

^{237}Np , ^{239}Pu на спектре нейтронов деления ^{252}Cf . Например, для ^{235}U получено сечение деления с погрешностью 1,5% (1265 ± 19 мб).

Высокие по точности и разрешению результаты измерений на ядрах ^{237}Np , ^{238}U , ^{243}Am и ^{239}Pu , ^{241}Am были сообщены в докладе Д. Пэйя (Франция), а также в докладе К. Аттли (Англия) об измерениях сечения деления ^{239}Pu и отношения сечений деления ^{238}U и ^{235}U .

Экспериментальные методы нейтронной физики. Рассмотрены вопросы получения и формирования интенсивных пучков холодных поляризованных нейтронов, создания импульсных источников быстрых нейтронов, а также вопросы автоматизации сбора и обработки физической информации. Несколько докладов посвящено системам детектирования нейтронов. Большой интерес вызвал доклад «Источники нейтронов с использованием лазерной техники», в котором показаны возможности создания импульсных источников с высокими параметрами по длительности и интенсивности нейтронного импульса. Получение холодных поляризованных нейтронов с большим выходом свидетельствует о том, что реактор как источник нейтронов может еще шире использоваться в исследованиях по нейтронной физике. Интерес к импульсным источникам резонансных и быстрых нейтронов со стороны экспериментаторов и потребителей ядерных данных по-прежнему большой.

Участники конференции с удовлетворением встретили сообщение о вводе в строй линейного ускорителя «Факел» (ИАЭ им. И. В. Курчатова, Москва) и о постройке первой очереди спектрометра ГНЕИС на базе фазотрона ЛИЯФ. В ближайшее время ожидается создание спектрометра быстрых нейтронов на базе изохронного циклотрона У-240 в ИИИ АН УССР.

Из сообщений зарубежных ученых наибольший интерес вызвал доклад М. Ашгара (Франция) о создании спектрометра незамедленных продуктов деления — ЛОЭНГРИН. Ввод в строй этой установки на самом мощном исследовательском реакторе в Гренобле уже позволил получить детальные сведения о некоторых характеристиках продуктов деления и открывает большие перспективы в будущем.

Конференции по нейтронной физике, уже ставшие традиционными, привлекают к себе все больший интерес. Они способствуют широкому обмену мнениями, идеями и информацией, позволяют проводить плодотворные дискуссии. Все это стимулирует дальнейший прогресс в этой важной области ядерной физики.

Следующую конференцию по нейтронной физике намечено провести в 1977 г.

КАЛЬЧЕНКО А. И., БАЗАВОВ Д. А., ГОРБАЧЕВ Б. И., КИРИЛЮК А. Л., КОЛОТЫЙ В. В., ПШЕНИЧНЫЙ В. А., ФЕДОРОВА А. Ф., ЧЕСНОВА В. Д.

Научный семинар по комплексной оптимизации энергетических установок

23—26 сентября 1975 г. в Иркутске в Сибирском энергетическом институте (СЭИ) СО АН СССР состоялось первое заседание Всесоюзного научного семинара по методам комплексной оптимизации установок по преобразованию тепловой и атомной энергии в электрическую. Тема данного заседания — методы математического моделирования и оптимизации параметров, вида технологических схем и профиля оборудования атомных электростанций. В работе семинара приняла участие 55 человек от 21 организации. Было прочитано и обсуждено 27 докладов. Руководил семинаром чл.-к. АН СССР Л. С. Попырин.

С некоторой условностью все доклады можно разделить на следующие группы: общие вопросы математического моделирования АЭС (девять докладов); математическое моделирование и оптимизация ядерных реакторов (шесть докладов); математическое моделирование теплосилового части АЭС (семь докладов); математические модели АТЭЦ (пять докладов).

Практика последних лет показала, что многообразные задачи ядерной энергетики от определения системных характеристик ее развития до определения и оптимизации параметров АЭС и ее элементов можно и целесообразно решать с помощью математического моделирования. Для АЭС методы математического моделирования дополняют проектно-расчетные работы, позволяя решать задачи, связанные с многовариантными оптимизационными расчетами технико-экономических показателей (пока преимущественно на начальных стадиях проектирования). Подобные задачи возникают в связи с многопараметрической оптимизацией, неопределенностью и неточностью исходной информации, недостатками расчетных методик, критериев эффективности, а также в связи с непрерывной корректировкой технических решений в процессе проектирования. Расчеты на математических моделях реакторов и АЭС

позволяют выявить перспективные тенденции в изменении сочетания параметров, получить большое количество информации для инженерного анализа и наметить направление более детальной проектно-расчетной работы.

Одна из важных областей использования математических моделей — комплексная оптимизация объектов, т. е. целенаправленный выбор таких значений определяющих конструктивно-технических показателей объекта (с учетом технических ограничений), которые соответствуют оптимуму выбранного критерия эффективности (целевой функции, чаще всего расчетным затратам).

Для лучшего понимания иерархии комплекса математических моделей, используемых в ядерной энергетике, на семинар были представлены два доклада о математическом моделировании ядерно-энергетической системы. Результаты моделирования свидетельствуют о сильной связи показателей АЭС как объектов моделирования с показателями системы АЭС и о влиянии системных требований и условий на подходы к методике и выбору ограничений при комплексном моделировании собственно АЭС.

Поскольку семинар на эту тему был методическим и проводился впервые, его участникам важно было возможно шире ознакомиться с методами моделирования, применяемыми в разных организациях. Необходимо было также оценить широту и масштабы работ, особенности подходов и главные акценты, обменяться мнениями и попытаться систематизировать основные, уже используемые или намечающиеся методы математического моделирования АЭС. Поэтому оправдано присутствие представителей довольно большого числа организаций, применяющих методы математического моделирования АЭС, несмотря на то что основные задачи этих организаций в области развития ядерной

энергетики довольно различны и охватывают как учебные цели, так и конкретное конструирование различных узлов и оборудования АЭС. Другими словами, основная цель семинара — рассмотреть вопросы методики моделирования скорее вширь, чем вглубь. При этом имелось в виду, что более глубокое изучение математического моделирования АЭС при меньшем числе участников более целесообразно провести на последующих семинарах. Это будет способствовать достижению больших практических результатов комплексного математического моделирования АЭС.

Выявились совпадение методических подходов и довольно большое различие в акцентах приложения моделей к изучаемым объектам. Все участники семинара подчеркнули важность применения методов математического моделирования для решения научно-исследовательских и прикладных задач в ядерной энергетике, в частности, важность и результативность математического моделирования для экономии времени и, главное, трудовых затрат. Ряд организаций уже разработал модели для комплексной оптимизации АЭС и их частей и уже приступил к практическому использованию. В большинстве случаев наметилось применение метода декомпозиции, т. е. условное расчленение АЭС на две части: «расширенный реактор» и «расширенный машинный зал». В первую входит реактор и ядерное парогенерирующее оборудование, во вторую — турбинное хозяйство и примыкающее к нему тепломеханическое оборудование. Эти две подсистемы оптимизируются по внутренним параметрам, а затем состыковываются по связывающим параметрам, либо фиксируемым, либо выступающим как внешние связи для оптимизируемой подсистемы. Для описания процесса или характеристик объектов в алгоритме модели широко используются аппроксимационные формулы, которые могут корректироваться по мере поступления уточняющей их информации. Для установления адекватности реальной АЭС и ее математической модели показатели реального объекта сравнивались со значениями показателей, рассчитанных на модели при одинаковых исходных данных. Такой метод, например, использовался для комплексной оптимизации АЭС с водо-графитовым реактором, о чем было доложено на семинаре. Оптимизация проводилась по минимуму расчетных затрат; она показала адекватность модели и реального объекта. Большинство показателей определяются с помощью аппроксимационных формул при абсолютной погрешности менее 10%.

К числу других используемых методов, освещенных на семинаре, относится метод «планирования эксперимента». Суть его заключается в том, что энергетический объект (или его элемент) представляется в виде некоторого «черного ящика», т. е. можно абстрагироваться от сложных физико-технических связей между его внутренними элементами. Существенна только связь между входными и выходными переменными. В качестве первых рассматриваются независимые параметры энергетической установки (или ее элементов), в качестве вторых — ее технико-экономические характеристики — «функции отклика», которые представляются в виде уравнения регрессии. Экспериментом является расчет характеристик установки: эксперимент проводится не с реальным объектом, а с его математической моделью. По методу планирования эксперимента проводилась оптимизация термодинамического цикла АЭС на диссоциирующем газе.

На семинаре рассматривались также метод выделения факторов, существенных и несущественных для исследуемого объекта (процесса), который позволяет

определить оптимальный объем модели, и метод эквивалентирования, т. е. преобразования одной математической модели в другую, адекватную с определенной точностью исходной, но более простую.

Широкое внедрение методов математического моделирования в инженерную практику выявляет слабое звено этого процесса — большие затраты труда высококвалифицированных программистов на подготовку программ расчета. Кроме того, программа, разработанная «ручным» способом, не является оптимальной, поскольку ее вид и последовательность определены на основании субъективных соображений программистов. Поэтому в докладе Л. С. Попырина был освещен предложенный в СЭИ более совершенный автоматизированный метод построения математических моделей теплоэнергетических установок. Он обеспечивает как автоматизацию большинства процессов составления вспомогательных процедур по описанию отдельных технологических процессов и элементов оборудования, так и автоматическое формирование математической модели установки по ее технологической схеме. В связи с этим появляется возможность механизации весьма трудоемких работ по созданию математических моделей и сокращению времени их разработки в десятки раз. Из многих докладов видно, что акцент делается на математическое моделирование и оптимизацию собственно активной зоны энергетического реактора. На остальную часть реактора со сложным комплексом инженерных устройств, которые также должны быть объектом математического моделирования в целях оптимизации, пока еще не обращено должного внимания.

Важный вопрос, который выявился в процессе работы семинара, — вопрос о критериях оптимизации. На верхнем уровне иерархии математических моделей в ядерной энергетике, т. е. при рассмотрении системы АЭС; по-видимому, неизбежна многокритериальность оптимизации как следствие многообразия практических задач и условий развития ядерно-энергетической системы; на нижнем уровне, т. е. при моделировании АЭС и их компонентов, по-видимому, более целесообразна однокритериальная оптимизация (с функционалом в виде расчетных затрат). Однако в дискуссии некоторые участники семинара отметили, что такая точка зрения не должна быть однозначной: и при моделировании АЭС (а также ее компонентов) может быть актуальной многокритериальная оптимизация. Особое внимание обращалось на важное значение использования критерия минимума трудовых затрат и трудовых ресурсов. Таким образом, вопрос о критериях оптимизации приобретает самостоятельное значение. Пока его нельзя считать методически согласованным и ясным.

Предметом дискуссии на семинаре явился также вопрос о связи человек — математическая модель. В целом он сводится к тому, что математическому моделированию подвластны только строго ограниченные задачи при наличии просматриваемых технических решений, тогда как принципиально новые технические решения создаются эвристическими методами, которые математическая модель реализовать не может. В некоторых докладах отмечалось, что пока роль математического моделирования в общем процессе разработки и проектирования АЭС относительно невелика. В то же время математические модели, реализованные на ЭВМ, — наиболее эффективный инструмент поиска оптимальных схем и параметров энергогенерирующих установок. Несовершенна еще информация, используемая при математическом моделировании. В связи с этим подчеркивалась важность использования методов оптимизации в условиях неопределенности, неполноты

или некачественности исходных данных, а также актуальность создания информационной системы математического моделирования.

Следует отметить весьма полезные дискуссии, проводившиеся при обсуждении докладов каждой из указанных групп.

В целом семинар положил начало организованному осмысливанию, обобщению и углублению разверну-

вшихся работ по безусловно перспективному новому научному направлению — комплексной оптимизации АЭС (и их компонентов) путем их математического моделирования.

Доклады семинара будут изданы в СЭИ в самое ближайшее время.

КОРЯКИН Ю. И.

Советско-американский семинар по быстрым реакторам

В соответствии с программой сотрудничества между СССР и США в области быстрых реакторов летом 1975 г. в Обнинске был проведен семинар по опыту и проблемам строительства и эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. С американской стороны в семинаре принимали участие представители Администрации по энергетическим исследованиям и разработкам (ERDA), фирм, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией установок с быстрыми реакторами с жидкометаллическим теплоносителем (LMFBR) и национальных лабораторий, работающих над проблемами LMFBR. С каждой стороны было представлено по 11 докладов.

В докладе Т. Немзека и др. показана история развития и современное состояние программы в области LMFBR в США, роль национальных лабораторий и промышленности США в создании принципиальной технологии, топлива, материалов, компонентов для коммерческих LMFBR. Остальные доклады США посвящены строительству, эксплуатации и экспериментальным программам реакторов EBR-II, «Энрико Ферми», SEFOR, FFTF, а также проектированию АЭС в Клинч-Ривере.

В 1974 г. первоначальный план строительства трех демонстрационных АЭС с реакторами LMFBR мощностью 300—500 МВт (эл.) заменен планом сооружения реактора в Клинч-Ривере мощностью 350 МВт (эл.), чтобы сосредоточить усилия на отработке крупномасштабных компонентов и проектировании прототипа коммерческой установки мощностью 1200—1500 МВт (эл.). Программа предусматривает полное промышленное освоение LMFBR к 90-м годам. Главную ответственность за техническую сторону разработки LMFBR несут Ханфордская инженерно-техническая лаборатория и конструкторский центр жидких металлов в Санта-Сусанне. Здесь разрабатываются и испытываются материалы, компоненты и механические узлы, а также приборы для LMFBR. Эти центры располагают: реактором FFTF тепловой мощностью 400 МВт для испытания образцов материалов и горючего (должен вступить в эксплуатацию в 1978 г.); лабораторией высокотемпературного натрия для испытания крупных реакторных компонентов на воздухе и в натрии; инженерно-химической лабораторией и лабораторией горючего (Ханфорд); стендами для испытаний насосов в натрии, моделей парогенераторов тепловой мощностью 35 МВт, моделей парогенераторов на большие течи воды в натрии; стендом очистки крупного оборудования от натрия и др. (Санта-Сусанна). Планируется создание лабораторий для испытаний в натрии крупных компонентов промышленных LMFBR тепловой мощностью 150 МВт (PSTF) и для разрушающих и неразрушающих испытаний облученного горючего и повторного изготовления твэлов.

В области физики программа предусматривает дальнейшее накопление и уточнение ядерных данных, развитие теории и методов расчета реакторов, проведение интегральных экспериментов. Для последних используются реакторы нулевой мощности ZPP-6, ZPR-9, ZPPR, реакторы Аргоннской национальной лаборатории (AFSR, ATSR) и установка TSF. В области безопасности будет проводиться теоретическое и экспериментальное изучение последствий нарушения условий охлаждения твэлов (OPERA), экспериментальное изучение взаимодействия расплавленного горючего с натрием при быстром прекращении циркуляции теплоносителя (TREAT, LOFT — инженерная лаборатория в Айдахо-Фолс), возможности закупорки канала при внезапном выходе газообразных продуктов деления из твэла (TFTF).

Промышленность США активно участвует в выборе концепций LMFBR, выполнении экспериментальной программы, разработке и производстве горючего, материалов активной зоны и оборудования. Производителями уран-плутониевых оксидов являются Аргоннская национальная лаборатория, фирмы «Бабкок энд Уилкоккс», «Дженерал атомикс», «Дженерал электрик» и др. Карбиды производят «Атомикс интернейшнл», «Вестингауз электрик» и Лос-Аламосская лаборатория, нитриды — институт Беттела и Ок-Риджская национальная лаборатория. Различные фирмы и лаборатории участвуют в создании оборудования для реакторов, парогенераторов, механических насосов и т. д.

В настоящее время основной установкой для облучения материалов в США является реактор EBR-II (тепловая мощность 62,5 МВт, максимальный нейтронный поток $3 \cdot 10^{15}$ нейтр./см²·с). В нем достигнуты следующие выгорания (% тяжелых атомов) и интегральные потоки облучения горючего (10^{23} нейтр./см²): для карбидного горючего 12 и 1,2; металлического — 15 и 1,2; оксидного — 17 и 1,5. В течение 10 лет эксплуатации реактор работал при среднем коэффициенте нагрузки 42,6%. Низкое значение последнего объясняется в основном программой экспериментов и большим числом срабатываний СУЗ из-за ложных сигналов (280 с 1966 г.).

Создание и эксплуатация АЭС «Энрико Ферми» (1963—1972 гг.) тепловой мощностью 200 МВт внесли значительный вклад в отработку принципиальной схемы АЭС с LMFBR, реакторную технологию, проектирование и конструирование, определение ядерных характеристик, проведение механических испытаний и эксплуатацию крупных натриевых компонентов LMFBR. В 1966—1970 гг. АЭС находилась в ремонте в связи с частичным расплавлением двух топливных сборок и попаданием продуктов деления в систему охлаждения. В конце 1972 г. она выведена из эксплуатации из-за финансовых трудностей.