

пульсационная колонна диаметром 2,5 м производительностью до 100 м³. «Лува» показала асимметричный роторно-дисковый экстрактор, который является моделью колонны диаметром 1,8 м производительностью 45 м³. Был выставлен только один (стеклянный) смеситель-отстойник для пилотных установок («Квик-фит»). Представители фирмы из чисто экономических соображений рекомендуют смесители-отстойники только для процессов с малым числом теоретических ступеней (три-четыре).

Из экспонировавшегося на выставке большого количества осадительных центрифуг привлекают внимание прямоточные шнековые с полым ротором, очищающие до 120 м³/ч сточных вод, а также механизированные с программным управлением. Пять фирм применяют для выгрузки осадка пульсацию или вибрацию.

Представленные на выставке многочисленные фильтры, насосы, а также устройства для загрузки и выгрузки твердых веществ и пульпы не отличались особой новизной.

ГАРПАЧЕВА С. М.

Совещание экспертов МАГАТЭ по технологии систем инерциального удержания плазмы

В последние годы большое внимание уделяется сравнительно новому подходу к решению проблемы управляемого термоядерного синтеза — инерциальному удержанию плазмы. Основная идея заключается в том, что небольшая крупинка термоядерного топлива (мишень) мгновенно нагревается мощными источниками энергии до термоядерной температуры и реакции синтеза успевают протекать за времена разлета мишени. Этот подход стал возможен благодаря значительному прогрессу в создании мощных лазеров и сверхточных электронных ускорителей. Соответственно различают лазерный и электронный термоядерный синтез.

Обсуждению состояния работ по инерциальному удержанию плазмы и рассмотрению перспектив исследований в данной области было посвящено совещание экспертов, организованное МАГАТЭ совместно с ГКАЭ СССР в г. Дубне 19—23 июля 1976 г. В его работе участвовали специалисты СССР, США, Японии, Франции, Англии и ФРГ. МАГАТЭ представляли заместитель генерального директора И. С. Желудев и научный секретарь Дж. Филиппс. На открытии совещания присутствовал заместитель председателя ГКАЭ СССР И. Г. Морозов.

Обзор программы США до 2000 г. по инерциальному удержанию был представлен Л. Киллионом (ERDA). Исследования по лазерному термоядерному синтезу в стране ведутся в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса, Лос-Аламосской научной лаборатории, лаборатории фирмы «КМС-Фьюжн», Рочестерском университете и других научных центрах. Для координации работ в ERDA организовано управление лазерного синтеза. В соответствии с долгосрочной программой предусматривается получение реакции с положительным КПД в 80-х и создание демонстрационного реактора в 90-х годах. Основные исследования до 1986 г. будут базироваться на многоканальных неодимовых лазерах. Одновременно предполагается развивать технику мощных газовых, в первую очередь CO₂-лазеров, так как неодимовые имеют низкий КПД и срок службы активных элементов. Большие надежды связываются с новыми типами лазеров. Долгосрочная программа предусматривает тесную кооперацию исследовательских учреждений с промышленностью.

В докладе Л. Буса (Лос-Аламосская лаборатория) рассмотрены вопросы коммерческого использования лазеров в управляемом термоядерном синтезе. Делается вывод, что, поскольку усиление по энергии выше 100 представляется нереальным, КПД лазера, исполь-

зуемого в реакторе, должен быть не менее 20%. Наиболее перспективными считаются CO₂-лазер, химический, на атомном кислороде, эксимерный и иодный. В этой лаборатории намечается создать мощный CO₂-лазер энергией 10⁵ Дж для проведения демонстрационных экспериментов в 1979 г.

Результаты и перспективы работ по лазерному термоядерному синтезу в Ливерморской лаборатории обсуждались в докладе Ч. Хендрикса. Лаборатория специализируется на неодимовых лазерах. В настоящее время сооружается крупная 20-канальная установка «Шива» с энергией в импульсе 10⁵ Дж и мощностью 25 ТВт, которая будет введена в строй в 1978—1979 гг. Демонстрационные эксперименты планируются на начало 80-х годов.

В лаборатории фирмы «КМС-Фьюжн» (доклад Ф. Мейера) в последнее время проводились эксперименты по выяснению природы нейтронного излучения квазисферических мишеней с применением корпускулярных методов диагностики. В докладе содержится вывод о тепловом характере реакций синтеза. В лаборатории разработан новый метод измерения вложенной в сферическую мишень лазерной энергии с использованием сферического калориметра. Вложенная энергия составляет 10% от лазерной.

В настоящее время в ведущих лабораториях США достигнут интегральный выход при облучении квазисферических мишеней 10⁷ нейтронов за импульс. Большое внимание уделяется расчетам многослойных мишеней.

Ведущей лабораторией США в области электронного термоядерного синтеза является «Сандия». Руководитель работ Дж. Ионас в двух докладах сообщил о действующих установках, экспериментальных и теоретических результатах и планах на будущее. Несомненным достоинством электронных пучков по сравнению с лазерными является высокий КПД электронных ускорителей (50% против нескольких процентов). Однако возникают проблемы транспортировки и фокусировки пучка на мишень. Американская программа основана на использовании самофокусировки пучка в диоде при двухстороннем облучении мишени. Поскольку термоядерный микровзрыв происходит внутри диода, необходимо применять небольшие мишени. При этом встает проблема получения коротких импульсов. Сейчас эксперименты по облучению мишеней ведутся при мощности до 10¹² Вт и длительности импульса около 20 нс (установки «Гидра» и «Прото»). Наблюдаемый

выход 10^7 — 10^8 нейтронов за импульс имеет, по-видимому, нетермоядерное происхождение. Демонстрационные эксперименты предполагается выполнить в начале 80-х годов при мощности 10^{14} Вт. Для этого сооружается электронный ускоритель ЕВФА-I ($4 \cdot 10^{13}$ Вт) и разрабатывается ускоритель ЕВФА-II (10^{14} Вт).

Японская программа работ по инерциальному удержанию плазмы была представлена в докладах Ч. Яманака, С. Накая и К. Ниу. Основными исследовательскими учреждениями являются университеты в городах Осака, Нагоя, Токио. Существует два проекта. Проект «Гекко» базируется на использовании мощных неодимовых, «Лекко» — электроионизационных CO_2 -лазеров. В настоящее время исследования проводятся на установках «Гекко-II» (неодимовый лазер с энергией пучка 150 Дж, длительностью импульса 3 нс и плотностью потока до 10^{16} Вт/см²) и «Лекко» (CO_2 -лазер, 200 Дж, 1 нс, 10^{14} Вт/см²). Изучается поглощенная и отраженная энергия, спектральный состав, электронная температура, энергетический спектр ионов. Для CO_2 -лазера установлен порог параметрических неустойчивостей 10^{10} — 10^{11} Вт/см². Начаты эксперименты по сжатию оболочечных мишеней лазерным излучением и взаимодействию электронных пучков с плазмой и металлической фольгой.

Во Франции работы по лазерному термоядерному синтезу ведутся также в нескольких лабораториях. На данном совещании был представлен доклад от Исследовательского центра в Лиме (доклад А. Бекиариана). Эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с веществом ведутся на установках М-3 (CO_2 -лазер, 10 Дж, 1,7 нс) и С-6 (неодимовый лазер, 100—1000 Дж, 0,1 нс). Создается лазер на дисковых модулях, который будет работать в режиме ультракоротких импульсов при мощности 1 ТВт. Большое внимание уделяется повышению контрастности излучения и усовершенствованию средств диагностики.

В докладе Э. Витковского (Гархинг, ФРГ) обсуждались вопросы, связанные с применением мощных подных лазеров для термоядерного синтеза. В Гархинге в настоящее время сооружается мощный подный лазер с энергией в импульсе 200 Дж и длительностью 2 нс. Ламповая накачка таких лазеров обеспечивает хорошую повторяемость параметров излучения. нерешенным вопросом пока остается повышение контрастности излучения. Параллельно ведутся исследования лазерной плазмы с использованием неодимового лазера.

В лабораториях Гархинга и Лиме зарегистрирован очень высокий коэффициент отражения лазерного излучения от плазмы (до 30—50%), что находится в противоречии с измерениями, выполненными в других лабораториях.

Согласно кратким сообщениям Т. Аллена (Калем, Англия) и М. Вайта (Резерфордская лаборатория, Англия) работы по инерциальному удержанию в Англии практически отсутствуют, а лазеры в основном используются для нагрева плазмы в магнитных ловушках.

Работы по лазерному термоядерному синтезу в СССР были представлены докладами Г. В. Склизкова (ФИАН) и М. И. Пергамента (ИАЭ им. И. В. Курчатова). Советскому Союзу принадлежит приоритет по многим принципиальным вопросам в этой области, таким, как идея лазерного термоядерного синтеза, получение первых нейтронов, наблюдение сжатия мишеней, максимальный коэффициент отражения в мишенях. В настоящее время исследования ведутся на установках «Кальмар», «Флора», «Дельфин», «Мишень» с энергией пучка 100—1000 Дж (неодимовые лазеры). Разрабатывается проект установки на энергию 10^4 Дж, при которой можно попытаться получить положительный выход энергии в мишени.

Результаты и перспективы исследований по электронному термоядерному синтезу в СССР обсуждались в докладах Л. И. Рудакова, В. П. Смирнова, С. Д. Фанченко (ИАЭ им. И. В. Курчатова) и М. П. Свинына (НИИЭФА им. Д. В. Ефремова). В отличие от американской советская программа основана на использовании техники генерации пучков длительностью импульса 100 нс. Расчеты показывают, что если во внешнюю оболочку мишени вложить энергию 3—5 МДж, то возникает термоядерная реакция с выходом энергии, в 10—100 раз превышающим энергию пучка. Для предотвращения разрушения ускорителя энергией термоядерного микровзрыва мишень должна быть удалена на расстояние в несколько метров. При этом возникает проблема транспортировки пучка на мишень. В настоящее время разрабатывается проект ускорителя на 10^{14} Вт, с помощью которого можно будет выполнить демонстрационный эксперимент. Ускоритель имеет модульную конструкцию. Модельные эксперименты, проведенные на ускорителе «Урал» (энергия пучка 1 кДж), подтверждают перспективность такого метода. Крупным достижением является получение первых термоядерных нейтронов $3 \cdot 10^6$ за импульс при облучении квазисферической мишени на ускорителе «Трифон» (1,5 кДж, 30 нс). Исследования по фокусировке и транспортировке пучков и взаимодействию с мишенями проводятся на новых ускорителях «Кальмар» и «Ангара-1» при плотности потока энергии до $(5-10) \cdot 10^{12}$ Вт/см².

Во время посещения ИАЭ им. И. В. Курчатова и ФИАНа иностранные участники совещания имели возможность ознакомиться с действующими установками.

Итоги совещания показывают, что в нескольких странах существуют долгосрочные научные программы решения проблемы управляемого термоядерного синтеза на основе инерциального удержания плазмы. К настоящему времени получены важные экспериментальные и теоретические результаты, позволяющие надеяться на осуществление в ближайшие 5—10 лет термоядерной реакции с положительным выходом энергии.

Следующее совещание по обсуждавшейся проблеме предполагается провести в 1977 г. в США или Японии.

КОРЖАВИН В. М., ГАЛКИН В. Ю.