

восстановления хлоридов водородом в газовой среде при 15 К и магнитном поле 7 Т. Критическая температура ленты 22,5 К. Специалисты фирмы рассчитывают в течение нескольких лет развить метод в промышленную технологию.

В целом на основании докладов и мнений участников ближайшие перспективы промышленности СП-материалов можно сформулировать следующим образом:

1. В самое ближайшее время, возможно в 1976 г., в ряде стран следует ожидать появления промышленных многожильных СП-материалов на основе Nb_3Sn и V_3Ga . Это позволит освоить диапазон магнитных полей в районе 12 Т; довольно высокая критическая температура этих материалов дает возможность повысить надежность СП-устройств и снизить требования к системам охлаждения.

2. Развитие СП-техники приведет к разработке новых материалов для более высоких полей. В настоящее время наиболее перспективными в этом смысле сверхпроводниками, по-видимому, являются $NbGe$, $NbAl$; $NbAlGe$, $NbSi$ и некоторые другие. К сожалению, все они очень нетехнологичны.

3. Ближайшие перспективы СП-техники будут, видимо, связаны прежде всего с материалами на основе ниобий-титановых сплавов.

Широко обсуждались вопросы применения сверхпроводимости в электромашиностроении, системах электродвижения. Во всех этих областях на действующих СП-моделях, в том числе полномасштабных, получены многообещающие результаты, разработаны проекты конкретных устройств. Некоторые из них осуществляются. Например, реализуется совместный советско-американский проект создания под Москвой СП-линии электропередачи километрового масштаба. Многие выступавшие отметили необходимость развития международного сотрудничества по внедрению СП-устройств в современную технику, высказывались и конкретные предложения, в частности в отношении разработки СП-магнитных систем для термоядерных устройств.

Накопленный опыт создания и эксплуатации СП-устройств позволяет уже сегодня перейти к их эффективному использованию в технике, а прогресс, например, ускорительной техники и техники термоядерного эксперимента, связан с внедрением СП-устройств самым непосредственным образом. Нерешенные физические, инженерные, технологические проблемы, требующие неустанных усилий исследователей, не должны задерживать это внедрение.

ПЛЕЩ А. Г.

IV Международная конференция по термоэмиссионному преобразованию энергии

Конференция проходила 1—3 сентября 1975 г. в Эйндховене (Нидерланды). Было заслушано 50 докладов, охвативших различные научные и инженерные аспекты ТЭП.

После спада активности в области ТЭП, вызванного резким сокращением работ по ядерным термоэмиссионным программам в США, Франции и ФРГ, в последние годы вновь наблюдается заметное оживление в этой области, особенно в США. Значительно изменился как масштаб работ, так и их целенаправленность.

В оценке сферы возможных применений ТЭП произошедший существенный переход от области космического использования в область более широкого наземного применения. Этот процесс сопровождается либо полным отказом от программы космического применения ТЭП (ФРГ), либо пересмотром сроков ее осуществления со сдвигом на 10—15 лет (США). В связи с этим исследуются новые нереакторные схемы применения ТЭП. Среди них автономные энергетические установки малой мощности, а также крупные промышленные электростанции на химическом топливе или солнечной энергии. При этом термоэмиссионные преобразователи предполагается использовать либо в качестве основных электрогенерирующих блоков, либо в качестве высокотемпературной надстройки к классическому паротурбинному циклу. Практическая осуществимость этих схем обусловлена возможностью радикального улучшения выходных характеристик ТЭП при существенном снижении рабочих температур. Подготовка технологической базы для разработки усовершенствованных ТЭП, отвечающих требованиям новых сфер применения, — основная цель исследований, проводимых в США, Франции и ФРГ в рамках национальных термоэмиссионных программ.

США представили долгосрочную двухцелевую программу развития работ по термоэмиссионному преобразованию, финансируемую Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) и Администрацией по энергетическим исследованиям и разработкам (ERDA). Долгосрочные цели этой программы — создание к 90-м годам ядерной энергоустановки форсированных параметров для космической системы с электроракетной тягой и повышение КПД современных тепловых станций до 50% и выше за счет использования высокотемпературных термоэмиссионных надстроек. Основные задачи первого этапа программы — демонстрация возможности достижения КПД преобразования до 30% при температуре эмиттера 1400 К и выявление технологических средств, требующих дальнейшего развития на последующих этапах. Предварительные разработки системы в целом проводятся в целях дать общие оценки параметров будущих установок, а также сохранить достигнутый уровень технологии. Эти разработки базируются главным образом на прогнозируемых параметрах усовершенствованных ТЭП, однако не исключают возможности использования уже отработанных современных ТЭП. Реализация более экономичных ТЭП открывает возможность применения новых конструктивных схем, например реактора с вынесенным из активной зоны преобразователем. В этом случае снижение температуры излучателя компенсируется более высоким КПД преобразования, а возможное увеличение массы излучателя — снижением массы защиты благодаря более компактной активной зоне реактора. По удельным массовым характеристикам такая компоновка не уступает варианту со встроенными ТЭП, однако обеспечивает значительно больший рабочий ресурс и повышение надежности системы.

Работы по ТЭП во Франции и ФРГ ведутся в рамках краткосрочных программ, главная цель которых — доказательство возможности повышения экономичности ТЭП и поиски новых путей их применения. Основные работы носят характер фундаментальных и прикладных исследований в области плазменных и поверхностных явлений в ТЭП и технологии электродных материалов.

Термоэмиссионные энергетические установки. С большим интересом был встречен доклад В. А. Кузнецова (ФЭИ) о результатах испытания термоэмиссионного реактора «Топаз». Опыт работы трех зон реактора показал, что такие установки могут служить достаточно надежным и удобным источником энергии для мощности 5—7 кВт с ресурсом работы по крайней мере в несколько тысяч часов. Специальные меры по улучшению дегазации и подготовке поверхностей эмиттеров, принятые при испытании реактора «Топаз-3», позволили получить мощность основной секции свыше 6 кВт в течение более 1200 ч. Общее время работы реактора в режиме генерирования электрической мощности составило 3000 ч. Помимо электрических характеристик, исследовались другие характеристики реактора: температурные коэффициенты реактивности, вклад электронного охлаждения, токи утечки через изоляцию и т. п. Интересная особенность реактора «Топаз-3» — слабые автоколебания системы с частотой 0,08 Гц и амплитудой 0,1% от номинала.

Ряд докладов был посвящен вопросу использования ТЭП в промышленной энергетике. Рассмотрены схемы применения ТЭП в качестве высокотемпературной надстройки к водяному паротурбинному циклу промышленных параметров с различными источниками тепла: ядерный реактор, химическое топливо, солнечная энергия. В докладе Л. Е. Апатовского и др. (Ленинград) дается термодинамический анализ цикла с термоэмиссионной надстройкой для различных реакторных схем. Оценки показывают, что ТЭП в качестве высокотемпературной надстройки по конструктивным особенностям и температурным параметрам обладает преимуществами по сравнению с другими комбинированными схемами, а по экономичности сопоставим с газотурбинной надстройкой при том же температурном уровне. Применение термоэмиссионной надстройки к тепловой станции позволит получить суммарный КПД около 50% при температурах эмиттера 1400—1500 К, что даст значительную экономию топлива и уменьшит тепловые отходы (Е. Бритт и др., США). Предлагается конструктивная концепция крупного термоэмиссионного модуля, в котором большие выходные токи позволяют отказаться от металло-керамической герметизации зазора за счет использования металлической диафрагмы. Предусмотрена индуктивная связь с нагрузкой посредством встроенного в модуль трансформатора.

Коллекторы с низкой работой выхода. Снижение работы выхода коллектора является, пожалуй, наиболее реальным средством повышения экономичности термоэмиссионных преобразователей. Этой проблеме уделяется первостепенное внимание практически во всех странах. Общее направление в исследованиях электродных материалов с низкой работой выхода — активация как классических в практике ТЭП, так и относительно новых материалов различными электроотрицательными добавками (главным образом кислородом) при наличии паров цезия. Среди них — чистые тугоплавкие (Nb, Mo, W, Re) и благородные (Ag, Au, Pt) металлы, импрегнированные системы, гексабориды редкоземельных металлов (LaB_6 , CeB_6 , PrB_6), керметы

(UO_2 — Mo), полупроводники (Si, GaAs, GaP). Наиболее широкие исследования в этой области ведутся в США. Из 24 изученных материалов для шести удалось достичь работу выхода менее 1,2 эВ. Это системы на основе чистых металлов (W и Ag) при температуре 660 К, импрегнированные системы и гексабориды — при 450 К. В работе Ж. Денла (Франция) показано, что для системы W (100) — O — Cs минимальная работа выхода составляет 1,1 эВ как при монослойном покрытии (коадсорбция Cs и O_2), так и для толстых слоев окислов цезия порядка 100 Å. Кроме кислорода изучались и другие добавки. В докладе специалистов ФЭИ и Киевского государственного университета представлены результаты исследования эмиссионных и структурных свойств систем при совместной адсорбции цезия с различными халькогенами. В работе М. Брадке и др. (ФРГ) влияние кислорода изучалось для двух различных наполнителей: бария и цезия. Показано, что активация подложки кислородом приводит к снижению работы выхода в парах бария и цезия соответственно до 1,8 и 1,1 эВ (по сравнению с 2,15 и 1,6 эВ без кислорода). В качестве эмиттерного материала предлагается использовать кермет UO_2 — Mo. Его достоинство заключается не только в высоких эмиссионных способностях при низком давлении паров цезия, но и в способности выделять кислород в межэлектродный объем в достаточном количестве для снижения работы выхода коллектора. Большинство оптимистичных результатов с окисленными коллекторами получено в условиях неравновесной адсорбции кислорода. Введению кислорода в реальных ТЭП посвящена работа Ф. Руфа и др. (США). Использование вольфрамового коллектора, покрытого окислами вольфрама методом переконденсации, позволило снизить эффективные потери в ТЭП до 1,87 эВ по сравнению с 2,1 эВ для ТЭП с коллектором из чистого вольфрама. Предполагается, что ресурс такого коллектора составит несколько лет.

Необходимо отметить рост объема и уровня исследований поверхностных явлений, широкое внедрение современных методов анализа состава и структуры адсорбированных систем (методы Оже-спектроскопии и дифракции медленных электронов). Разработаны и освоены усовершенствованные методы исследования работы выхода (термо- и автоэлектронная эмиссия в задерживающем поле) в условиях, максимально приближенных к условиям работы электродов в ТЭП.

Усовершенствованные режимы ТЭП. Ряд докладов (СССР, США, Франция) был посвящен проблеме снижения транспортных потерь в ТЭП. Среди рассмотренных схем — различные триодные системы, импульсные диоды и диоды смешанного типа. Результаты, представленные как в советских, так и в американских работах, подтверждают эффективность вспомогательного разряда и импульсного возбуждения в инертных газах. Неожиданно низкой оказалась эффективность вспомогательного разряда в парах цезия: коэффициент усиления 10—20, эффективные потери около 0,4 эВ. Предполагают, что это объясняется неблагоприятным соотношением сечений рассеяния и ионизации при взаимодействии электронов с атомами цезия.

Интересна возможность усовершенствования импульсного ТЭП, изложенная в докладе С. Маникопулоса и др. (США). Предлагается использовать смесь молекулярного азота с парами цезия в качестве наполнителя импульсных диодов. Предполагается, что при возбуждении такой смеси часть энергии электронов будет передаваться на возбуждение колебательных уровней молекул азота, а затем в процессе распада плазмы

ионизировать атомы цезия при соударении их с возбужденными молекулами азота. Такой механизм ионизации практически исключает нагрев электронного газа и значительно увеличивает время распада плазмы. В работе ИАЭ им. И. В. Курчатова (В. З. Кайбышев и др.) обнаружено явление низкочастотных автоколебаний в триоде с вспомогательным разрядом вследствие наличия обратной связи между основной и вспомогательной цепями через общую плазму между электродами. Возможность регулировать частоту и форму колебаний, а также ряд других благоприятных факторов открывает перспективу применения таких триодов в высокотемпературных и радиационноустойчивых электронных схемах. Представляют интерес результаты исследования отражательной способности молибдена и вольфрама при адсорбции цезия и кислорода для электронов низкой энергии (С. Балестра и др., США). Высокое значение коэффициента отражения тепловых электронов (около 0,5) для электродов с чисто цезие-

вым покрытием может быть причиной ограничения выходных характеристик современных ТЭП.

* * *

По окончании конференции 4 сентября 1975 г. состоялось очередное заседание Международной группы связи (МГС) по ТЭП, где были подведены итоги прошедшей конференции. Принято решение подготовить и опубликовать совместно с трудами конференции сводный отчет о состоянии работ и перспективах использования ТЭП в странах — участницах МГС. Заседание сочло целесообразным проводить дальнейшую работу МГС на прежнем уровне. Принято предложение советских представителей организовать следующее международное совещание специалистов по ТЭП в СССР в 1977 г. Новым председателем Международной рабочей группы связи по ТЭП избран проф. В. А. Кузнецов (ФЭИ, СССР).

КУЛИЧЕНКОВ А. И.

VII Европейская конференция по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы

Конференция проходила 1—5 сентября 1975 г. в Лозанне (Швейцария). В работе конференции участвовали более 400 представителей европейских стран, США, Японии, Австралии, Аргентины, Индии, АРЕ. Было представлено около 200 оригинальных и 24 обзорных доклада, в которых рассматривались различные системы и направления работ по управляемому термоядерному синтезу и физике высокотемпературной плазмы, в том числе токамаки и стеллараторы, открытые магнитные ловушки, пинчи и плазменные фокусы, лазерные системы, электронные и ионные пучки, турбулентный и ВЧ-нагрев плазмы, проблемы примесей и взаимодействия плазмы со стенками камеры, взаимодействие пучков частиц с плазмой, явления аномального переноса в плазме, вопросы теории физики плазмы.

Центральное место занимали результаты исследований на токамаках, которым было посвящено более половины всех докладов. Обсуждались определение зависимости энергетического времени жизни от отдельных параметров плазмы и выяснение механизмов, ограничивающих время жизни частиц и сохранения энергии, определение допустимых значений коэффициента запаса устойчивости плазменного шнура и отношения давления плазмы к давлению магнитного поля, изучение поведения примесей, разработка дополнительных методов нагрева плазмы и методов стабилизации неустойчивости.

Большой интерес вызвали работы, выполненные на крупном французском токамаке ТФР. При дополнительном нагреве плазмы методом инжекции атомарного водорода достигнута температура ионов 1,4 кэВ при плотности $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и времени удержания более 20 мс. Потеря энергии ионами происходит согласно неоклассическому закону, однако наблюдается аномально-быстрая потеря энергии электронами. Эти потери, по мнению авторов, могут быть связаны с внутренней турбулентностью либо с диссипативной неустойчивостью плазмы.

На советской установке «Токамак-6» проведен цикл работ по изучению неустойчивости срыва (пичковая неустойчивость), которая наблюдается при повышении

концентрации плазмы. Авторы считают, что процесс начинается с раскачки некоторой поверхностной моды магнитогидродинамической неустойчивости, которая раскачивает более высокие моды. Затем исходная мода затухает, а энергия, накопленная в других сильно развившихся модах, вызывает ряд эффектов, приводящих к неустойчивости срыва. На американском небольшом токамаке «Алкатор» с сильными магнитными полями с помощью импульсной инжекции газа удалось получить плазму с большой концентрацией порядка 10^{14} см^{-3} . На американской установке АТС для дополнительного нагрева использовались инжекция атомарного водорода, ВЧ-нагрев на нижнем гибридном резонансе и сжатие плазмы магнитным полем. В результате удалось повысить ионную температуру до 1,2 кэВ при концентрации около 10^{13} см^{-3} . На советском небольшом токамаке ТМ-3 показана возможность нагрева электронного компонента плазмы ВЧ-методом на электронном циклотронном резонансе при магнитных полях до 25 кэ. Время жизни плазменного шнура росло при этом с ростом электронной температуры, а механизм нагрева был классическим.

Результаты экспериментов по адиабатическому нагреву плазмы на советской установке «Туман-2» свидетельствуют о существенном улучшении удержания энергии в период сжатия плазмы. Нагрев ионного компонента происходил по адиабатическому закону, а электроны нагревались более интенсивно.

На ряде советских и американских установок проведены эксперименты по проверке теории повышения запаса устойчивости для плазменного шнура с некруглым сечением. Развитие гидромагнитных мод неустойчивости шнура хорошо согласуется с теоретическими данными. На советской установке РТ-4 показана возможность стабилизации неустойчивости срыва в токамаках с помощью переменного продольного тока, равного по порядку величины 0,2 от основного разрядного тока.

Широкий круг экспериментов по изучению поведения примесей в плазме на различных установках типа токамак показал, что основным источником примесей