

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

533.9

ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ И ПУЧКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ *)**Дж. Ионас**

Один из подходов к иницированию реакции термоядерного синтеза основан на сжатии мишени ядерного топлива с помощью внешнего источника энергии. В США и СССР проводятся исследования возможности использования в качестве такого источника энергии мощных пучков заряженных частиц.

Реакция термоядерного синтеза — разновидность ядерной реакции, сопровождающейся превращением массы в энергию внутри Солнца и звезд. Эта реакция рассматривается в качестве одного из наиболее обещающих источников электрической энергии в следующем столетии и для более отдаленного будущего. Исследования в этой области получили значительный импульс после драматических событий нефтяного эмбарго 1973 г., и, как результат возросших усилий, за последние годы здесь достигнут весьма существенный прогресс. В настоящее время многие исследователи полагают, что научно обоснованная возможность получения термоядерной энергии будет продемонстрирована в течение следующего десятилетия. Этот период времени можно назвать решающим, так как несколько крупных экспериментов из разряда «подтверждающих основной принцип» должны быть закончены в 80-е годы.

Попытки продублировать процесс термоядерного синтеза в управляемом виде сконцентрировались главным образом на схемах с магнитным удержанием плазмы, в которых нагретое газообразное топливо (смесь дейтерия и трития — двух тяжелых изотопов водорода) удерживается внутри вакуумной камеры реактора с помощью сильных магнитных полей, и в меньшей степени на схеме инерционного удержания плазмы (inertial-confinement scheme), в которой мощные пучки лазерного излучения используются для создания направленного внутрь взрыва в крошечных мишенях из смеси дейтерия и трития. В течение последних нескольких лет мои коллеги и я в лабораториях «Сандиа» в Альбукерке, шт. Нью-Мексико, а также более обширная группа исследователей из Института атомной энергии им. И. В. Курчатова в Москве разрабатывали другой подход к осуществлению термоядерной реакции по методу инерционного удержания. Вместо лазерных пучков здесь используются мощные пучки электронов (РЭП) (а совсем недавно и пучки ионов), генерируемых с помощью высокопоточных и высоковольтных электрических импульсов.

*) Y o n a s Gerold. Fusion Power with Particle Beams. — Sci. American, November 1978, v. 239, No. 5, pp. 40—51. — Перевод А. А. Раддига.

Дж. Ионас — специалист по высокопоточным пучкам заряженных частиц, руководитель отдела термоядерных исследований в лабораториях «Сандиа», Альбукерк, шт. Нью-Мексико, США.

Такой подход к проблеме сжатия термоядерной мишени является потенциально эффективным, простым и сравнимым по экономичности с другими, однако подобно всем известным подходам к инициированию реакции термоядерного синтеза он требует решения целого ряда сложных технических проблем. Впрочем, мы можем отметить многообещающий прогресс в наших достижениях. По этой причине данная «темная лошадка» на скачках за обладание термоядерной энергией привлекает все больший интерес. Вполне возможно, что победитель этого всемирного соревнования пойдет дальше доказательства научной осуществимости поджига термоядерной реакции к первым экспериментальным реакторам и, следовательно (видимо, в начале следующего века), к созданию демонстрационной термоядерной электростанции.

□

Идея слияния ядер атомов водорода, которое сопровождается высвобождением энергии, пригодной для выработки электроэнергии, представляется привлекательной по нескольким причинам. Количественную оценку потенциальной выгоды управляемого термоядерного синтеза можно получить, если вспомнить, что с одного наперстка топлива из жидкого тяжелого водорода должно выделиться столько же энергии (в форме кинетической энергии быстрых нейтронов), что и при сгорании 20 т угля. Но еще более важным является тот факт, что это топливо легко доступно. Дейтерий содержится в любой природной воде, а тритий можно синтезировать при облучении лития нейтронами вblankете, окружающем термоядерный реактор. Если произвести разумный выбор материалов для стенок рабочей камеры термоядерного реактора, то радиоактивность продуктов его работы будет ниже, чем у ядерного реактора деления. Кроме того, в данном случае не может произойти плавление активной зоны реактора (предположительный тип аварии, способствовавший началу обширных дискуссий об атомных энергетических установках).

Природа так устроена, что риск и награда соседствуют вместе, и часто процессы, которые потенциально несут в себе наибольшую выгоду для человечества, могут быть реализованы с максимальными же трудностями. Так обстоит дело и с овладением термоядерной энергией. После почти трех десятилетий затраченных усилий поджиг термоядерной реакции (т. е. эффективное выгорание дейтерия и трития) осуществлен лишь одним путем — взрывом водородной бомбы. Более того, реакция синтеза инициирована в данном случае только с помощью пускового устройства на реакции деления тяжелых ядер (атомной бомбы), которое обеспечивает получение очень высокой температуры и степени удержания, необходимых для слияния ядер водорода.

Необходимые условия получения сколько-нибудь значимого выхода чистой мощности в реакциях синтеза ядер дейтерия и трития выглядят фантастически грозно: температура должна составлять около 100 млн. градусов, а комбинация двух множителей, один из которых характеризует время удержания плазмы (в секундах), а другой — плотность вещества топлива (в частицах/см³), должна превышать величину 10¹⁴. Высокая температура необходима для сообщения ядрам скоростей, достаточных для преодоления электрических сил взаимного отталкивания при их столкновениях. Требуемые значения времени удержания и плотности частиц плазмы обеспечивают достаточное число столкновений ядер для эффективного протекания реакций.

В случае схемы с магнитным удержанием плазмы плотность частиц топлива должна быть достаточно низкой из-за практических пределов достижимой напряженности магнитных полей. Вследствие этого для обес-

печения существенного выгорания топлива необходимо достичь времени его удержания, равного секундам или минутам. В случае инерционного удержания плазмы происходит интенсивный нагрев топлива из-за крайне высокой степени сжатия рабочей смеси (как правило, в 1000 раз по сравнению с исходной плотностью твердого топлива) и в этих условиях реакция синтеза протекает настолько быстро, что горение происходит в действительности как взрыв умеренной силы. Поскольку сжатое топливо удерживается собственной силой инерции, то оно сгорает еще до разлета в стороны (за время, меньшее одной миллиардной доли секунды).

С ростом стоимости исследований по этой проблеме развернулись обширные дискуссии не только о потенциальной выгоде реакций термоядерного синтеза, но также и об их возможных недостатках. Один из таких вопросов состоит в том, что если даже физические проблемы будут разрешены и необходимая технология получит адекватное развитие, все равно сложность оборудования, требования к материалам и общая стоимость проекта могут воспрепятствовать внедрению нового источника энергии. Электротехнические кампании уже проявили заинтересованность в небольших, относительно дешевых демонстрационных экспериментах, которые при необходимости можно быстро развернуть и легко перестроить после того, как накоплен необходимый опыт работы. Термоядерный реактор на основе инерционного удержания плазмы может более полно удовлетворить этому требованию, поскольку в нем не используются большие магниты со сверхпроводящими обмотками и некоторые другие дорогостоящие и сложные элементы, необходимые для систем с магнитным удержанием плазмы. Вместо этого в таком реакторе достигается удержание плазмы при направленном воздействии мощного источника энергии (лазерного луча или пучка частиц) на внешнюю поверхность сферической мишени, которое приводит к испарению вещества с поверхности и создает за счет силы отдачи направленное к центру ускорение внутренней части мишени, состоящей из дейтерий-тритиевой смеси. В процессе сжатия оболочки не только происходит нагрев термоядерного топлива до температуры поджига реакций синтеза, но также возрастает и количество сжигаемого топлива.

Термоядерный реактор на основе магнитного удержания плазмы можно уподобить печи, которая должна располагать системами поджига топлива, его загрузки и удаления отходов и время сгорания топлива в которой велико по сравнению со временем поджига. С другой стороны, импульсному термоядерному реактору на основе инерционного удержания плазмы необходима эффективная система поджига с высокой частотой повторения импульсов и непрерывная подача недорогих мишеней топлива, которые вводятся в рабочую камеру реактора и поджигаются в один и тот же момент времени *). В гипотетическом импульсном термоядерном реакторе с инерционным удержанием плазмы каждая десятипятая доля грамма топлива будет поджигаться через одну десятую долю секунды с помощью внешнего импульса мощностью 100 млрд. кВт, и в результате протекания реакций выделится в среднем тепловая мощность около 1 млн. кВт. (Обыкновенная автомобильная свеча передает примерно 100 Вт мощности в камеру сгорания двигателя.) При использовании традиционного цикла преобразования тепловой энергии в электрическую и системы поджига с показателем эффективности 20%, рассматриваемая электрическая станция с термоядерным реактором на основе инерционного удержания плазмы способна вырабатывать около 350 тыс. кВт электрической

*) Продолжая аналогии, можно сравнить импульсный термоядерный реактор с двигателем внутреннего сгорания, в котором энергия выделяется в виде периодически повторяющихся кратковременных взрывов горючего. (Прим. перев.)

мощности, что достаточно для снабжения города с населением 175 тыс. человек. (Напомним, что приведенная выше цифра в 100 млрд. кВт характеризует пиковую мощность импульса, тогда как его средняя мощность составляет всего лишь около 20 тыс. кВт.)

Во многих отношениях лазеры являются идеальным источником облучения мишеней термоядерного топлива. С их помощью удастся генерировать очень короткие импульсы излучения (длительностью 10^{-9} с или

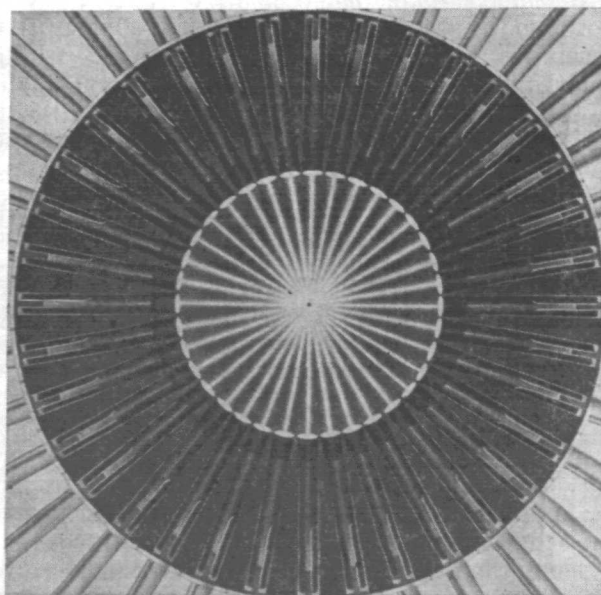


Рис. 1. Тридцать шесть электронных пучков будут сфокусированы на мишень из дейтерий-тритиевой смеси в экспериментальном термоядерном реакторе на основе РЭП, который создается в лабораториях «Сандиа».

На рисунке изображено сечение рабочей камеры реактора в горизонтальной плоскости; радиус камеры составит 42 дюйма (1066,8 мм). Электронные пучки (светлые линии) инжектируются в камеру через передние концы 36 независимых линий генератора, и последние 18 дюймов (457,2 мм) пути перед мишенью будут транспортироваться по каналам в плотной замагниченной плазме, образованной в воздухе внутри рабочей камеры реактора. Ожидается, что в конце 1979 г., когда закончится монтаж установки и подготовка ее к пробному пуску, на ней можно будет генерировать и передавать на поверхность мишени импульсы электронов с суммарной мощностью 30 ТВт, причем планируемое максимальное повышение уровня мощности может вдвое превысить указанный показатель к 1983 г. Эксперименты с поджигом импульсной термоядерной реакции в мишени планируются на 1985 г. Генератор можно будет приспособить для экспериментов по инерционному термоядерному синтезу с пучками ионов.

меньше) и легко фокусировать их с помощью линз или зеркал на поверхность мишени. За последние годы исследования по лазерному термоядерному синтезу достигли значительного прогресса и в настоящее время под эгидой министерства энергетики США проводится разработка мощных неодимовых лазеров и лазеров на CO_2 с целью демонстрации до 1985 г. условий протекания реакций синтеза с «нулевым выигрышем по энергии».

Лазерам, однако, присущи два серьезных недостатка: они обладают низким к. п. д. и их стоимость непрерывно растет. Так, например, к. п. д. наиболее распространенного (среди мощных лазеров) неодимового лазера достигает только 2%, а текущая стоимость выработки на нем единичной энергии равна приблизительно 500 долл./Дж. Полный к.п.д. лазера на CO_2 находится по оценке в интервале 5—10%, причем для современных моделей этот показатель равен 2—3%. Широкое обсуждение вызывает

вопрос выбора идеальной длины волны лазерного излучения для целей термоядерного синтеза. В направлении разработки эффективных коротковолновых лазеров ведутся энергичные исследования. Главным образом малая эффективность лазеров по отношению к преобразованию входной энергии в энергию излучения вызвала теперешний интерес к использованию мощных пучков электронов или ионов для целей поджига реакций синтеза в веществе мишени.

Возможность применения пучков частиц в термоядерном реакторе была подготовлена развитием техники получения сверхмощных импульсов, берущим свое начало от середины 60-х годов. Работы в этой области были поддержаны Комиссией по атомной энергии (КАЭ) и министерством обороны США и ставили перед собой целью разработку источников излучения для проверки выживаемости межконтинентальных баллистических ракет против воздействия мощных импульсов излучения из головной части противоракет. Для имитации этих радиационных эффектов были необходимы мощные импульсы рентгеновских лучей. Исследования показали, что в качестве источника такого излучения могла служить тонкая фольга из металла, например тантала, которая взрывается при падении на нее электронного пучка, сформированного при высоковольтном разряде с напряжением во много миллионов вольт. С целью получения мощных импульсов рентгеновского и γ -излучения группа исследователей из лабораторий «Сандиа» (во главе с Т. Г. Мартином) в сотрудничестве с Дж. К. Мартином из британской исследовательской организации по разработке атомного оружия (British Atomic Weapons Research Establishment) разработала к 1967 г. генератор электронных пучков, способный передать максимальную энергию в 100 кДж на рентгеновскую трубку при электрическом потенциале 10 МВ. Этот генератор мощностью 1 млрд. кВт, названный «Гермес», и аналогичная установка, созданная в лабораториях министерства обороны, воплощали в себе многие компоненты и идеи, которые применяются в современных импульсных генераторах электронных пучков.

□

Генератор мощных электронных пучков является, по существу, чрезвычайно простым устройством, компоненты которого можно купить или заказать в обычной механической мастерской. Основным его элементом служит высоковольтный источник, который накапливает энергию в конденсаторах и с помощью разрядников передает ее в изолированную линию формирования импульсов и далее на диод — двухэлектродную вакуумную лампу. Электроны вытягиваются из плотной плазмы (высокотемпературный газ заряженных частиц), образованной вблизи металлической поверхности катода в результате омического нагрева ее микроскопических неровностей, и ускоряются по направлению к аноду. Обычно считают, что для поджига реакций синтеза в веществе мишени потребуется мощность импульса около 10^{14} Вт. Для переноса такой мощности потоком электронов необходимо, чтобы их рабочий ток составлял от 10 до 100 МА и соответствующее ускоряющее напряжение должно находиться в диапазоне 1 — 10 МВ.

Наиболее мощный из существующих генераторов электронных пучков получил название «Аврора»; он был разработан группой И. Д. Смита из компании «Физикс Интернейшнэл» по заказу министерства обороны и установлен в 1972 г. в армейской лаборатории им. Гарри Даймонда под Вашингтоном, округ Колумбия. Этот генератор на четыре электронных пучка имеет мощность $2 \cdot 10^{13}$ Вт и работает при электрическом потенциале, превышающем 10 МВ, генерируя импульсы с длительностью более чем 10^{-7} с. Хотя рассматриваемая установка и не обладает еще нужными па-

раметрами для проведения экспериментов по инициированию термоядерных реакций с помощью электронных пучков, однако ее очень высокий к.п.д. (50%) и сравнительно низкая стоимость (14,5 млн. долларов) наглядно демонстрируют успехи в технике получения мощных импульсов тока.

Такие критерии устройств поджига реакций синтеза (на основе использования пучков частиц), как к. п. д. и стоимость, еще не были четко сформулированы к моменту, когда первое предложение по их использованию в термоядерном реакторе с инерционным удержанием плазмы было выдвинуто А. Дж. Гейлом из корпорации «Хай вольтидж инджиниринг»

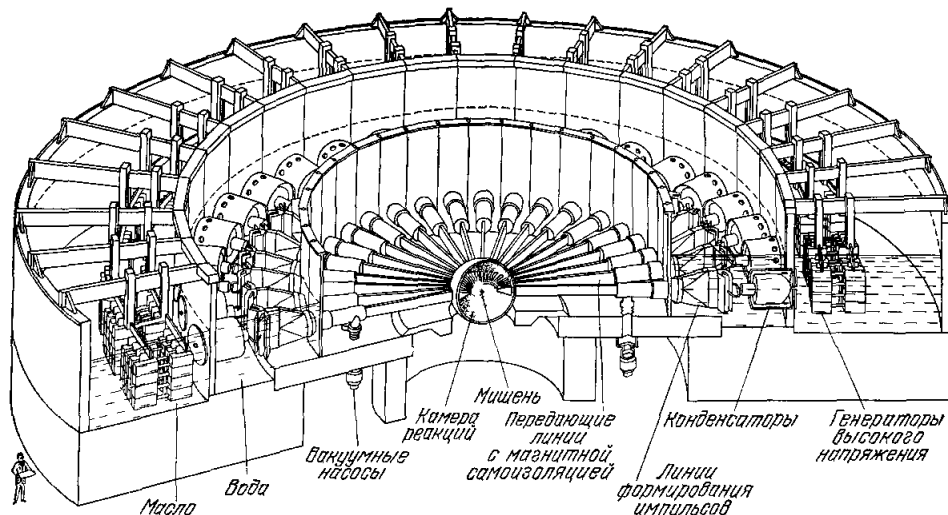


Рис. 2. Общий вид с разрезом наиболее современного генератора мощных электронных пучков для реактора синтеза с инерционным удержанием плазмы, разработанного в лабораториях «Сандиа».

В центре рисунка находится сферический контейнер рабочей камеры реактора. Длина каждой из 36 передающих линий с магнитной самоизоляцией, введенных в камеру реактора, составляет 22 фута (6,7 м). Сами пучки представляют собой высокопоточные импульсы электронов, образованных при электрическом разряде расположенных по кольцу 36 пар линий, формирующих импульсы, которые заряжаются от (бочкообразных) конденсаторов. Во время работы генератора конденсаторы и линии формирования импульсов погружены в жидкий диэлектрик, в данном случае это деионизованная вода (в средней части по среднему кольцу установки). Конденсаторы заряжаются от высоковольтных генераторов, расположенных по внешнему кольцу установки, в которых в качестве изолятора используется трансформаторное масло. Полная энергия, переданная от генератора мощных электронных пучков на поверхность мишени термоядерного топлива, составит по порядку величины 1 МДж. Запланировано создание несколько более мощной экспериментальной установки в СССР.

и защищено патентом США в 1963 г. Фактически А. Дж. Гейл может считаться первым, кто предложил использовать мощные пучки для осуществления термоядерных реакций на основе инерционного удержания плазмы, поскольку лазеры находились еще в стадии изобретения к моменту, когда он оформил свою заявку на патент в 1960 г. Вскоре после этого Ф. Винтерберг из «Кейс Института оф технолоджи» рассмотрел возможность использования сверхзвукового потока небольших крупинок вещества с целью достижения условий поджига реакций синтеза при их столкновениях с мишенью ядерного топлива. Однако к 1967 г. Ф. Винтерберг убедился в том, что значительно проще можно создавать мощные пучки электронов или ионов. В период времени между 1964 и 1967 гг. группа исследователей из компании «Физикс Интернейшнэл» под руководством Ф. К. Форда также провела анализ условий поджига реакций синтеза на

основе РЭП в ходе выполнения их пионерской работы по технике скейлинга мощных разрядных импульсов вплоть до уровней мощности порядка 10^{11} Вт.

Как отмечал Л. И. Рудаков, руководитель советской программы работ по мощным электронным пучкам, в 1968 г. академик Е. К. Завойский из ИАЭ им. И. В. Курчатова также поддержал направление работ по инерционному термоядерному синтезу на основе электронных пучков, хотя первое опубликованное сообщение советских ученых появилось только в 1971 г. Несмотря на столь устойчивый интерес к обсуждаемой здесь проблеме, лишь демонстрация возможностей увеличения масштабов экспериментов и проверка улучшенной техники фокусировки пучка на мишень (эти работы были выполнены в лабораториях «Сандиа» и некоторых других лабораториях в начале 70-х годов) явились толчком для поддержки этого направления исследований со стороны КАЭ в 1973 г.

Имея в виду очевидную эффективность, простоту и низкую стоимость генераторов мощных электронных пучков (даже сегодня их стоимость составляет по оценке около 2% от аналогичного показателя для лазеров с той же энергией) вполне уместно спросить, почему потенциальные возможности термоядерного синтеза на основе РЭП были осознаны настолько поздно. Ответ заключается в том, что этот подход к управляемому термоядерному синтезу, подобно всем другим подходам, выдвигает перед исследователями ряд фундаментальных проблем, которые еще далеки от решения. Эти проблемы включают генерацию импульсов тока силой несколько мегаампер с длительностью десятков наносекунд, получение жестко сфокусированных пучков заряженных частиц, транспортировку пучков к мишени и взаимодействие частиц пучка с мишенью. За сравнительно короткое время, однако, как в нашей лаборатории, так и в других лабораториях было сделано несколько важных открытий и усовершенствований в рамках работ по РЭП, причем в процессе освоения этих достижений и получении на их основе более существенных результатов были продемонстрированы такие важные черты техники создания мощных пучков частиц, как достаточная гибкость к нововведениям и дешевизна.

□

По всей видимости, наибольший прогресс был достигнут в вопросе более глубокого понимания природы процессов, происходящих в электронных пучках, и способах их фокусировки. Поскольку электроны являются заряженными частицами, то они отталкиваются друг от друга и их фокусировка представляет значительно более сложную проблему, чем в случае фотонов лазерного излучения. Давнюю проблему удалось преодолеть только на основе изучения эффекта «самопичивания» магнитного поля в сильноточном пучке, нейтрализующего электрические силы отталкивания между электронами. Близко расположенные металлические поверхности электродов в сильноточном диоде снижают силу отталкивания между электронами, а магнитное поле пучка заставляет электроны вращаться вокруг оси диода. После радиального дрейфа электроны фокусируются на анод в месте пересечения его поверхности с осью диода, где индукция магнитного поля падает до нуля. Это явление, впервые исследованное экспериментально Ф. У. Спенсом и мною в 1967—1968 гг. в лабораториях «Физикс Интернейшнэл», было впоследствии объяснено более подробно Дж. У. Поуки из лабораторий «Сандиа», который выполнил машинное моделирование процессов движения роя электронов через диод. Аналогичные же результаты получил С. А. Голдстейн из лаборатории «Нэвал Рисч», моделировавший работу сильноточного диода с помощью простых аналитических методов.

В настоящее время известно, что на эффекте самофокусировки электронов существенно сказывается поток ионов из плазмы, образованной вблизи анода вакуумного диода. Этот ионный поток направляет динамику пинчевания пучка электронов. В 1973 г. мы сумели добиться усиления

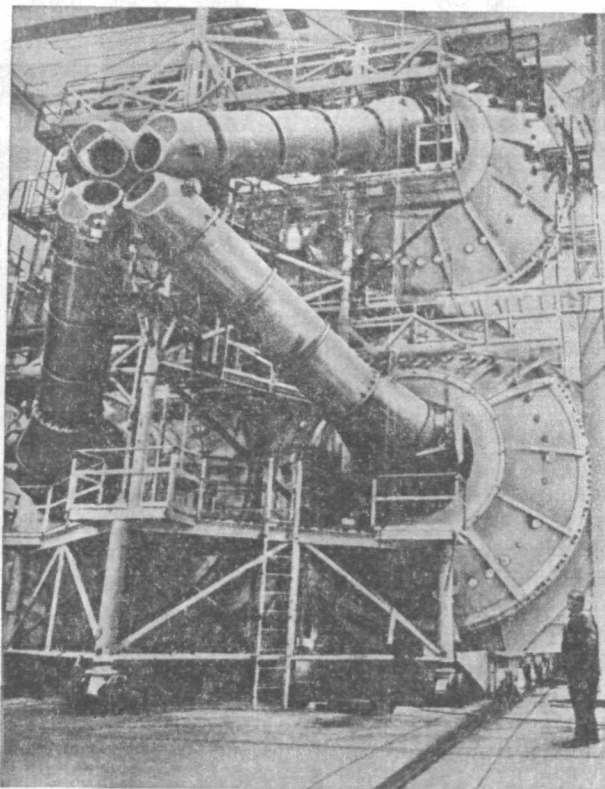


Рис. 3. «Аврора» — наиболее мощный из существующих генераторов электронных пучков — была построена по заказу министерства обороны США компанией «Физикс Интернейшнэл» с целью проверки выживаемости межконтинентальных баллистических ракет против имитационных вспышек излучения от головных частей противоракет.

Установка была сфотографирована в армейской лаборатории им. Гарри Даймонда под Вашингтоном, округ Колумбия; она генерирует четыре электронных пучка с суммарной мощностью 20 ТВт. Рабочее напряжение генератора превышает 10 МВ, а длительность импульсов электронного тока составляет 100 нс. Хотя «Аврора» и не обладает параметрами, необходимыми для экспериментов по термояду, ее создание продемонстрировало потенциальный уровень техники получения мощных импульсов тока.

характера фокусировки электронного пучка позволили также установить, что сильноточный пучок электронов напоминает своим поведением скорее газ, чем сгусток частиц, следующих параллельными траекториями к мишени. Хаотическое движение электронов в пучке позволяет им равномерно распределиться по сферической поверхности мишени при облучении последней одним-единственным импульсом. Этот метод облучения термоядерной мишени одним пучком электронов использовался нами в первых успешных экспериментах, закончившихся регистрацией нейтронов.

эффекта пинчевания пучка на установке в лаборатории «Сандиа» путем предварительного взрыва тонкой проволоки, натянутой вдоль оси диода, которая служила дополнительным источником плазмы. В настоящее время с помощью техники формирования «пассивной» плазмы можно получить плотный электронный пучок диаметром два миллиметра. Наибольшее значение плотности мощности в пучке, достигнутое с такими диодами, было получено в ИАЭ им. И. В. Курчатова; руководитель этих работ Л. И. Рудаков сообщил о том, что этот показатель превысил 10^{13} Вт/см². Диоды для получения мощных электронных пучков эффективно работают вплоть до уровней тока порядка миллиона ампер, и в настоящее время существует надежда, что при одновременной работе менее чем 100 диодов удастся достичь суммарной мощности импульса электронов, необходимой для поджига реакций синтеза в мишени термоядерного топлива. Исследования

Помимо достижений в деле фокусировки пучков частиц, за последние пять лет были во многом решены вопросы совершенствования техники генерации мощных импульсов. Это стало возможным благодаря разработке мощных коммутаторов и лучшему пониманию процессов электрического пробоя. До сих пор мы располагали возможностями коммутации импульсов мощностью до 8 ТВт и продолжительностью до 24 нс. Представляется маловероятным, что при существующих конструкциях мишеней для пучков частиц понадобятся более короткие импульсы. В 1974 г. К. Р. Прествич из нашей лаборатории разработал систему быстрой коммутации высокого напряжения в масляном диэлектрике, в которой использовались управляемые коммутаторы типа рельсовых разрядников (triggered rail-gap switches) (соответствующая идея была высказана Дж. К. Мартином). С помощью этой техники удалось довести уровень мощности коммутируемых импульсов до триллиона ватт.

При необходимости повышения плотности энергии в электрической цепи масляный диэлектрик заменялся на воду и устанавливалась система коммутации, отличавшаяся от рассмотренной ранее. (Чистая вода является превосходным изолятором для периодов времени от 1 до 2 мкс; ее диэлектрическая постоянная в 81 раз превосходит соответствующий показатель для вакуума, который в свою очередь близок по диэлектрическим свойствам маслу — диэлектрическая постоянная масла лишь в три раза выше, чем у вакуума.) Необходимость в новом коммутаторе импульсов при использовании в качестве диэлектрика воды диктовалась тем, что при более коротких линиях передач напряжения с повышенным уровнем плотности энергии оставалось мало места для управляемого коммутатора. Решение данной проблемы было найдено на пути использования «самоподжигающегося» коммутатора, к которому дополнительно была придана линия формирования импульсов, обеспечивающая скачок напряжения

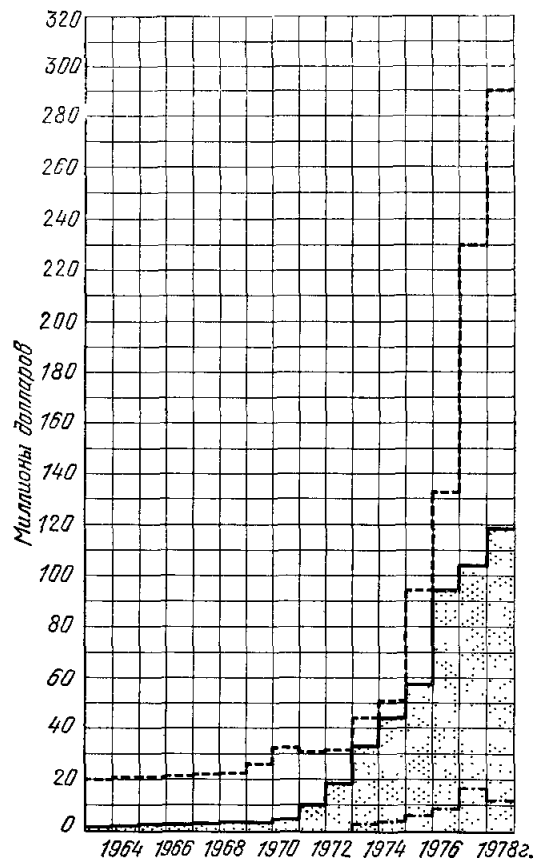


Рис. 4. На гистограмме изображены уровни ежегодного финансирования различных программ термоядерных исследований в США. Бюджет исследований по программе УТС с магнитным удержанием плазмы (штриховая линия) оставался практически неизменным в период с 1958 по 1974 г., когда начался быстрый рост до теперешнего уровня, составляющего около 300 млн долл./год. Бюджет исследований по программе УТС с инерционным удержанием плазмы (сплошная линия) начал расти с 1971 г. и к 1973 г. достиг уровня, сравнимого с размером ассигнований на программу УТС с магнитным удержанием плазмы. В настоящее время доля затрат на программу УТС с инерционным удержанием плазмы (включая оба метода поджига реакций синтеза — лазерным излучением и мощными пучками частиц) составляет около 30% в суммарном бюджете США на исследования по программе УТС. В свою очередь бюджет исследований по программе УТС на основе мощных пучков частиц (штрихпунктирная линия) занимает долю менее 3% в федеральном бюджете в целом по программе УТС.

достаточно быстрый для того, чтобы возникали множественные пробой и образовывалось большое число токопроводящих каналов в воде. Коммутатор такого типа применялся в системе генерации импульсов тока на 5 МА с фронтом (время достижения максимума) менее 20 нс.

□

Хотя техника передачи мощных импульсов тока через жидкие диэлектрики и получила быстрое развитие, из-за электрического пробоя в самом генераторе еще долго оставалась нерешенной более трудная проблема пространственной локализации импульса. Наиболее слабым звеном в цепи сжатия сигнала оказалась твердая изолирующая прослойка между линией формирования импульсов с водяной изоляцией и камерой вакуумного диода, содержащей мишень термоядерного топлива. Сделанная из пластика прослойка могла обычно выдерживать механическое напряжение, развиваемое действием электрического поля с градиентом 100 кВ/см и, следовательно, на квадратный сантиметр ее поверхности могло приходиться лишь 25 МВт электрической мощности. В силу этого ограничения необходимые для развития реакций синтеза 10^{14} Вт мощности можно было пропустить через прослойку площадью $4 \cdot 10^8$ см². При увеличении времени нарастания импульса можно было повысить плотность мощности до 100 МВт/см², но все же передача необходимой мощности через единственный тракт модуля представляла бы большие практические трудности и с неизбежностью потребовала бы сведения очень мощного пучка электронов на маленькую мишень на длине в несколько метров.

Решение данной проблемы было найдено в результате работ, выполненных в нескольких исследовательских центрах: «Физикс Интернейшнэл», ИАЭ им. И. В. Курчатова и «Сандиа». Разработанный подход основывался на использовании передающих линий с магнитной самоизоляцией. Характерной особенностью такой линии является повышение ее электропрочности в вакууме по сравнению с аналогичным показателем для жидких или твердых диэлектриков. В обычных условиях (при транспортировке маломощного импульса по вакуумной передающей линии) электроны вылетают с поверхности отрицательно заряженного электрода при достижении напряженности поля, превышающей 200 кВ/см. При этом значительная доля энергии теряется на малом отрезке линии вместо того, чтобы транспортироваться вдоль линии в виде электромагнитной волны. В силу этого ограничения при передаче короткого импульса в вакууме максимальное значение плотности мощности может составить 100 МВт/см², так что по коаксиальной линии с нужными размерами, скажем с диаметром 30 см, можно транспортировать импульсы мощностью чуть выше 100 ГВт.

Проведенные исследования позволили, однако, установить, что при очень высоких уровнях мощности поперечное магнитное поле в распространяющейся волне меняет орбиты электронов таким образом, что радиус их кривизны становится меньше промежутка между электродами. В итоге при достижении необходимого уровня мощности эмиттированные электроны возвращаются на высоковольтный электрод без потери энергии и, к примеру, по коаксиальной линии диаметром 30 см можно будет передать электрический импульс мощностью более 1 ТВт. Указанный эффект, который в ограниченном виде наблюдается в обычной вакуумной лампе типа магнетрона, был впервые обнаружен в 1967 г. на установке «Гермес». Первый раз возможности данного подхода к передаче мощных электрических импульсов на значительное расстояние были продемонстрированы на ускорителе «Аврора» в 1972 г. По его четырем коаксиальным линиям (длиной более шести метров) эффективно передавался импульс суммарной мощностью 20 ТВт при напряженности поля 0,5 МВ/см.

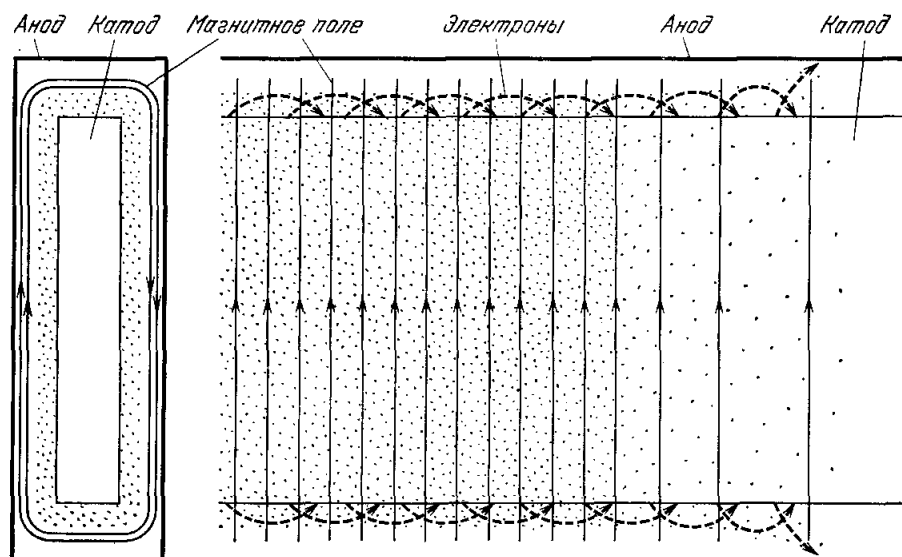


Рис. 5. Импульсы электронов будут транспортироваться по передающей линии с магнитной самоизоляцией к рабочей камере реактора в новой установке по исследованию УТС на основе мощных электронных пучков в лабораториях «Сандиа».

На двух приведенных проекциях передающей линии поток электронов, соответствующий току 1 МА, отмечен точками, причем плотность точек характеризует концентрацию электронов в различных частях импульса. По мере продвижения импульса вдоль центрального катода передающей линии образуется поперечное магнитное поле (сплошные стрелки отмечают магнитные силовые линии), которое препятствует электрическому пробое через вакуумный зазор, разделяющий катод и окружающий его анод. На пути перед импульсом эмиттированные с катода электроны (их траектории отмечены штриховыми стрелками) стремятся достичь поверхности анода, и это приводит к потерям энергии. Однако в области расположения импульса самогенерируется сильное магнитное поле, которое направляет движение потока электронов назад к поверхности катода.

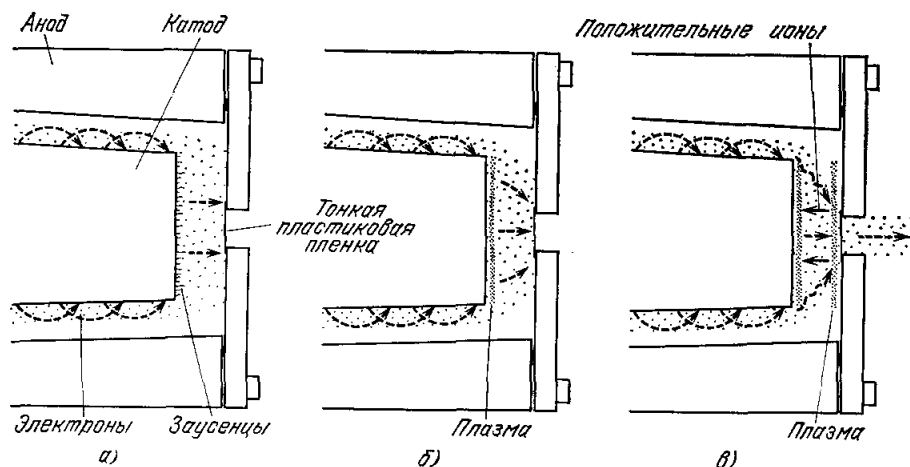


Рис. 6. Эффект самофокусировки электронного пучка делает возможным фокусировку потока электронов, распространяющегося вдоль катода в передающей линии с магнитной самоизоляцией, на поверхность анода в месте пересечения ее с осью установки, где магнитное поле спадает до нуля.

На этом эффекте в значительной степени сказывается образование плазменного слоя (маленькие точки) вблизи поверхности как катода, так и анода. Первоначально электроны эмиттируются с микроскопических неровностей («заусенцев») поверхности катода и ускоряются по направлению к аноду в виде относительно нефокусированного пучка (а). Тепловой взрыв нагретых заусенцев приводит к образованию плазменного слоя (нагретого газа заряженных частиц) вблизи поверхности катода, который интенсифицирует поток электронов через зазор между катодом и анодом. Электронный пучок нагревает в свою очередь поверхность анода, и вблизи нее формируется еще один слой плазмы (б). Обратный поток положительно заряженных ионов (сплошные стрелки) из анодной плазмы в направлении катода способствует нейтрализации сил взаимного отталкивания между электронами и тем самым приводит к более жесткой фокусировке электронного пучка перед входом его в рабочую камеру реактора на небольшое отверстие в аноде (в).

Анализ следствий этого важного открытия, включая машинное моделирование соответствующих процессов, занял несколько лет, но лишь в последние два года данная концепция прошла всестороннюю проверку и теперь можно говорить о хорошем уровне понимания этой проблемы. На основе данного принципа в компании «Физикс Интернейшнэл» были выполнены еще более масштабные эксперименты, выявившие возможность

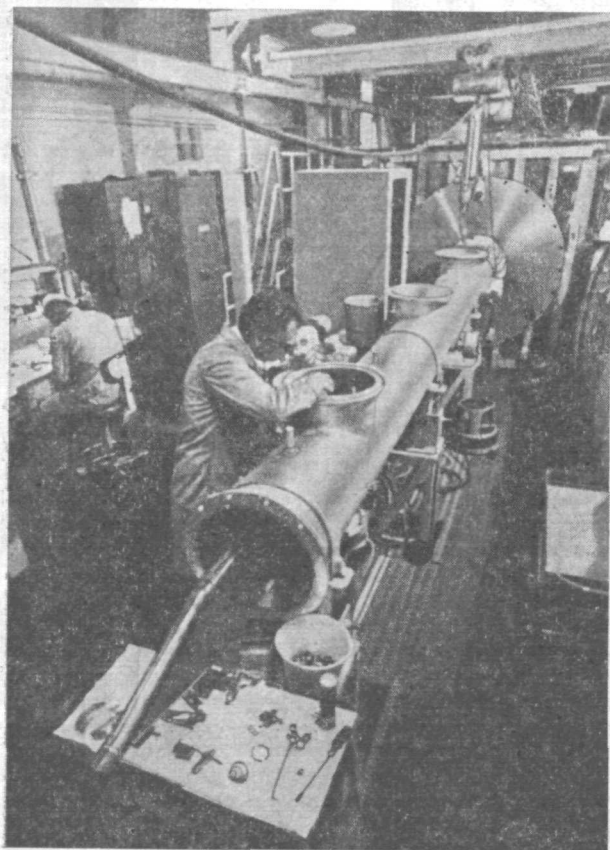


Рис. 7. Прототип одного из модулей для 36-модульного генератора мощных электронных пучков проходит в настоящее время проверку в лабораториях «Сандиа»

К испытательной передающей линии с магнитной самоизоляцией (которая, как видно по фотографии, частично разобрана) подводится импульс электронов от двух компактных линий формирования импульсов с водяной изоляцией (они находятся вне поля зрения позади большой круглой пластины на конце передающей линии). Сама испытательная линия состоит из трех параллельно установленных пластин (один центральный катод охвачен по бокам двумя анодными пластинами), которые заключены в цилиндрическую вакуумную камеру. В процессе проведенных недавно испытаний удалось транспортировать электронный пучок мощностью 890 МВт вдоль передающей линии с показателем эффективности, близким к 100%. Целью этих экспериментов является получение сфокусированного электронного пучка с плотностью мощности в 10 ТВт/см^2 .

топлива. Соответствующие испытания проводятся на одном из модулей, являющемся прототипом для будущего 36-модульного генератора мощных электронных пучков на энергию 1 МДж, который находится сейчас в стадии строительства; эксперименты по инициированию реакций синтеза в веществе мишени запланированы для этой

транспортировки мощных импульсов на расстояние более 7 м с показателем эффективности 77%. Новое машинное моделирование соответствующей двумерной задачи в лабораториях «Сандиа» позволило недавно составить наглядную картину происходящих при этом явлений. Из результатов вычислений следовало, что в начальный момент прохождения электромагнитного импульса эмиттированные электроны достигают внешнего (или заземленного) электрода, но на коротком отрезке времени следования основного сигнала быстро возрастающее магнитное поле заставляет их вернуться назад и в итоге по линии эффективно передается большая часть электромагнитной энергии.

□

Не так давно наша группа в лабораториях «Сандиа» приступила к углубленному анализу эффекта магнитной самоизоляции вакуумных передающих линий с целью дальнейшего повышения плотности мощности передаваемой на мишень термоядерно-

установки на период времени после 1980 г. К испытательной передающей линии длиной 7 м подводится импульс от двух компактных линий формирования импульсов с водяной изоляцией; она представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру, в которую заключены три параллельно установленных электрода. Применение трехэлектродной конфигурации позволило добиться большей концентрации мощности, чем в коаксиальном кабеле. Выполненные П. Дж. ван Девендером эксперименты продемонстрировали практически 100%-ную эффективность передачи по линии импульсов мощностью на уровне 800 ГВт. На небольшом отрезке передающей линии уже удалось достичь значения плотности мощности, превышающего 100 ГВт/см^2 , причем сужение линии позволит еще выше поднять эту величину. Нашей целью является получение на конце передающей линии сфокусированного электронного пучка с плотностью мощности 10 ТВт/см^2 , причем уже достигнутая степень фокусировки вселяет в нас оптимизм, что эта цель будет достигнута.

Транспортировка сфокусированного пучка от конца передающей линии в камеру вакуумного диода с мишенью термоядерного топлива составляет следующее и заключительное звено в цепи передачи энергии к мишени. До той поры, пока не была полностью разработана концепция передающей линии с магнитной самоизоляцией, наши исследования в лабораториях «Сандиа» проводились в основном на генераторах, в которых возбуждаемая в жидком диэлектрике электромагнитная волна проходит через твердую изолирующую стенку вакуумного диода и разделяется на два пучка, дрейфующих радиально от двух катодов к мишени, помещенной на оси диода. Такая конфигурация была выбрана не только из-за наличия фокусирующих сил, естественным образом вызывавших пинчевание электронного пучка, но также и в силу желания добиться однородного облучения мишени термоядерного топлива двумя пучками и предохранить диодный изолятор от воздействия взрывающейся мишени. Ввиду ограничений, вызванных пробоем диэлектрика на поверхности твердого изолятора, рассмотренный подход к проблеме транспортировки энергии на мишень подвергся пересмотру и привел к идее использования передающей линии с магнитной самоизоляцией. Но нерешенной оставалась важная проблема транспортировки сфокусированного электронного пучка от конца изолированной вакуумной линии к центру рабочей камеры реактора, где пучок должен провзаимодействовать с мишенью. Не так давно, однако, был достигнут прогресс в создании необходимого «дистанционного» разделения взрывающейся мишени и инжектора пучка, который обеспечил нормальное распространение сфокусированного электронного пучка.

Исследования характера распространения мощного электронного пучка позволили установить, что плотная сильно замагниченная плазма ведет себя как проводник пучка с очень малыми потерями его энергии на расстояниях до нескольких метров. Неясными оставались, однако, последствия возможной неустойчивости пучка, которая могла привести на микроскопическом уровне к диссипации энергии, а на макроскопическом уровне — к «перекручиванию» пучка или его расслоению на крошечные неустойчивые нити. К изучению указанных эффектов было привлечено внимание многих исследователей, и вывод, следующий из этих работ, состоит в том, что мощные пучки электронов могут нормально распространяться лишь по достаточно плотной плазме с высокой электропроводностью.

Таким образом, вопрос транспортировки пучка на мишень сводится к нахождению удобного способа создания канала плотной замагниченной плазмы, не привлекая для этого массивные катушки возбуждения,

которые могут быть сами повреждены при взрыве мишени. Два года назад П. А. Миллер и автор статьи установили, что контролируемый разряд в воздухе удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к такому плазменному каналу. Этот контролируемый разряд можно зажечь с помощью сравнительно небольшой конденсаторной батареи и использовать не только для создания (нагревом) плазмы в воздухе вдоль узкого канала, но также и для возбуждения магнитного поля, которое направляет пучок частиц к мишени. Визуальное изучение такого плазменного канала методами голографии позволило установить его структуру, а именно, что он состоит из однородной и стабильной центральной части



Рис. 8. Распространение пучка электронов в заполненной воздухом рабочей камере термоядерного реактора будет обеспечено созданием канала замагниченной плотной плазмы, по которому сфокусированный электронный пучок сможет транспортироваться от выходного конца изолированной вакуумной линии до мишени термоядерного топлива, установленной в центре камеры.

В первых планируемых экспериментах на новой установке с 36 электронными пучками в лабораториях «Сандиа» для создания плазменных каналов, по которым будут распространяться пучки, используется разряд на основе взрывающихся вольфрамовых проволок, натянутых между вакуумными диодами и мишенью. Впоследствии планируется использовать для тех же целей пучки лазерного излучения, создающие узкие каналы ионизованного газа на пути к термоядерной мишени. Именно эта схема создания плазменного канала проиллюстрирована на рисунке.

с низкой плотностью, которая окружена более плотной и «холодной» цилиндрической оболочкой газа, выброшенного из его центра. С помощью этой техники в лабораториях «Сандиа» и «Нэвал Рисч» удалось эффективно транспортировать сильнооточные пучки электронов вплоть до сотен килоампер. До сих пор для получения указанного выше разряда использовалась натянутая между конденсатором и мишенью тонкая вольфрамовая проволочка, однако в будущем запланировано создавать канал слабоионизованной плазмы с помощью лазерного излучения, обеспечивая прохождение к мишени термоядерного реактора повторяющихся импульсов электронов. Хотя особенности работы такого реактора начинают привлекать к себе внимание, нашей ближайшей задачей все же остается демонстрация возможности поджига реакций синтеза в мишени термоядерного топлива.

□

Из всех проблем, стоящих перед инерционным термоядерным синтезом на основе электронных пучков, наиболее критической остается проблема передачи энергии пучка в вещество мишени. Для эффективного энерговклада жестких электронов необходимо обеспечить их торможение в тонком внешнем слое мишени. С целью уменьшения количества вещества, в котором происходит торможение частиц и, значит, уменьшения количества энергии, необходимой для нагрева такого вещества, важное значение приобретают эффекты снижения глубины проникновения частиц в вещество, связанные с наличием собственного магнитного поля в пучке или использованием внешних полей. Так, например, пучок электронов с энергией 1 МэВ передает в обычных условиях лишь 10% своей энергии золотой фольге, толщиной 10 мкм. Если, однако, магнитное поле жестко

сфокусированного пучка электронов с током 1 МА углубляется в вещество, то длина пробега электронов существенно снижается и эффективность поглощения энергии может повыситься до 50%.

В известном смысле этот эффект можно приписать магнитному «стоп-пингу» пучка, благодаря которому каждый электрон получает больше возможностей для взаимодействия с атомами вещества фольги путем обычных столкновений. Наиболее впечатляющая демонстрация рассматриваемого эффекта была осуществлена в 1977 г. группой Л. И. Рудакова: появилось сообщение о нагреве золотой фольги толщиной 10 мкм почти до температуры миллион градусов с помощью электронного пучка с энергией 10 кДж, сфокусированного в пятно диаметром 2 мм. Это замечательное достижение, эквивалентное примерно десятикратному увеличению энерговыклада пучка, было частично воспроизведено (при несколько меньших уровнях плотности мощности) в нашей лаборатории.

Если предположить, что проблема эффективной передачи энергии пучка в вещество мишени решена, то следующий вопрос должен касаться конструкции мишени. Из нашего собственного опыта разработки мишеней следует, что для целей инерционного термоядерного синтеза на основе мощных пучков частиц необходимо использовать более крупные (вполне

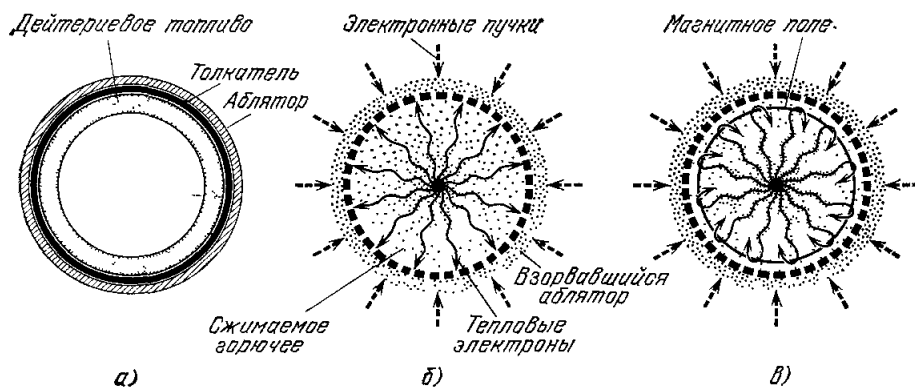


Рис. 9. Процесс сжатия топливной составляющей мишени из тяжелого водорода весьма критически зависит от конструктивных особенностей мишени.

На рис. а) представлена схема конструкции полой многооболочечной мишени, состоящей из внутренней оболочки дейтериевого топлива (область, покрытая точками), внешней оболочки взрывающегося «абляционного» материала (заштрихованная область) и промежуточной оболочки «толкателя» (черная область), которая обеспечивает симметричное сжатие и нагрев термоядерного топлива. Падающие электронные пучки взрывают оболочку абляционного экрана (рис. б)), разгоняя по направлению к центру мишени внутренние слои и поджигая реакции синтеза ядер дейтерия в топливе. Для того чтобы изолировать сжимаемое топливо от окружающей его оболочки (с высокой плотностью вещества) толкателя исследователи в лабораториях «Сандиа» возбуждали внутри мишени магнитное поле с помощью разряда сильноточного импульса через проволочку, вделанную в мишень. При этом энергия, которая в противном случае была бы потеряна в слое толкателя благодаря переносу тепла тепловыми (медленными) электронами (волнистые стрелки), сохраняется в области сжатия топлива и повышает его конечную температуру (рис. в)). Используя этот подход, группа исследователей под руководством Дж. С. Чанга сумела получить ни мало, ни много, как 10^6 нейтронов из мишени дейтериевого топлива при сравнительно медленной скорости разгона оболочки $4 \cdot 10^6$ см/с.

возможно, что диаметр мишени может доходить до 1/2 дюйма или 1,27 мм) и более массивные мишени, чем в случае лазерного термояда. Это обусловлено большей длительностью импульсов высокоэнергетических заряженных частиц и ограниченными возможностями их фокусировки. Вследствие большей массы мишеней для пучков частиц работа с ними требует значительно более высоких уровней энергии на входе, однако это обстоятельство не создает трудностей в случае применения импульсных источников. Дело в том, что запас энергии в импульсе заряженных частиц достаточно велик, но относительно ниже уровень переносимой мощности. Другими

словами, в наших силах передавать на мишень довольно большую энергию в виде длительных импульсов, и нам необходимы, следовательно, мишени, в которых нужная температура нагрева топлива достигается при медленных скоростях разгона оболочек мишени.

Концепция мишени, которая может удовлетворить этим требованиям, была впервые разработана под руководством Н. Г. Басова в ФИАН им. П. Н. Лебедева, где ведутся работы по советской лазерной программе термоядерного синтеза. В 1975 г. группой Н. Г. Басова было предложено использовать довольно крупные полые мишени, состоящие из нескольких прилегающих друг к другу оболочек, которые можно разогнать в течение нескольких десятков наносекунд. Передаваемая на мишень исходная энергия должна накапливаться в ней в течение относительно длительного времени ускорения внутренней оболочки и концентрироваться в веществе топлива только на последнем этапе его коллапса. Внутренние слои полых мишени следует изготавливать из термически изолирующего материала (скажем, золота), окружающего тонкий слой термоядерного топлива, который начнет ускоряться первым и превратится в сверхнагретое пятно в центре мишени, тем самым обеспечивая поджиг реакций синтеза в основном веществе сжимаемого топлива. В прошлом году (1977 г. — *Прим. перев.*) в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса при калифорнийском университете был разработан родственный подход к конструкции мишени, основанный на использовании (многооболочечной) модели несоприкасающихся оболочек. В этой конструкции применялись толстые оболочки и тем самым ее создатели отошли от «изящных пропорций» оболочек мишени, характерных для советской программы исследований. Применение более толстых оболочек снижало вероятность развития гидродинамических неустойчивостей, которые могут нарушить симметрию сжатия термоядерного топлива.

Вопрос о стабильности процесса сжатия топлива сделался предметом довольно обстоятельных дискуссий в силу того, что количественные эксперименты по разгону оболочек до нужных предельных скоростей были до последнего времени неосуществимы из-за малых энергий пучков. Ответить на этот вопрос можно будет лишь в ближайшем будущем. Вполне вероятно, что в мишенях с инициированием термоядерных реакций в центре, которым будет придаваться особое значение в грядущих исследованиях, «запрятан ключ» к достижению условий поджига реакций синтеза и эффективного сгорания топлива при малых уровнях мощности внешнего источника.

В 1976 г. группа советских исследователей под руководством Л. И. Рудакова, используя в эксперименте возможности повышенного энерговклада пучка в мишень и работая с многооболочечными мишенями, зарегистрировала первые измеримые потоки нейтронов, образовавшихся в результате протекания термоядерных реакций в мишени, облученной электронными пучками. Эксперимент ставился при среднем уровне мощности пучка (менее 100 ГВт), но использовалась оригинальная конструкция мишени, содержащая во внешней оболочке пятимикронную золотую фольгу, а во внутренней оболочке — полиэтиленовую фольгу толщиной 10 мкм, которая служила для сжатия и нагрева топлива, находившегося внутри конусообразного свинцового контейнера. Сравнимое число нейтронов за импульс (около 10^6) было получено в 1977 г. в лабораториях «Сандиа» с помощью метода, заимствованного из арсенала средств по исследованию УТС на основе магнитного удержания плазмы: для тепловой изоляции предварительно нагретого топлива в мишени от окружающей оболочки вещества с высокой плотностью к нему прикладывалось магнитное поле. При этом можно было использовать пониженные скорости разгона внут-

ренной оболочки мишени, облучая ее внешнюю поверхность более длительными импульсами электронов и отходя от требований жесткой фокусировки пучка. Предварительный нагрев термоядерного топлива и возбуждение магнитного поля осуществлялись с помощью сильноточного разряда через проволочку (укрепленную внутри мишени) непосредственно перед моментом начала сжатия топлива. Используя дейтериевое топливо и относительно низкие скорости разгона оболочки порядка $4 \cdot 10^6$ см/с удалось в итоге зафиксировать примерно миллион нейтронов. Для сравнения отметим, что скорость разгона оболочки в первых успешных экспериментах по сжатию термоядерного топлива лазерным излучением составляла $20 \cdot 10^6$ см/с.

□

Трудности решения проблем эффективного энерговклада и конструкции мишени для инерционного термоядерного синтеза на основе электронных пучков вызвали не так давно интерес к использованию для тех же целей мощных ионных пучков. Пучки легких ионов (хотя и с несколько пониженным уровнем мощности) можно генерировать на существующих ускорителях мощных электронных пучков путем подавления нормального электронного тока. То обстоятельство, что глубина проникновения ионов в мишень меньше аналогичного показателя для электронов с той же кинетической энергией, облегчает выполнение требований и к конструкции мишени, и к условиям генерации пучков. Так, например, из наших расчетов следует, что облучение мишени с магнитной изоляцией ионным пучком мощностью 10 ТВт обеспечит в таком т/я реакторе итоговый выигрыш в энергии. Аналогичные вычисления для мишени с поджигом реакций в центре и вспомогательным магнитным полем указывают на достижение энергетического выигрыша, превышающего 10, при поглощении энергии ионных пучков мощностью менее 50 ТВт. Столь высоких показателей энерговывыгрыша можно будет достичь с помощью модифицированного ускорителя мощных электронных пучков, создание которого запланировано в лабораториях «Сандиа» к 1983 г. Имеются, однако, очень большие трудности в деле фокусировки мощных ионных пучков и исследования соответствующих эффектов только еще начинаются.

Первоначальный подход к проблеме генерации мощных ионных пучков был сформулирован Ф. Винтербергом и основан на подавлении потока электронов в диоде путем наложения магнитного поля, препятствующего движению электронов к аноду. Такое подавление электронного тока необходимо в силу того, что при распространении через диод параллельных потоков электронов и ионов большая часть энергии переносится легкими частицами, т. е. электронами. Если бы, к примеру, ионный ток переносился протонами, то его относительная величина грубо составляла бы лишь 2% от электронного тока. Наложение с помощью импульсных катушек возбуждения сильного магнитного поля, параллельного поверхностям анода и катода, приводит к отклонению траекторий движения электронов, которые в этом случае образуют нечто вроде вращающегося облака. С другой стороны, воздействие магнитного поля на ионы является слабым и они могут беспрепятственно проходить через круглые отверстия или щели в катоде. Создав вне диода электроны и пропустив через них ионный поток, можно нейтрализовать ионы и получить таким образом пучок нейтральных частиц, летящих по параллельным траекториям. Если специально подобранная форма диода позволяет свести ионы в одну точку, то тем самым будет обеспечена фокусировка пучка. Указанная идея была впервые реализована в эксперименте группой Р. Н. Судана в Корнельском университете. Совсем недавно Д. Дж. Джонсон и Г. У. Кусва в лабораториях

«Сандиа» сумели получить по этой методике ионный пучок мощностью 500 ГВт. Этот уровень мощности сравним с тем, что получают на электронных пучках, однако еще предстоит убедиться в том, можно ли достичь достаточно полной нейтрализации сил отталкивания между частицами

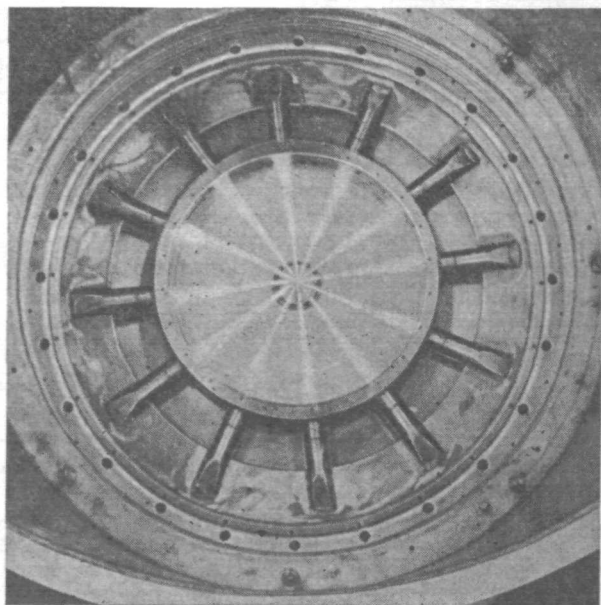


Рис. 10. На этой фотографии демонстрируется внутренняя часть генератора мощных электронных пучков «Прото II» мощностью 8 ТВт, созданного в лабораториях «Сандиа». Расположенная в центре мишень (в данном случае это алюминиевая вставка) обрамлена светящимися каналами плазмы, используемыми для транспортировки 12 сильноточных электронных пучков. Эти каналы сформированы в окружающем воздухе с помощью электрического разряда батареи конденсаторов, энергозапас которой позволяет создать за несколько микросекунд в каждом канале разрядный ток 60 кА. (В целях получения наилучшего изображения вся система работала в режиме пониженной мощности, составляющей около 12% от оптимальной величины). В нормальных условиях изображение плазменных каналов затемняется верхней частью цилиндрической вакуумной камеры диаметром около метра. В предварительно сформированные плазменные каналы инжектируются 12 независимо ускоряемых электронных пучков через 12 катодов с медными накопечниками, установленных непосредственно за стенкой вакуумной камеры. Пучки дрейфуют далее по направлению к поверхности мишени, облучая ее со всех сторон. Эта экспериментальная установка на 12 пучков используется для исследования характеристик транспортировки как электронных, так и ионных пучков.

и слабой расходимости пучка, чтобы сфокусировать ионный пучок на поверхность мишени с помощью электродов с заданной геометрией.

Другой подход к проблеме генерации мощных ионных пучков и подавление электронного тока исследуется С. А. Голдстейном и Дж. Куперстайном в лаборатории «Нэвал Рисетч». Он основан на ограничении движения электронного потока к аноду с помощью собственного магнитного поля, возбуждаемого в сильноточном диоде. Вследствие того, что никакого вспомогательного магнитного поля вне диода возбуждать не надо, значительно проще в этом случае добиться нейтрализации сил отталкивания между частицами. С помощью этого подхода удалось генерировать ионный пучок мощностью 300 ГВт с к. п. д. 50% и, кроме того, достичь плотности тока порядка 70 кА/см^2 , используя простую схему фокусировки пучка на основе подобранной геометрии электродов.

У себя в лабораториях «Сандиа» мы подготавливаем все к тому, чтобы наш генератор мощных электронных пучков работал как в режиме генерации ускоренных пучков как электронов, так и ионов. Тем самым мож-

по будет полностью оценить обе имеющиеся возможности облучения мишени термоядерного топлива. В одной из конструкций диода ионный пучок будет генерироваться на конце передающей линии с магнитной самоизоляцией и фокусироваться «геометрически» на длине около метра. Далее сфокусированные пучки будут транспортироваться к мишени по плазменным каналам, образованным с помощью разряда. Упомянутый уже генератор будет также использован для исследования эффекта «бунчировки» пучка, широко применяемого в обычных ускорителях частиц. Этот эффект состоит в увеличении мощности ионного пучка путем компрессии ионного импульса как в пространстве, так и во времени. Такая пространственно-временная компрессия пучка возможна в силу того, что ионы с энергией порядка нескольких мегаэлектронвольт обладают сравнительно медленными скоростями и при увеличении ускоряющего напряжения за период следования импульса можно создать условия, когда более быстрые ионы в конце импульса догонят инжектированные ранее более медленные ионы. Тем самым будет обеспечено укорочение импульса и обострение мощности на мишени. Таким способом можно достичь по крайней мере пятикратного увеличения искомого мощности.

Еще более современный подход к проблеме импульсного термоядерного синтеза с мощными пучками частиц основан на использовании тяжелых ионов. Ряд физиков, принимавших участие в разработке мощных ускорителей для исследования элементарных частиц, высказали предположение, что технику традиционного ускорения заряженных частиц можно применить для целей поджига термоядерных реакций. Их аргументы сводятся к тому, что с помощью тяжелых ионов можно будет достичь необходимого уровня мощности при существенно более высоких ускоряющих напряжениях и, следовательно, более слабых токах. Одним из наиболее важных преимуществ работы при высоком ускоряющем напряжении является возможность вклада мощности в пучок последовательными, разграниченными во времени порциями, что существенно облегчает задачу ее накопления. В настоящее время технические и экономические аспекты такого подхода находятся в стадии всестороннего обсуждения.

□

Американская программа создания генератора электронных пучков мощностью 100 ТВт, необходимого для экспериментов по инерционному термоядерному синтезу, начала серьезно развиваться с 1974 г., когда под руководством К. Р. Прествича в лабораториях «Сандиа» стала разрабатываться установка «Прото-I» мощностью 1 ТВт, подготовленная к проведению экспериментов в 1975 г. и в настоящее время эксплуатирующаяся главным образом в режиме генерации ускоренных ионных пучков. Вслед за этим шагом начала исследования группа Т. Г. Мартина, которая в прошлом году (1977 г. — *Прим. перев.*) успешно ввела в эксплуатацию генератор электронных пучков мощностью 8 ТВт — «Прото-II». На установке «Прото-II» были с успехом испытаны многие из элементов систем накопления энергии, коммутации и формирования импульсов для следующего поколения генераторов мощных пучков заряженных частиц. В настоящее время на этой установке проводятся эксперименты с несколькими пучками ионов и электронов, целью которых является накопление данных о характере распространения пучков частиц для более современной конструкции генератора.

Новый генератор мощных электронных пучков в лабораториях «Сандиа» будет состоять вначале из 36 модулей, обеспечивающих получение суммарной мощности импульса 30 ТВт. В его конструкцию заложена возможность повышения мощности импульса электронов по крайней мере до

60 ГВт. Монтаж этой установки начался минувшей осенью, а ее испытания в режиме генерации импульсов должны начаться в конце следующего года. Если эти первые шаги окажутся успешными, то к 1983 г. можно будет закончить модернизацию установки для повышения уровня мощности до указанного ранее предела и приступить в 1985 г. к проведению экспериментов по инициированию термоядерных реакций в топливной мишени.

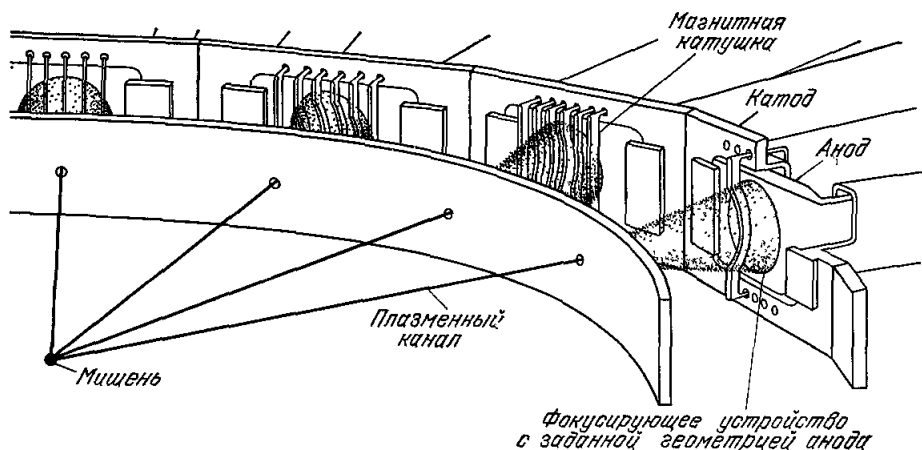


Рис. 11. Возможная модернизация нового генератора мощных электронных пучков в лабораториях «Сандиа» позволит приступить к экспериментам с ионными пучками вместо электронных.

В этой конструкции полярность диода будет изменена на обратную, так что центральный элемент в каждой из передающих линии будет теперь выполнять роль анода, а внешний элемент станет катодом. Легкие ионы (например, протоны) будут вытягиваться из плазмы, сформированной вблизи вогнутой стороны каждого из анодов. Конструкция таких анодов призвана играть роль фокусирующих устройств с заданной геометрией, расположенных между каждой парой передающих линий. Для подавления электронного тока используется решетчатая конструкция обмоток катушек возбуждения, установленных перед каждым из фокусирующих устройств и обеспечивающих создание импульсного магнитного поля. Ионы будут беспрепятственно проникать через обмотки магнитных катушек и фокусироваться в пучок до того, как попадут на вход плазменных каналов, образованных с помощью разряда.

В случае, если и последние шаги приведут к положительным результатам, то такие факторы, как простота и эффективность техники генерации мощных пучков частиц, определенно создадут основу для будущих применений инерционных термоядерных реакторов.

Для того чтобы продвинуть новую технологию дальше стадии доказательства научной осуществимости рассматриваемой проблемы к следующей стадии создания энергетических термоядерных реакторов, необходимо будет продемонстрировать компоненты периодически работающего импульсного генератора на протяжении по крайней мере одного года (что соответствует почти миллиарду импульсов), которые требуют минимального (или вовсе не требуют) текущего ремонта. Это значит, что предпочтение должно отдаваться таким компонентам генератора мощных пучков, как охлаждаемые газом искровые коммутаторы и высоковольтные трансформаторы, которые не использовались в более ранних установках с выработкой единственного импульса. В соответствии с программой развития исследований в лабораториях «Сандиа», нацеленной на решение и этих проблем, недавно был создан генератор, обеспечивающий получение 100 импульсов в секунду при средней мощности 30 кВт и пиковой мощности импульса 10 ГВт. Соответствующая техника представляет собой одно из наиболее слабо развитых звеньев в цепи всего комплекса работ по импульсному термояду и демонстрация достигнутых здесь возможностей

обеспечит приток надежных финансовых ассигнований на протяжении требуемого отрезка времени. Мы надеемся, что генератор мощных пучков со средней мощностью 1 МВт можно будет продемонстрировать до 1985 г. Если научная осуществимость этой программы станет фактом, то мы сможем предложить сделать следующий шаг: создать небольшой экспериментальный термоядерный реактор на среднюю мощность 10 МВт.

В нашей долгосрочной программе исследований предусмотрена разработка небольшого термоядерного реактора с рабочей камерой радиусом менее 3 м. Электрическая мощность такого реактора должна составить 100 МВт, и для этого потребуются достичь величины энергетического выигрыша в веществе мишени не менее 30. Такие невысокие в общем-то показатели можно будет варьировать с достаточной легкостью в процессе последующих работ над термоядерными реакторами, связанных с изменением их размеров и расположения элементов, или, наконец, с их монтажом. Компания «Бештел пауа корпорэйшн» проводит исследования в рамках программы создания импульсного термоядерного реактора мощностью 1 ТВт на основе электронных пучков. Предполагается, что данная установка будет относиться к типу гибридных реакторов, в blankets которых находится делящееся ядерное топливо (например, уран 238 или торий 232). Такой реактор будет вырабатывать не только электрическую энергию, но также и топливо для традиционных реакторов деления, использующих легкую воду. Предварительные оценки энергетических возможностей таких реакторов компанией «Бештел» показали, что можно достичь экономически приемлемой стоимости выработки энергии в случае, если энергетический выигрыш в термоядерной мишени составит 18, а в blanket топливе — 5. Понятно, что вопрос о том, окажется ли на поверку такой гибридный реактор желанным, остается открытым. В любом случае высокий показатель эффективности генераторов мощных пучков частиц обеспечивает возможности исследования чисто термоядерного реактора с невысокими значениями энергетического выигрыша в мишени, который является привлекательным из экологических соображений.

Американская программа исследований импульсного термоядерного синтеза на основе мощных пучков частиц продолжает разворачиваться в темпе, сравнимом с темпом советской программы исследований в ИАЭ им. И. В. Курчатова, хотя (согласно Л. И. Рудакову) ГКИАЭ СССР оказывает, по всей видимости, большее доверие программе ИТС на основе электронных пучков, чем к лазерному «термояду». (Обратные приоритеты характерны для министерства энергетики США.) Доводы, содержащиеся в таком положении дел с советской программой исследований, видимо, заключаются в чисто прагматическом подходе к проблеме, основанном скорее на использовании таких факторов соответствующей технологии, как простота, возможность изменения масштаба и низкая стоимость, нежели чисто научные факторы. Усилия исследователей в ИАЭ им. И. В. Курчатова сосредоточены на выполнении проекта строительства ускорителя мощных пучков «Ангара-V» стоимостью 50 млн. долларов, который обеспечит выходную мощность импульса около 100 ТВт к 1984 г., когда запланировано начать эксперименты на мишени термоядерного топлива. При этом разрабатываются мишени с очень высоким показателем энергетического выигрыша (более 1000), а также конструкция blanket делящегося ядерного топлива, которые позволят выработать достаточно энергии, чтобы оплатить расходы по изготовлению сложных мишеней и замене передающих линий с магнитной самоизоляции. В данный момент советские исследователи не планируют выполнять транспортировку пучков частиц к мишени по специальным каналам, а считают возможным контакт передающих линий с мишенью, обеспечивающий максималь-

ный энергетический выигрыш и выработку делящегося топлива, цена которых компенсирует частные замены поврежденных передающих линий. Независимо от того, окажется ли в итоге этот подход предпочтительнее нашего, использующего передачу пучков частиц к мишени на расстоянии, сейчас очевиден быстрый прогресс в развитии техники облучения мишеней термоядерного топлива сильноточными пучками частиц с мощностью в импульсе, достаточной для получения значительного количества искомой термоядерной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- Winterberg F. — Phys. Rev., 1968, v. 174, p. 242.
Yonas G. et al. — Nucl. Fusion, 1974, v. 14, p. 731.
Goldstein S. A., Lee R. Phys. Rev. Lett., 1975, v. 35, p. 1079.
Miller P. A. et al. — Ibid., 1977, v. 39, p. 92.