

ции молекул в лазерном поле (образование радикалов, потеря селективности во вторичных химических реакциях).

На совещании указывалось, что преимущества лазерных методов разделения могут проявиться при выделении из смеси малораспространенных изотопов, изотопов промежуточной массы, а также при обогащении смеси целевым изотопом от достаточно высокой до очень высокой концентрации.

В сообщениях представителей Ин-та спектроскопии АН СССР и ИАЭ им. Курчатова отмечалось, что на основе явления селективной многофотонной диссоциации молекул могут быть разработаны технологические процессы разделения изотопов, управляемые лазерным излучением. Для разделения изотопов таким методом интенсивно ведется поиск перспективных молекул. К настоящему времени обнаружены изотопные эффекты при разделении изотопов бора, углерода, серы, осмия и азота воздействием мощных импульсов CO_2 -лазера на молекулы BCl_3 , CCl_4 , SF_6 , OSO_4 и CH_3NO_2 . Метод опробован для молекулы SF_6 на установке с высокой частотой следования импульсов. Первые результаты подтверждают ранее полученные зависимости, а это свидетельствует о возможности линейной экстраполяции данных, необходимых для проектирования разделительных устройств.

Одновременно на совещании указывалось на перспективность фотохимического разделения изотопов, при котором молекулы с целевым изотопом, селективно возбужденные на низкие колебательные уровни, связываются химическим путем и выводятся из зоны возбуждения (ИХФ АН СССР и ИХКиГ СО АН СССР). Такое разделение привлекательно тем, что расходуется сравнительно мало энергии лазерного излучения на единицу получаемого продукта.

В лекции представителя ФИАНа основное внимание было сосредоточено на новых импульсных инфракрасных лазерах в диапазоне 8—20 мкм, пригодных

или потенциально пригодных для разделения изотопов. Отмечались достижения в создании лазеров на комбинационном рассеянии, «накачиваемых» неодимовым или перестраиваемым CO_2 -лазером. Приводились параметры генераторов на аммиаке («накачкой» CO_2 -лазером) с генерацией в области 11—13 и 6—7 мкм, а также эксимерных лазеров в спектральной области 0,12—0,56 мкм.

В докладах представителей ИАЭ, ФИАНа и ИХФ АН СССР приводились характеристики CO_2 -, CO_2 - и HF-лазеров, потенциально пригодных для разделения изотопов, обсуждалось практическое использование непрерывных CO_2 -лазеров для разделения стабильных изотопов.

В сообщениях сотрудников НИИ стабильных изотопов обсуждались результаты исследований разделения изотопов азота в электрическом разряде, в докладах представителей ФИАНа и МИФИ — возможность использования гетерогенных реакций для разделения изотопов. В работах ИХКиГ СО АН СССР описывались требования, предъявляемые к химическим реакциям и к условиям их проведения. Обсуждалось влияние вторичных химических реакций на селективную диссоциацию органических молекул в поле импульсного CO_2 -лазера. Отмечалось, что при правильном выборе акцентора селективность реакции может быть существенно повышена.

В докладах, представленных МГУ, приводились результаты исследований процессов двухфотонного поглощения. Указывалось на важность реализации параметрических генераторов света и их использования для разработки процессов разделения стабильных изотопов.

Участники совещания-школы отметили его творческую атмосферу, а также несомненную пользу и целесообразность проделанной работы. Материалы совещания предполагается издать.

ТРЕШЕЛАШВИЛИ Г. И.

Советско-американский семинар «синтез — деление»

Семинар состоялся 14 марта — 1 апреля 1977 г. в ИАЭ им. И. В. Курчатова. В нем с советской стороны участвовали около 30 чел., с американской — 5 чел., было заслушано 12 советских и 11 американских докладов. Два дня заседаний были посвящены обсуждению вопросов, связанных с возможной ролью гибридных реакторов в качестве наработчиков ядерного топлива для ядерной энергетики, рассмотрению конкретных вариантов гибридных реакторов и планам США по реакторам «синтез — деление». В отличие от предыдущего (первого) семинара, проходившего в США летом 1976 г., большое внимание здесь было уделено проработкам гибридного реактора на основе токамака.

Американскими специалистами были представлены доклады о разработках гибридных реакторов, финансируемых Администрацией по энергетическим исследованиям и разработкам (ERDA) и Электроэнергетическим исследовательским институтом (EPRI). ERDA финансирует в 1977 г. восемь исследований на сумму около 10^6 долл. Это относится только к системам с магнитным удержанием плазмы. Финансирование систем с инерциальным удержанием проводится параллельно. Основное отличие разработок этого года от предыду-

щих — расширение круга систем, которые могут быть использованы для гибридного термоядерного реактора. Возрастающая роль отводится экономическим исследованиям, которые должны определить условия проектирования гибридных реакторов на энергетический рынок. Перед разработкой проектов реакторов для всех систем ставится задача оптимизации параметров. Долгосрочной программы ERDA по гибридным реакторам в настоящее время нет. Задача проводимых исследований — создать такую программу. Одновременно сообщалось и о масштабах финансирования работ по чистым термоядерным реакторам. Сумма, предназначенная на 1977 фин. год с учетом разработок концепциальных проектов экспериментальных и демонстрационных реакторов, составляет около $2,5 \cdot 10^6$ долл. В нее не входят затраты на сооружаемые установки и на проектируемый реактор токамак TNS. Значительное число исследований перспективных гибридных реакторов финансируется EPRI. Его вклад в 1976—1977 гг. достиг $1,5 \cdot 10^6$ долл. Задачей разработок является представление рекомендаций фирмам, производящим электроэнергию, о перспективности гибридных термоядерных реакторов и возможных областях их применения.

Вопрос о выборе роли реактора (производство электроэнергии или переработка ядерного топлива) в настоящее время не решен, однако высказывается мнение, что на начальном этапе выгоднее использовать гибридные реакторы преимущественно для получения топлива, не включая их в общую энергосеть и используя производимую ими энергию на локальные нужды.

Советская делегация представила доклады об исследовании возможной роли гибридных реакторов в энергетике и вариантов их развития (Орлов В. В., Шихов Б. С., Новиков Р. М.). Основная дискуссия проводилась по докладу, в котором сравнивались возможности производства топлива на основе реакторов LMFBR, гибридов и электроядерным методом. Участники семинара пришли к выводу, что электроядерный вариант будет уступать методу получения топлива на основе термоядерных гибридных реакторов, имеющих коэффициент увеличения мощности в плазме $Q \geq 0,5$. Наилучшим является параллельное развитие быстрых реакторов-размножителей и гибридных систем.

Р. Роуз (США) рассказал об исследованиях фирмы «Вестингауз» по гибридным реакторам токамакам, связанных с выявлением возможности создания гибридного реактора минимального размера и стоимости с использованием принципа двухкомпонентного токамака; о проекте гибридного реактора для сжигания актиноидов, первая проработка которого была представлена на предыдущем семинаре в Ливерморе, и проекте гибридного реактора для переработки плутония. Он же сообщил о проекте гибридного реактора с инжекцией на встречных пучках Джассби и Ли (Принстонский университет и Ливерморская лаборатория им. Лоуренса), токамака с инжекцией Принстонской лаборатории физики плазмы и демонстрационного гибридного реактора (TDHR) Северо-западной Тихоокеанской лаборатории Ин-та им. Бэттела (PNL) Висконсинского университета.

Советской стороной был представлен проект реактора токамака, ориентированный на переработку значительных количеств делящегося вещества. В дискуссии отмечалась различная степень проработанности представленных систем, причем наиболее исследованным считается гибридный реактор фирмы «Вестингауз».

При разработке гибридных реакторов в США большое внимание уделяется открытым ловушкам. Д. Бендер (Ливерморская лаборатория) и Ж. Шульц (фирма «Дженерал атомик») представили доклад о совместно разрабатываемом гибридном газохлаждаемом реакторе на основе открытой ловушки. Основная задача — создать систему минимальных размеров с более простой перегрузкой, чем в предыдущих проектах. В качестве основных материалов выбраны U_3Si , LiH и $NbTi$ при максимальном магнитном поле на катушке 8 Т. Корпус реактора предполагается изготавливать из предварительно напряженного железобетона.

Компанией «Дженерал атомик» разработана оригинальная модульная конструкция бланкета и предложен проект перегрузочной машины, которая позволит заменять модули в течение двух недель ежегодно. Основная конструкция несменяемая и крепится на бетонном корпусе. Модули заполняют внутреннюю сферическую полость реактора. Их конструкция ослабляет нейтронный поток и разрешает работу основной конструкции. Уплотняются модули на специальных прокладках с затяжкой болтами. Гибридный реактор на основе открытой ловушки с двойными пробками был представлен В. А. Чуяновым (ИАЭ). Система имеет лучшие характеристики, чем проект реактора Ливермора.

На семинаре была представлена серия предварительных проработок линейных импульсных систем с магнитным удержанием плазмы. Рассмотрение этих систем ведется в первую очередь для использования в гибридных реакторах, так как для получения $Q \gg 10$, необходимого для чистого реактора синтеза, системы должны иметь слишком большую длину. Обсуждалась возможность получения Q в диапазоне 0,3—3, что приводит к системам длиной 300—1000 м и мощности реактора 4—30 ГВт (тепл.). Приведенные экономические оценки свидетельствуют о возможности получения плутония по цене 50—100 долл. за грамм, однако достоверность оценок по сравнению с хорошо проработанными проектами на основе открытых ловушек и токамаков недостаточно высокая. Как преимущество подчеркивается простота конструкции бланкета таких систем и возможность создания его из простых модулей. В то же время линейные системы требуют высоких магнитных полей (до 15—17 Т), трудно решается проблема защиты катушек, создающих поле, от нейтронного излучения. В процессе дискуссии высказывались замечания о необходимости частой смены магнитов, создающих импульсное сжатие (через 1—2 года), и об относительно сильном влиянии импульсного режима работы на надежность конструкции. В дискуссии по линейным системам отмечалась также более низкая степень их проработанности по сравнению с токамаками и открытыми ловушками. Не решены и довольно трудные вопросы уменьшения утечки плазмы через торцы, что даже при оптимизме разработчиков приводит к низким значениям Q (не выше 2). Значительные затруднения может вызвать импульсный режим работы этих систем. В то же время линейная геометрия представляется удобной для инженерных решений, поэтому считается целесообразным продолжить их рассмотрение для гибридных реакторов с малыми значениями Q .

Советская делегация представила два доклада по импульсным системам: о возможности создания систем минимального размера на основе тэта-пинчей (И. В. Копин, НИИЭФА) и на основе установки с пучком релятивистских электронов и инерциальным удержанием плазмы (С. Л. Недосеев, ИАЭ).

Значительный интерес вызвал доклад, представленный Д. Диониджи (PNL), о параметрах гибридных реакторов, необходимых для их проникновения на энергетический рынок. Работа по применению экономической модели к оценке роли гибридных реакторов базируется на кривой потребности в электроэнергии, имеющей период удвоения ~ 15 лет, и на оценках капитальных затрат и стоимости электроэнергии альтернативных источников энергии, в качестве которых рассматриваются станции на ископаемом топливе, тепловые реакторы LWR и быстрые LMFBR. Так как гибридные реакторы могут производить одновременно ядерное топливо и электричество, допустимая цена является функцией этих двух параметров. В силу того что новая система должна быть выгоднее старых, рассматривался потенциальный выигрыш в $10 \cdot 10^9$ долл. за 30-летний период внедрения гибридных реакторов. Представленная модель содержит также ряд ограничений, учитывающих возможные темпы ввода новых систем, распределение потребностей в электроэнергии по коэффициенту загрузки станции, ресурсы ядерного топлива и т. п. Основным результатом является вывод: приведенные капитальные затраты не должны превышать 350—500 долл. за киловатт установленной тепловой мощности. Нижний предел соответствует системам с выходом электроэнергии, близким к нулю, верхний —

реакторам, оптимизирующим производство топлива и электроэнергии. Указанные значения в 1,5—2,5 раза превышают установленную в настоящее время стоимость для реакторов LWR. Проводились оценки допустимой стоимости проектов гибридных реакторов, представленных на семинаре. Для открытой ловушки разработки Ливермора эта величина составила 360 кВт (тепл.), для реактора токамака и открытой ловушки разработки ИАЭ им. И. В. Курчатова 460 и 530 долл./кВт(тепл.) соответственно. Из этого краткого сравнения можно видеть, что преимущество систем с достаточно высоким Q значительно. Проектная стоимость открытой ловушки в Ливерморе составляет ~450 долл./кВт (тепл.), и можно рассчитывать, что большинство других проработок гибридных реакторов будет не силь-

но отличаться по стоимости. Таким образом, стоимость разрабатываемых в настоящее время гибридных реакторов представляется экономически удовлетворительной.

Результаты обсуждений, имевших место на семинаре были суммированы в виде заключений, в котором высказаны точки зрения участников относительно возможной роли гибридных реакторов в энергетике, необходимых дополнений к существующей экспериментальной программе управляемого термоядерного синтеза в случае включения в нее гибридных реакторов как одного из ближайших этапов, целесообразных направлений работ в рамках системного анализа гибридных реакторов и возможных областей взаимовыгодного обмена между СССР и США.

ПИСТУНОВИЧ В. И., ШАТАЛОВ Г. Е.

Рецензии

Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1976. 248 с. 1 р. 75 к.

Книга является первой монографией, где обобщен почти 20-летний опыт проектирования и эксплуатации импульсных быстрых реакторов. Содержание книги охватывает все известные типы импульсных ядерных устройств, включая реакторы аperiодического действия, гашение импульса в которых происходит за счет отрицательного температурного эффекта реактивности; реакторы периодического действия, импульс мощности в которых формируется внешним модулятором реактивности, и бустеры-реакторы, подкритичные на мгновенных нейтронах и работающие от внешнего импульсного источника.

В первых двух главах излагаются основные теоретические аспекты реакторов аperiодического действия и на примере SPRII и VIPER рассматриваются характерные конструктивные особенности и способы управления. Анализируется зависимость энергии и формы импульса от скорости вводимой реактивности, времени жизни, ценности нейтронов, мощности источника нейтронов, механической инерции и т. п. Рассматриваются вопросы, связанные с флуктуациями всплеск при слабом источнике нейтронов, т. е. когда необходимо учитывать стохастический характер процессов деления.

Основная часть книги (пять глав из 10) посвящена представляющим наибольший интерес импульсным реакторам периодического действия (ИРПД), в области которых автор является одним из ведущих специалистов и непосредственным участником разработки ИБР-1 и ИБР-2.

В книге подробно излагается теория ИРПД, обстоятельно исследуется применимость различных расчетных моделей, в частности эффективной одноточечной модели кинетики, к расчету реактора ИБР-2.

Одним из элементов ИРПД является модулятор реактивности. Изложению предьявляемых к нему требований, выбору материала, размеров, формы, скорости и направления его вращения, методу расчета коэффициента параболы реактивности посвящена отдельная глава. В этой же главе кратко описаны некоторые особые способы модуляции реактивности.

Особенностью ИРПД является высокая чувствительность импульсов мощности к небольшим изменениям реактивности, обусловленным колебаниями твэлов, подвижных и стационарных отражателей и т. п. При малой мощности реактора причиной флуктуации

интенсивности и формы импульсов может быть также и стохастический характер размножения нейтронов. Проведенный автором подробный анализ работы импульсного реактора в условиях флуктуаций энергии и реактивности с выявлением причин этих флуктуаций имеет наряду с техническим большое практическое значение. На основании опыта работы ИБР-1 автор дает существенные рекомендации по контролю и управлению реактором периодического действия как в период пуска, так и при работе на мощности, излагает принципы аварийной защиты, приводит перечень контролируемых параметров.

В отдельную главу вынесена проблема теплового удара, специфичная для импульсных реакторов. Для более глубокого понимания этого явления автор сначала рассматривает его на упрощенных моделях, а затем переходит к решению задачи динамической термоупругости для различных компонентов реактора. Автор не только указывает факторы, влияющие на прочность конструкции, но и предлагает меры по смягчению тепловых ударов.

Язык книги простой, ясный и физически строгий. В книге много иллюстративного материала, а также численных примеров, которые помогают восприятию излагаемого материала. Большим достоинством книги является широта охвата теоретических и инженерных проблем импульсных реакторов, изложенных в сжатой форме. К сожалению, иногда чрезмерный лаконизм освещения проблемы затрудняет ее понимание. Это прежде всего относится к главам 2 и 7 и в меньшей степени к некоторым другим разделам, требующим специальной подготовки читателя. Возможно, этот недостаток обусловлен ограниченным объемом книги. Частично он компенсируется большим числом библиографических ссылок в основном на оригинальные работы. Можно надеяться, что эти недочеты будут устранены автором при переиздании монографии, что весьма вероятно ввиду актуальности, высокого качества и очень небольшого тиража книги, не позволившего приобрести ее всем желающим.

Монография Е. П. Шабалина, несомненно, будет полезна широкому кругу инженеров и научных работников, специализирующихся на реакторной физике, а для тех, кто непосредственно занимается разработкой и эксплуатацией импульсных реакторов, явится теоретическим и практическим пособием.

СМИРНОВ В. С.