива» и «Нова»). Программа, рассчитанная на пять лет, предполагает переход от экспериментов с субваттватным уровнем мощности к созданию устройств, способных подводить к мишени мощность до 100 ТВт. Предусматривается возможность применения не только стеклянных и CO_2 -лазеров, но и более коротковолновых лазеров, а также пучков электронов, легких и тяжелых ионов. Усилия в основном будут направлены на создание систем однократного действия, так как их стоимость значительно ниже. Однако по мере развития программы внимание будет уделяться также узлам и подсистемам периодического действия. Исходные источники энергии — конденсаторные батареи (отмечалась тенденция к снижению стоимости конденсаторов), а для «Нова» — инерционные накопители с генераторами компрессионного типа, способные генерировать мощные импульсы длительностью около 500 нс, необходимые для системы накачки. О возможности применения индуктивных накопителей ни в выступлениях, ни в вопросах вообще не упоминалось.

Т. Мартин (Сандия, США) изложил программу создания энергетического реактора на основе системы с мощными электронными пучками. В 1981 г. должна быть запущена установка EBFA I с 36 модулями напряжением 2 МВ, током 15 МА и энергией в пучке 1 МДж при длительности импульса 35 нс, а в 1984 г. — установка EBFA II с такими же 72 модулями. В установке EBFA I 36 генераторов Маркса помещаются в одном баке с внешним диаметром 30,5 м, высотой 4,8 м, заполненном трансформаторным маслом (объем масла $1,9 \cdot 10^6$ л). Генератор Маркса разряжается на водяную линию. Энергия передается к мишени по вакуумной линии с магнитной изоляцией длиной 6,8 м. Плотность потока мощности на мишень

в 1982 г. составит 10^{13} Вт/см 2 (EBFA I), а к 1985 г. достигнет $0,5 \cdot 10^{15}$ Вт/см 2 (EBFA II).

Развитие исследований в Сандиевской лаборатории по передаче энергии в вакууме, повышению плотности энергии в модуле, увеличению импульсной прочности изоляции позволит в относительно недорогих установках превзойти мощность 100 ТВт. В частности, говорилось о возможности поднять мощность до 400 ТВт при полной энергии пучка 16 МДж.

Дж. Дженсен (Лос-Аламос, США) доложил о проекте «Антарес» — CO_2 -лазерной установки с энергией 100 кДж и плотностью потока мощности $3 \cdot 10^{16}$ Вт/см 2 . Ее сооружение начато в 1979 г. Представлен обзор по системам с инерциальным удержанием. Отмечено, что результаты исследований по синтезу с инерциальным удержанием могут быть использованы в военных разработках. Об этом сказал и представитель Министерства обороны США.

Таким образом, к 1982—1984 гг. на всех крупных установках мощность на мишени достигнет 100—300 ТВт. Они явятся прототипами реакторов. После сравнения и анализа результатов будет выбрано наиболее перспективное направление, и в 1987 г. планируется создать инженерный опытный реактор, в 1995—1997 гг. — инженерный прототип реактора, а в 2004 г. — демонстрационный.

Доклады на секциях в основном были посвящены узлам и элементам таких установок. В большей части докладов рассматривались коммутационная аппаратура, главным образом, разрядники (эрозионная стойкость электродов, снижение разброса времени срабатывания, уменьшение индуктивности канала разряда, согласование импедансов разрядника и передающей линии и т. п.). Хорошие результаты получены при поджиге разрядников лазером с помощью волоконной оптики, причем задержка регулируется длиной оптического канала.

В докладе группы сотрудников Научно-исследовательской лаборатории военно-морского флота обсуждалась возможность получения мощных сильноточных разрядных импульсов с помощью индуктивного накопителя, который заряжается гомополярным генератором и разряжается по трансформаторной схеме. Ток вторичной цепи 0,5 МА переключается на нагрузку при напряжении 0,5 МВ. Первичная обмотка предварительно отключается от генератора и нагружается на защитное сопротивление. Эффективность передачи энергии в цепь вторичной обмотки зависит от напряжения, которое выдерживает отключатель источника зарядки. В другом докладе тех же авторов сообщается о мощном генераторе мегавольтовых импульсов «Трайидент». Коаксиальный индуктивный накопитель с индуктивностью 3,5 мкГн заряжается током 500 кА от конденсаторной ба-

тарей (60 кВ) с энергией 500 кДж. Ток переключается трехступенчатым коммутатором (размыкатель с взрывным приводом параллельно со взрывающимися током фольгами и проволочками). На активной нагрузке 7,5 Ом получен импульс напряжения с амплитудой 500 кВ и временем нарастания 150 нс. Ожидается, что при оптимизации параметров переключающих взрывающихся проводников удастся приблизиться к напряжению 1 МВ, превысив уровень разрядной мощности 10^{11} Вт. В дальнейшем предполагается заменить конденсаторную батарею гомополярным генератором, что позволит повысить ток разрядного импульса до 1 МА, а энергию до 1 МДж.

Д. Смит, Р. Хендерсон и Р. Рейновски (Научно-исследовательская лаборатория военно-воздушных сил) как перспективные рассмотрели такие коммутаторы, принцип действия которых основан на использовании движущегося или сходящегося плазменного образования. Р. Уоррен (Лос-Аламос) доложил о вакуумном переключателе постоянного тока 25 кА при напряжении 25 кВ с ресурсом не менее 10^4 срабатываний и надежностью не ниже 99%. Основа конструкции — промышленный образец вакуумного переключателя переменного тока фирмы «Вестингауз». Для переключения тока индуктивного накопителя изменяются только привод и схема гашения дуги встречным импульсом. В другом докладе, представленном Лос-Аламосской лабораторией, сообщается о разработке такого же коммутатора для переключения тока 80 кА при напряжении 70 кВ.

В докладе У. Брукса и др. (Сандия) рассматривается система «Пульсар» с выводом энергии из индуктивного накопителя методом вытеснения магнитного потока движущимся проводящим поршнем без разрывной коммутации. Начальная энергия запасается сверхпроводящим соленоидом, окруженным экраном из обычного проводника. Экран защищает сверхпроводник от перегрузок по току при выводе энергии. Обмотка связи, окружающая соленоид, соединена с нагрузкой. При вытеснении магнитного потока движущимся проводником в индуктивной нагрузке генерируется мощный импульс тока. В другом сообщении о системе «Пульсар» отмечается, что генераторы такого типа разрабатываются для будущих термоядерных реакторов. Представлены исходные данные для разработки сверхпроводящего магнита, с помощью которого можно передать в нагрузку энергию до 40 МДж. Рассчитаны импульсные магнитные поля экранирующей и генераторной обмоток, температуры, до которых они разогреваются, механические усилия и влияние краевого эффекта.

Сотрудниками Центра электромеханики Техасского университета сообщены новые сведения о действующем гомополярном генераторе с энергией 5 МДж, обсуждены вопросы, связанные с устройством, применением и возможностями генератора компрессионного типа — «Компульсатора». В настоящее время действующий гомополярный генератор с энергией 5 МДж является источником энергии для различных научных и технологических экспериментов. Конструктивные изменения позволили сократить длительность разрядного импульса до 5 мс. Принцип действия «Компульсатора» основан как на магнитной индукции, так и на компрессии магнитного потока вращающейся рамкой, соединенной последовательно с неподвижной, плоскостью которой параллельна внешнему магнитному полю. Длительность генерируемого импульса

составляет часть периода вращения. Эффективно такой генератор может работать только на активную и емкостную нагрузки. Рассматриваются различные факторы, ограничивающие возможности такого метода генерации, связанные с механическими, теплофизическими, магнитными и электрическими свойствами материалов. С учетом этих ограничений определяются зависимости энергии и мощности импульса от размеров системы. Описан проект генератора с напряжением 6 кВ и током 70 кА, выделяющего в ксеноновых лампах накачки энергию 200 кДж в течение 500 мкс. Представлен доклад по механической проработке генератора с током 150 кА и максимальной частотой вращения 5400 об/мин. Сообщается о разработке модели и особенностях четырехполюсного генератора для ламп накачки системы «Нова».

По системам для релятивистских электронных пучков М. Батрэм (Сандия) доложил о работе катодов в частотном режиме при анодном напряжении 350 кВ и частоте до 100 Гц. Д. Фенеман и Р. Гришшовер (представители исследовательского центра военно-морских сил) исследовали пробой дистиллированной воды. В промежутке 0,25—1 см электрическое поле изменялось от 0,1 до 0,5 МВ/см. По мнению авторов, при времени 1—20 мкс в таких условиях максимальная напряженность электрического поля составит 0,275 МВ/см.

Из докладов о крупных системах следует отметить сообщение Дж. Боллера и др. (Научно-исследовательская лаборатория военно-морского флота США) о реконструкции установки «Гамбл», в результате которой при энергии ГИН, равной 267 кДж, удалось передать в линию энергию 142 кДж с пиковой мощностью 1,78 ТВт. Таким образом, лазерной и лучевыми программами в США по-прежнему руководит Министерство обороны США, причем все большее внимание уделяется решению инженерных задач. В работах по инерциальному термоядерному синтезу кроме специалистов по физике плазмы участвуют представители всех необходимых смежных областей, что способствует высокому уровню работ.

Основные усилия по развитию техники индуктивных накопителей направлены на получение мощных импульсов мегавольтного диапазона с энергией масштаба 1 МДж. Не проявляется интереса к их применению для ламп накачки в мощных лазерных системах. Вообще не обсуждались вопросы, связанные с особенностями вывода энергии из секционированных индуктивных накопителей. Любопытна разработка системы «Пульсар», перспективной как в плане применения в термоядерных реакторах, так и для создания мощных генераторов, не требующих разрывной коммутирующей аппаратуры.

Ведется тщательная проработка мощных компрессионных генераторов с вращающимися массами, способных генерировать импульсы с длительностью короче полуцикла оборота. Особый интерес к таким генераторам связан с возможностью их прямого использования для ламп накачки стеклянных лазеров. Продолжаются работы по сокращению разрядного импульса гомополярного генератора до нескольких миллисекунд. По-прежнему отсутствует интерес к системам на основе серийно выпускаемых промышленностью мощных турбо- и гидрогенераторов с преобразовательными-выпрямительными устройствами.

ИВАНОВ И. А., ЛАРИОНОВ Б. А., ПАСЕЧНИКОВ А. М.