

нию лопаток последних ступеней ЦНД предельной длины, общим принципам проектирования паровых турбин АЭС, конструкциям последних ступеней, опыту эксплуатации и принципам унификации и типизации турбинного оборудования.

Большинство фирм считает правильным применение для АЭС тихоходных турбин (1800 или 1500 об/мин), однако обосновывает это только экономическими соображениями, не подвергая сомнению надежность современных быстроходных турбин. Наибольший интерес представил доклад чехословацкой фирмы «Шкода», содержащий весьма ценную информацию по характеристикам последних ступеней турбин с лопатами длиной до 1000 мм и скоростью ротора 3000 об/мин, по выбору конструкционного материала и конструкции крепления лопаток. Приведены результаты исследования антикоррозионных покрытий длинных лопаток, работающих во влажном паре, и конструкций направляющих лопаток с засасывающей дренажной прорезью. Описаны методы устранения опасных вибраций лопаток турбин.

Ценный опыт преодоления дефектов турбинной части изложен в докладе, посвященном описанию пусковых работ на АЭС «Гундреминген» (ФРГ) с кипящим реактором мощностью 237 Мвт. Повторные разрывы лопаток первых ступеней цилиндра турбины фирмы АЕГ на 1500 об/мин привели к многочисленным про-

стоям станции на протяжении более 9 месяцев. Причина аварий состояла в пульсации потока пара, возникающей из-за неравномерного распределения влажности в подводящем к ЦНД трубопроводе (наличие зон с содержанием влаги до 12% при среднем влажностном содержании до 1%). Внесение изменений в конструкцию подводящего патрубка обеспечило равномерное распределение влажности пара; кроме того, была изменена конструкция хвостовиков лопаток первых ступеней и дисков ЦНД.

Значительный интерес представляет доклад по тяжеловодным энергетическим реакторам, систематически излагающий канадский опыт, а также доклад, посвященный высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам.

Французская фирма EdF в докладе, освещающем опыт пяти лет эксплуатации основных теплообменников, приходит к выводу, что применение сложных форм теплообменных поверхностей не оправдано из-за трудностей контроля и устранения дефектов и что желательно ориентироваться на создание более простых (в частности, гладкотрубных) теплообменников.

Представляет интерес конструкция японского экспериментального быстрого реактора мощностью 50 Мвт (эл.).

П. А. АНДРЕЕВ

## Симпозиум по стабилизации плазмы обратными связями и динамическими методами

Широкое развитие исследований методов подавления неустойчивостей плазмы системами обратной связи и динамической стабилизацией послужило основанием для созыва симпозиума, организованного Лабораторией физики плазмы Принстонского университета в июне 1970 г. в Принстоне (США). Помимо организаторов в работе симпозиума приняли участие ученые Великобритании, Италии, Норвегии, Советского Союза, Франции, ФРГ. Всего на заседаниях было представлено 48 докладов.

Стимулом для развертывания исследований по стабилизации плазмы обратными связями послужила работа В. В. Арсенина и В. А. Чуянова, опубликованная в 1968 г. [1], явившаяся основанием для успешных экспериментов по подавлению желобковой неустойчивости плазмы в магнитной ловушке «Огра-2» [2]. Впервые предложили использовать систему обратных связей для стабилизации неустойчивостей плазмы А. И. Морозов и Л. С. Соловьев в 1964 г. [3].

Работы по стабилизации плазмы системами с обратной связью, доложенные на симпозиуме, затронули многие вопросы, начиная с классификации механизмов стабилизации и кончая использованием обратных связей для изучения конкретных неустойчивостей.

Дж. Тейлор и К. Лэшмор-Девис (Великобритания) показали, что по типам подавляемых неустойчивостей системы обратных связей следует подразделять на активные и реактивные. К первой категории относятся неустойчивости, характеризующиеся положительной или отрицательной энергией колебания. Для подавления таких неустойчивостей в системе обратной связи должен создаваться фазовый сдвиг сигнала на  $\pm 90^\circ$ . Выбор знака зависит от знака энергии колебания. Ко второй категории относятся неустойчивости перестановочного типа, характеризующиеся нулевой энергией колебаний. Делается вывод, что допустимый

фазовый сдвиг при стабилизации таких неустойчивостей равен 0 или  $180^\circ$ .

Большинство экспериментальных работ по обратным связям, доложенных на симпозиуме, касалось методов активной стабилизации плазмы. В этом случае можно написать дисперсионное уравнение с учетом влияния цепи обратной связи и получить теоретические зависимости сдвига действительной части частоты, величины инкремента, смещения порога неустойчивости от коэффициента усиления и фазового сдвига в цепи обратной связи. Продемонстрировано прекрасное совпадение измеренных зависимостей и рассчитанных теоретически. Наиболее характерные результаты такого типа содержатся в работах Т. Саймонена (США) и Д. Джессби и др. (США); эксперименты выполнены с щелочной плазмой Q-машин. Аналогичные результаты сообщены в докладе Б. Анкер-Джонсона и др. (США).

В работе В. А. Жильцова и др. (СССР) показано, что если параллельно границе плазмы расположить поверхность с конечной проводимостью, то при оптимизированных условиях поглощение энергии в ней, возникающее из-за протекания индуцированных токов, превышает скорость нарастания энергии неустойчивых ионно-циклотронных колебаний. Тем самым в плазму вносится затухание, превышающее инкремент неустойчивости. Цепь обратной связи при некотором фазовом сдвиге ведет себя как поверхность с конечной проводимостью. Приведены результаты экспериментов по подавлению ионно-циклотронной неустойчивости плазмы в магнитной ловушке «Огра-2».

В большинстве ранее проведенных экспериментов по подавлению неустойчивостей обратными связями в качестве управляющих элементов использовались электроды, помещенные вне плазмы, или ленгмюровские зонды, погруженные в плазму. По понятным при-

чинам ни первый, ни второй способы неприменимы для плотной высокотемпературной плазмы. В связи с этим большое внимание в представленных докладах уделено методам безэлектродного и бесконтактного воздействия на плазму. В работах А. Ванга и др. (США) доложены результаты успешного подавления дрейфовой неустойчивости щелочной плазмы микроволновым излучением на верхней гибридной частоте ( $\sim 10$  Гц), модулированным сигналом цепи обратной связи. В докладе Ф. Чена (США) обращается внимание на то, что непосредственное использование микроволновых излучателей для создания бесконтактной цепи обратной связи в случае термоядерной плазмы вызовет затруднения. В связи с этим предлагается использовать систему двух газовых лазеров на  $\text{CO}_2$ , расположенных таким образом, чтобы нелинейное взаимодействие двух инфракрасных лучей привело к появлению разностной частоты, равной верхней гибридной частоте плазмы. Согласно приведенным оценкам, мощность лазеров, необходимая для воздействия на колебания плазмы, не выходит за разумные пределы.

В перечисленных выше работах, а также в других работах, доложенных на симпозиуме, показано, что механизм активного подавления неустойчивостей плазмы, характеризующихся положительной или отрицательной энергией, достаточно изучен, о чем свидетельствует хорошее согласие теоретических расчетов и результатов экспериментов.

Эксперименты и теория реактивной стабилизации плазмы обратными связями были представлены в существенно меньшем объеме. Только в работе В. А. Чуянова, Э. Мёрфи и др. (СССР, Великобритания) доложены эксперименты по стабилизации неустойчивости такого типа, а именно желобковой неустойчивости плазмы в магнитном поле простой пробочной конфигурации. С помощью одноэлектродной цепи обратной связи удалось стабилизировать первый мод желобковой неустойчивости плазмы. Однако подавление желобковых колебаний первого мода сопровождается раскачкой колебаний на других частотах, определяемых характеристиками цепи обратной связи. Потери плазмы при включении обратной связи уменьшаются. В теоретической работе К. Лэшмор-Девиса (Великобритания) поставлен вопрос об оптимальной частотной характеристике цепи обратной связи для стабилизации желобковой неустойчивости. Однако удовлетворительного для практических целей решения вопроса не найдено.

Практически все экспериментальные работы сделаны с помощью одной цепи обратной связи. В то же время при теоретическом анализе задачи используется модель однородных граничных условий. Правомерности использования такой модели была посвящена работа Дж. Кроули (США). На примере шестипольной системы обратной связи, предназначенной для подавления желобковой неустойчивости плазмы показано, что все моды желобковой неустойчивости ниже шестой могут быть подавлены, если коэффициент усиления в цепи превышает некоторое критическое значение. Однако желобковые колебания с номером моды, равным семи и выше, раскачаются, даже если плотность плазмы не достигла уровня, при котором эти колебания становятся неустойчивыми при выключенной системе обратных связей.

В нескольких докладах сообщены результаты теоретического анализа возможности подавления неустойчивости Крускала-Шафранова в системах типа «Токамак». В работе Дж. Кларка и Р. Дори (США) решается задача о стабилизации винтовой неустойчивости шнура и показывается, что управляемые системой обратных

связей токи в поверхности, окружающей плазму, могут стабилизировать неустойчивые моды колебаний, не имеющие радиальных узлов. Практическое осуществление такой системы потребует решения сложных технических проблем. Г. Фюрт (США) дал краткий обзор проблем, связанных с использованием систем обратной связи для стабилизации неустойчивостей плазмы в токамаках. Среди прочих задач рассматривается возможность управления токами в витках, заменяющих медный лайнер токамаков, системой обратных связей. Устранение медного лайнера позволило бы использовать для дополнительного нагрева плазмы магнитное сжатие.

Несколько теоретических докладов посвящено возможности использования обратной связи в режиме кратковременного включения в соответствии с сигналами датчиков, регистрирующих смещение поверхности плазмы. Анализ таких систем показал, что трудности, связанные со стабилизацией перестановочных неустойчивостей линейной цепью обратной связи, в значительной степени устраняются. Наиболее подробно этот вопрос в приложении к стабилизации плазмы в установках типа «Токамак» затронут в работе А. Милнера (США).

Использование высокочастотных полей для стабилизации неустойчивостей плазмы является предметом исследований в течение длительного времени. По-видимому, впервые этот вопрос был затронут С. М. Осовцом (СССР) еще в 1957 г. [4]. Дальнейшее развитие этих работ связано с теоретическими исследованиями Я. Б. Файнберга, В. Д. Шапиро, В. П. Силина, Л. И. Рудакова и А. А. Иванова (СССР), И. Теихмана (ЧССР), а также других авторов.

Проблемы, затронутые в большинстве теоретических докладов, представленных на симпозиуме, связаны с уточнением ранее выполненных работ или нахождением условий стабилизации применительно к конкретным экспериментам. Наибольший интерес представляет теоретическая работа А. А. Иванова и В. Ф. Муравьева (СССР), в которой показано, что обыкновенная волна и волна типа геликон может подавить электростатические неустойчивости с  $kz \ll k$  при условии, что частота возбуждаемой волны намного больше частоты неустойчивости. На примере конусной неустойчивости показано, что использование волны типа геликон предпочтительно, поскольку амплитуда магнитного поля волны в этом случае должна быть меньше.

Большой интерес представляет доклад М. Алкока и Б. Кина (Великобритания), в котором приведены результаты по подавлению дрейфово-диссипативной неустойчивости в плазме положительного столба разряда в гелии и водороде с помощью высокочастотного азимутального магнитного поля. Собственная частота неустойчивых колебаний  $4$  кГц. Частота азимутального магнитного поля варьировалась в диапазоне  $8-100$  кГц. Показано, что неустойчивость в соответствии с теорией А. А. Иванова и И. Теихмана подавлялась при амплитуде переменного поля  $\sim 1\%$  от величины постоянного продольного поля.

Подавление дрейфовой неустойчивости с помощью высокочастотного электрического поля с частотой выше ионной плазменной частоты было продемонстрировано в докладе японских авторов И. Нишида и др. Эксперименты проводились с плазмой газового разряда в гелии при плотности  $2 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^{10}$  см $^{-3}$ .

Неустойчивости типа перетяжек и винтовая неустойчивость в дырочной плазме индиево-сурьмяного полупроводника, помещенного в магнитное поле, была подавлена с помощью ВЧ-поля, создаваемого квадр-

польными проводниками типа стержней Иоффе. Результаты этой работы сообщены в докладе А. Анкер-Джонсона (США).

Большой интерес представил доклад Г. Вольфа (ФРГ), в котором доложены результаты динамической стабилизации неустойчивости Релея-Тейлора тяжелой жидкости над легкой. Высокочастотные механические колебания прикладывались в направлении, параллельном границе раздела жидкостей. При воздействии колебаний время поддержания равновесия тяжелой жидкости над легкой более чем в  $10^4$  раз превышало время развития крупномасштабной неустойчивости при выключенной стабилизации.

В экспериментальных работах Г. Бекера и др. (ФРГ), Дж. Филлипа (США) исследовалась возможность стабилизации неустойчивостей с помощью наложения высокочастотной компоненты продольного магнитного поля. В случае Z-пинча исследовалась также возможность стабилизации неустойчивости с помощью высокочастотного поля линейного квадрупольа. В обоих случаях получено частичное подавление неустойчивостей.

## Симпозиум по методам и аппаратуре для неразрушающего контроля с использованием ядерного излучения

Симпозиум состоялся в июне 1970 г. в Закопане (Польша). В работе симпозиума приняли участие специалисты стран-членов СЭВ, было заслушано 25 докладов.

З. Павловский (ПНР) сделал обзорный доклад, в котором отметил, что можно ожидать значительного прогресса в области автоматизации процессов радиографического, радиометрического и радиоскопического контроля. Обращено внимание на необходимость развития метода определения критического размера дефектов в различных конструктивных элементах и исследования их влияния на прочность.

Э. Беккер (ГДР), давая исторический обзор развития радиографии за прошедшие 5 лет, высказал предположение, что трудно ожидать каких-либо кардинальных усовершенствований этого метода в ближайшее время. Л. Брунарски и др. (ПНР) и А. Н. Майоров (СССР) свои доклады посвятили оптимизации режимов радиографии, что вызвало большой интерес у участников симпозиума, которые признали необходимым разработать единую методику и единые рекомендации по данному вопросу.

В совместном докладе специалистов ПНР и СССР Л. Брунарского, Л. М. Серебренникова и др. изложены основы руководства по применению радиографического метода контроля качества бетонных и железобетонных конструкций. Приведены перечень оборудования, необходимого для радиографии бетона, общие технические условия испытаний, методики измерения толщин бетона, диаметра и глубин залегания арматуры, обнаружения внутренних пустот, а также основные положения техники безопасности при испытаниях строительных конструкций.

В. Т. Фирстов и др. (СССР) дали обзор уровня работ в области ксерорадиографии, привели данные по ксерорадиографическим установкам ПКР-1, ЭРГА-С, ЭГУ-6М, КС-1, выпускаемых в Советском Союзе. Одновременно были рассмотрены характеристики установок, разработанных в США, Великобритании и Японии. Е. Гусев (ПНР) сообщил о ксерорадиографическом оборудовании, выпускаемом Лодзинским ксеротехническим заводом. Отмечено, что разработанные

В целом работы, доложенные на симпозиуме, представляют ценный вклад в дальнейшее развитие исследований методов стабилизации плазмы системами обратных связей и ВЧ-полями. Продемонстрированы большие возможности этих методов при изучении конкретных неустойчивостей, а также намечены пути их использования в будущих исследованиях по программе управляемого термоядерного синтеза. Предполагается издание трудов конференции отдельным выпуском.

Д. А. ЦАНОВ

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Арсенин, В. А. Чуянов. «Докл. АН СССР», 180, 5, (1968).
2. В. В. Арсенин, В. А. Жильцов, В. А. Чуянов. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, v. 2, p. 515, IAEA, Vienna, 1969.
3. А. И. Морозов, Л. С. Соловьев. ЖТФ, 34, 1566 (1964).
4. С. М. Осоев. «Физика плазмы и проблемы УТР», т. 4, стр. 3. М., Изд-во АН СССР, 1958.

Институтом электротехники ксерорадиографические установки «Пылорис» (KS-2 и KS-4) с каскадным методом проявления применяются для контроля в промышленности ПНР. Уже сегодня уровень, достигнутый в области развития методов, позволяет использовать ксерорадиографию для неразрушающего контроля.

З. Годлевский, Б. Каминьский (ПНР) привели результаты работ, проведенных в Институте электротехники; разработаны радиометрические дефектоскопы для контроля активных образцов, вольфрамовых сопел, огнеупорных материалов и угольных блоков. В качестве источников в этих установках использовались  $Co^{60}$ ,  $Cs^{137}$ ,  $I^{192}$ ,  $Tm^{170}$  и  $Am^{241}$ . Приведены сведения о разработках радиометрических дефектоскопов в ГДР для контроля стальных плит, в Японии для контроля труб и резервуаров, во Франции и ФРГ для контроля проката на металлургических заводах и о совместной разработке ЧССР и ПНР радиометрического дефектоскопа для контроля блюмсов.

В докладе Фирстова В. Г. и др. проанализированы возможности применения радиометрической дефектоскопии для неразрушающего контроля блюмсов в процессе проката, центробежных литых труб при их массовом производстве и сварных швов без усиления. Обсуждены спектрометрическая, счетно-спектрометрическая и коллимационно-спектрометрическая методики радиометрической дефектоскопии, приведена методика расчета чувствительности и производительности контроля, иллюстрируемая графиками зависимости производительности контроля от минимальных размеров выявляемых дефектов и размеров коллимационного отверстия.

Несмотря на успехи, достигнутые в экспериментальных и теоретических исследованиях методов радиометрической дефектоскопии, до сего времени не выпускается серийная аппаратура для его реализации в промышленности, что объясняется отсутствием высокоэффективных детекторов излучения, быстродействующей электронной аппаратуры, имеющей малые приборные флюктуации и хорошую чувствительность к незначительным изменениям поступающего сигнала, а также