

чеством запорной арматуры) с успехом используется отсекаание ремонтируемых участков трубопроводов ледяными пробками. Для образования пробок используется жидкий азот и твердый CO_2 .

По опыту кипящих реакторов было представлено четыре доклада, в которых анализируется работа атомных электростанций США «Дрезден», «Валлеситос», и EBWR, а также атомная электростанция ФРГ «Каль». К концу 1962 г. на этих станциях выработано свыше 2 млрд. *квт·ч* электроэнергии. По оценке авторов, станции продемонстрировали высокую надежность, простоту эксплуатации и отсутствие трудностей в проведении ремонтных работ. Несмотря на то что реактор «Дрезден» работал с поврежденными твэлами (поступающий в турбину пар содержал продукты деления), текущий плано-предупредительный ремонт турбины был выполнен практически обычными методами и в обычные сроки без какого-либо переоблучения обслуживающего персонала. Для того чтобы исключить необходимость работы в масках, были приняты меры, предотвращающие возможность высыхания поверхностей турбины до ее полной отмывки. При осмотре турбины никаких следов эрозии не было обнаружено. В настоящее время в США для такого типа станций выполнен проект турбогенератора мощностью 600 *Мвт*. Опыт эксплуатации показал, что в больших кипящих реакторах практически отсутствуют колебания поля тепловыделений, связанные с перераспределением Xe^{135} . При постоянной мощности реактора требуется, как правило, не более одного перемещения стержней регулирования в день.

В большом и подробном докладе «Обзор работ по ядерному перегреву» был обсужден опыт петлевых испытаний пароперегревательных элементов в Валлеситосском реакторе VBWR. Большая серия испытаний различных по конструкции твэлов показала, что используемая для покрытий нержавеющей сталь склонна к быстрому разрушению под воздействием коррозии под напряжением. Стали с увеличенным содержанием никеля имеют повышенную устойчивость. В докладе описана конструкция строящегося там же реактора EVESR, предназначенного для широкой серии испытаний пароперегревательных элементов. Реактор будет приспособлен для работы с поврежденными элементами.

По опыту эксплуатации графито-газовых реакторов было представлено наибольшее число докладов.

В настоящее время в Великобритании на четырех атомных электростанциях (в Колдер-Холле, Чапел-Кроссе, Брадуэлле и Беркли) работают 12 реакторов, первые из которых (в Колдер-Холле) действуют почти семь лет. В ближайшие пять лет предполагается ввести в строй еще четырнадцать крупных энергетических реакторов общей электрической мощностью около 3000 *Мвт*. Ожидается, что для крупных английских

атомных станций стоимость электроэнергии составит 0,53 *пенс/квт·ч* (0,62 *цента/квт·ч*): капитальные затраты 0,3, первая загрузка 0,05, топливная составляющая 0,08 и эксплуатация 0,10 *пенс/квт·ч*. Расходы на регенерацию горючего и возврат плутония в этих цифрах не учитываются.

В настоящее время средний коэффициент нагрузки станций в Колдер-Холле и Чапел-Кроссе превышает 92%, несмотря на то что перегрузка горючего в этих реакторах требует их остановки. Перегрузку горючего на реакторах в Беркли и Брадуэлле будут производить на ходу. До глубины выгорания 2000 *Мвт·сутки/т* состояние твэлов с магноксовыми покрытиями остается очень хорошим. При более глубоком выгорании сказывается набухание урана. В целях предупреждения деформации и придания большей жесткости твэлы новых реакторов снабжаются специальными бандажами. Считается, что реально достижимая глубина выгорания в этих реакторах может составить 3500—4500 *Мвт·сутки/т*.

Аварии на станциях в Колдер-Холле и Чапел-Кроссе связаны главным образом с выходом из строя вспомогательного оборудования. Редкие случаи повреждения твэлов вызывались, как правило, плохим качеством торцевой заварки покрытия или повреждением элементов при их загрузке в реактор. Состояние корпуса реактора в Колдер-Холле не вызывает опасений. Повышение температуры хладоломкости корпуса за двадцать лет эксплуатации не превысит 20°C .

Французские реакторы G-2 и G-3 работают с 1959 и 1960 гг. соответственно. В 1963 г. выведен на мощность реактор EDF-1. Бетонные корпуса французских реакторов находятся в хорошем состоянии. Несколько стягивающих тросов из-за выявившейся коррозии заменены. Процент замененных тросов невелик. В реакторах G-2 и G-3 успешно осуществляется перегрузка на ходу. Несколько французских докладов посвящены специальным вопросам: созданию металлических и бетонных корпусов реакторов, организации перегрузки горючего, изучению эффекта Вигнера в графите и т. д.

Перегрузка горючего в реакторе итальянской атомной электростанции «Латина» с графито-газовым реактором электрической мощностью 200 *Мвт* производится на ходу. Перегрузочная машина испытана в рабочих условиях и показала хорошие результаты.

Конференция отразила накопленный опыт эксплуатации практически всех типов энергетических реакторов. Этот опыт свидетельствует о том, что по надежности и работоспособности атомные станции не уступают энергетическим установкам обычного типа. При использовании соответствующих мер защиты ремонтные работы, как неоднократно подчеркивалось на конференции, не вызывают особых затруднений.

А. Н. Новиков

Конференция по технологии новых ядерных материалов и неметаллического горючего

Конференция была организована Международным агентством по атомной энергии и проходила в июле 1963 г. в Праге. Основное содержание доложенных на конференции работ — вопросы, связанные с созданием ядерных материалов для использования их в условиях повышенных температур. В работе конференции приняло участие более 150 ученых из 23 стран и четы-

рех международных организаций; на 9 заседаниях было заслушано свыше 60 докладов (в том числе 15 докладов представили ученые Франции, 7 — Великобритании, 6 — СССР, 5 — Чехословакии, 3 — США и т. д.).

Значительная часть докладов была посвящена исследованиям в области технологии дьюксии урана.

В докладах М. Делаша, Р. Хаузера, Р. Дельмаса (Франция) и Е. Апарисо (Испания) рассматривались вопросы производства двуокиси урана в укрупненных масштабах. М. Делаш привел данные о технологии получения двуокиси урана на нескольких промышленных предприятиях Франции путем осаждения диурата аммония с последующей прокалкой и восстановлением. Приводилось описание аппаратуры и режимов осаждения, фильтрации, прокалки, восстановления.

Р. Дельмас и Ш. Хольдер сообщили данные по технологии производства двуокиси урана во вращающейся печи непрерывного действия. На установке с производительностью 10 кг/ч было получено несколько сот килограммов порошка двуокиси с хорошей однородностью и высокой спекаемостью. Установка непрерывного действия, на которой производилось спекание таблеток из этой двуокиси, описана в докладе Р. Хаузера. Управление работой печи автоматизировано, осуществляется непрерывный контроль температуры и состава среды (диссоциированный аммиак или водород). Установка включает две объединенных печи: предварительного спекания при 800°С и окончательного спекания при 1700°С. Производительность печи составляет 5 т в месяц. Спеченные таблетки, полученные на этой установке, имели плотность $0,97 \pm 0,01$ от теоретической. Структура состояла из равноосных зерен размером около 10 мк, отклонение состава от стехиометрического было меньше 0,005.

Несколько докладов касались различных лабораторных исследований новых технологических методов и приемов получения двуокиси урана и изделий из нее. Так, в докладе Дж. Бенедикта и др. (Ханфорд, США) изложены результаты работы по получению двуокиси плутония и урана, а также их твердых растворов путем электроосаждения из расплава соответствующих хлоридов при температурах 500—750°С. Двуокись урана, полученная таким методом на укрупненной установке, характеризуется отношением O : U, равным 2,0006, и плотностью, составляющей не менее 10,92 г/см³, т. е. 0,995 от теоретической. В лабораторных условиях при тщательном контроле процесса удавалось получать монокристаллы весом до 4 г. Определены условия осаждения двуокиси урана в форме поликристаллических цилиндрических стержней. По мнению авторов, данный метод изготовления компактной двуокиси может в будущем конкурировать в экономическом отношении с обычными способами. Аналогичным способом были также получены кристаллы PuO₂ и твердых растворов UO₂—PuO₂ и UO₂—ThO₂, содержащие соответственно до 14 и 50 вес. % PuO₂ и ThO₂.

В докладе югославских ученых Д. Колара и др. сообщались результаты исследования по получению UO₂ путем взаимодействия комплексного аммония — фторид урана с водяными парами и водородом при температуре 500—600°С. Таблетки из такого порошка, спеченные при 1350°С, имели относительную плотность до 0,94.

Получение двуокиси урана путем электрохимического восстановления карбонатного раствора было изложено в докладе В. Правдина и др. (Югославия). В электролизере с ртутным катодом была получена α-фаза UO₂ с отношением O : U от 2,04 до 2,0.

В докладе Ц. Бондесана и др. (Италия) описан процесс производства UO₂ в форме шариков размером в несколько миллиметров. Сферические заготовки для спекания были получены путем изостатического прессования шариков, формованных в матрицах из резины или пластмассы. Оптимальные условия прессо-

вания обеспечивались путем использования очень вязкой жидкости, не проникающей в поры. Методика и результаты исследования таких шариков на термостойкость были приведены в докладе Э. Брутто и др. (Италия). Работа Б. Живановича и др. (Югославия) посвящена исследованию закономерностей вибрационного уплотнения порошков различных окислов (UO₂, SiO₂, MgO и др.).

В докладе Дж. Валлифа и др. (США) приводились результаты работы по технологии изготовления и испытаниям твэла с сердечником из двуокиси урана и с оболочкой из металлокерамического алюминия. Вибрационное уплотнение позволило достичь плотности горючего 0,8—0,88 от теоретической. К моменту написания работы было достигнуто выгорание $6,40 \cdot 10^3$ Мет-сумки/т (при проектной величине $25 = 30 \cdot 10^3$ Мет-сумки/т).

Г. Байн и др. (Франция) осветили проблемы выбора и конструирования оболочек из нержавеющей стали для твэлов первой загрузки реактора EL-4.

Некоторое, сравнительно небольшое количество докладов было посвящено дисперсионным твэлам. Так, в докладе Л. Мени и др. (Франция) даны результаты исследований технологии и свойств стержневых и трубчатых твэлов на основе двуокиси урана в матрице из нержавеющей стали. Твэлы могут иметь длину 2 м при содержании горючего 20—60 вес. % и диаметре сфер UO₂ более 50 мк. Была исследована теплопроводность кермета в зависимости от содержания и крупности частиц двуокиси урана. Указывалось, что продолжительные отжижки и тепловые удары не привели к растрескиванию или отслаиванию оболочек трубчатых элементов. Технология и свойства твэлов пластинчатого типа с аналогичным керметом была описана в докладе Г. Ллойда (Великобритания). Для получения керметов, содержащих до 50 об. % UO₂, использовались спеченные сферические частицы UO₂ диаметром 100—500 мк. В качестве метода для достижения высокой плотности и хорошего сцепления UO₂ с матрицей из нержавеющей стали при условии минимального раздробления и деформации частиц UO₂ исследовался процесс прокатки при температуре до 1300°С и общем обжатии от 40 до 90%. В работе приводятся измерения при различных температурах механические свойства подобных керметов, содержащих 30, 40 и 50 об. % UO₂, обсуждается влияние размера и равномерности распределения UO₂ на механические свойства и даны результаты испытаний в условиях термических циклов.

Влияние больших выгораний на структуру двуокиси урана, диспергированной в медной матрице, исследовалось в работе С. Т. Конобеевского и др. (СССР). После выгорания $1/3$ всех атомов урана в частицах UO₂ появились поры размером 2—4 мк, причем период кристаллической решетки несколько уменьшился (с 5,45 до 5,40 Å), что объясняется происходящим «внутренним окислением» до UO_{2,33}. Приведены также данные о влиянии облучения на взаимодействие UO₂ с алюминием. Облучение в значительной степени способствует протеканию реакции, и образование интерметаллида было установлено даже при 100°С.

В обзорном докладе Дж. Робертсона (Канада) указывалось, что основными факторами, ограничивающими повышение экономичности горючего на основе двуокиси урана, являются высокая температура в центре, выход продуктов деления и деформация. Докладчик отметил, что достигнуты определенные успехи в понимании природы этих явлений. Так, в последних работах была обнаружена очень высокая

теплопроводность монокристаллов двуокиси урана при повышенных температурах. Однако Дж. Робертсон сообщил, что согласно исследованиям в Чолк-Ривере крупные столбчатые зерна UO_2 , образовавшиеся в процессе облучения в реакторе, не обязательно обладают этой высокой теплопроводностью и что высокая теплопроводность может быть получена и для поликристаллической двуокиси урана путем регулирования химического состава. Продольная деформация оболочек твэлов горючим в виде таблеток UO_2 может быть существенно уменьшена, если торцы таблеток сделать слегка вогнутыми. Было установлено, что благодаря пластичности двуокиси урана такие впадины могут компенсировать объемные изменения. Докладчик также отметил, что при высоких выгораниях существенно уменьшается (примерно на три порядка) эффективная скорость диффузии газообразных осколков; это явление, по-видимому, может быть объяснено образованием в двуокиси урана пор, действующих как ловушки.

Х. Андриессен и др. (Бельгия) исследовали влияние на теплопроводность двуокиси урана таких факторов, как способ уплотнения и изменения структуры. В докладе М. Юнуса (Франция) были приведены результаты исследования свойств и изменения структуры кольцевых таблеток двуокиси урана в реакторе при контролируемом нагреве с помощью вольфрамового стержня. В частности, показано, что образование структуры со столбчатыми зернами начинается с $1700^\circ C$.

Основное внимание на конференции было уделено монокарбиду урана и плутония. Детальному исследованию процесса получения монокарбидов урана и плутония восстановлением оксидов углерода в вакууме был посвящен доклад Р. Эйслея и др. (Великобритания). В работе рассмотрена кинетика и механизм реакции, влияние размера частиц и способа получения оксидов. Исследовался состав промежуточных продуктов реакции и продуктов, испаряющихся в процессе восстановления PuO_2 при температуре выше $1450^\circ C$. Из порошков карбидов спеканием в вакууме и других средах получены образцы с плотностью выше 0,92 от теоретической. В докладе Г. Довелла (ЮАР) рассматривались вопросы получения моно- и дикарида урана восстановлением закиси окиси урана в вакууме.

Несколько докладов было посвящено получению изделий из монокарбида урана литьем в различных вариантах. Так, в докладе А. Аккари (Франция) приводились результаты исследования по плавке и отливке УС в печи с электронно-лучевым нагревом. Авторы сообщают, что им удалось получить литые цилиндрические образцы хорошего качества (равновесная микроструктура, стабильный состав и т. д.). В другом французском докладе (А. Порнеф) сообщались результаты, полученные при дуговой плавке монокарбида урана в графитовом тигле. При таком методе, отличающемся отсутствием механических операций, расплавленный монокарбид раздвигает временные заглушки из карбида и заполняет цилиндрические изложницы в дне плавильного тигля. Таким образом было получено 2 м стержней УС диаметром 12—13 мм и длиной около 100 мм. Авторы отмечают, что взаимодействие монокарбида урана с графитовой формой невелико и толщина поверхностного слоя дикарида составляет около 0,1 мм. Литые стержни подвергались бесцентровому шлифованию.

Х. Бергва и А. Форнес (Испания) сообщили, что интерес к монокарбиду урана связан с возможностью его использования в реакторах с тяжелой водой и органическими теплоносителями. Несколько тонн монокар-

бида урана было получено дуговой плавкой смеси $UO_2 + C$ или $U + C$ (использовался сравнительно дешевый урановый скрап).

Результаты исследования спекания порошков УС и УС — PuC были изложены в докладе Л. Рассела (Великобритания). На порошках, полученных измельчением литых карбидов, а также восстановлением оксидов углеродом, исследовалось влияние содержания углерода, размера частиц и режима спекания.

В исследованиях структуры и состава сплавов на основе УС основное внимание было уделено сплавам типа оксикарбидов и карбонитридов. Эти сплавы исследовались в нескольких работах. В докладе Т. Сано и др. (Япония) был дан термодинамический анализ устойчивости оксикарбидных фаз. Экспериментальная проверка проводилась путем рентгеноструктурного анализа продуктов взаимодействия UO_2 с УС или US_2 после нагревания при $1200 - 1750^\circ C$ в вакууме. Авторы указывают на возможность получения продукта состава $US_{0,2}O_{0,8}$. Аналогичным методом исследовалась устойчивость карбонитридных фаз в зависимости от давления азота и температуры. Несколько отличающиеся данные по исследованию фазового состава карбонитридов и оксикарбидов сообщаются в докладе Л. Рассела (Великобритания). Предельный состав оксикарида соответствует формуле USO . Повышение содержания кислорода сверх предела растворимости приводит к появлению включений двуокиси урана. В этом докладе сообщались также результаты исследования системы $U - Pu - C$ в интервале 50—60 ат. % C при температуре $1500 - 2100^\circ C$ (непрерывный ряд твердых растворов между Pu_2C_3 и U_2C_3) и анализировалось влияние изменения содержания углерода на теплопроводность сплавов системы $U - C$. Фазовый состав литых образцов УС с различным содержанием кислорода и азота обсуждался также в докладе Ж. Вангееля (Бельгия).

Кинетика и механизм окисления монокарбида урана в углекислом газе исследовались в работе Р. Дерю и др. (Франция).

Б. Чайлдс и др. (Великобритания) обсуждали результаты исследования поведения при облучении литого монокарбида урана.

В нескольких докладах рассматривалось получение и использование частиц дикарида урана с покрытиями из пироуглерода. Результаты по нанесению таких покрытий, полученные на установке с высокочастотным нагревом, приводились в докладах Ф. Бенесовского (Австрия) и А. Ориоля, А. Филлатра и др. (Швейцария, Франция). Вопросы работоспособности таких частиц обсуждались в докладе Р. Хэддла и др. (Великобритания). Описанный в этом докладе тепловыделяющий элемент высокотемпературного реактора «Дракон» с гелиевым охлаждением состоит из группы графитовых трубок, заполненных таблетками из графита с диспергированными в нем сферическими частицами дикарида урана.

Пироуглеродные покрытия в противоположность карбиду кремния сравнительно легко проницаемы для таких продуктов деления, как Ba, Cs, Sr. На микрофотографиях хорошо видно, что после реакторных испытаний при температуре около $1200^\circ C$ часть оболочек из пироуглерода оказалась разрушенной.

Г. А. Меерсон и др. (СССР) сообщили результаты исследования процесса горячего прессования твердых растворов УС и ZrC. Изучено влияние небольших количеств никеля на технические свойства этих сплавов при высоких температурах. Как было сообщено в докладе Ф. Барта, А. Клаусса и др. (ФРГ и Бельгия)

использование таблеток из твердого раствора UC и ZrC , взятых в отношении 1:20, настолько уменьшило выход осколков в сферических графитовых твэлах, что отпала необходимость в специальной обработке графитовых шаров для обеспечения их газонепроницаемости. В другом докладе тех же авторов рассмотрено выделение продуктов распада из таких твэлов. Особенность этого исследования, проводившегося в специальной петле с нагревом до $1000^\circ C$, заключается в измерении активности диффундирующих осколков непосредственно в процессе облучения.

Два доклада были посвящены вопросам, связанным с повышением рабочей температуры горючего на основе металлического урана. В докладе В. Е. Иванова и др. (СССР) описаны некоторые свойства дисперсионно упрочненных металлокерамических сплавов урана. В качестве возможных упрочняющих материалов были

исследованы UO_2 , UC , Al_2O_3 , MgO и UBe_{13} . В докладе Ф. Бросса и др. (Италия) с помощью количественного микроанализа электронным пучком была исследована эффективность применения прослоек Ni , Cr , V , Nb , а также сложных покрытий типа Si/V , Si/Cr и др. в качестве диффузионных барьеров между металлическим ураном и алюминием.

На конференции были представлены также доклады по конструкционным ядерным материалам: окиси бериллия (доклады П. Л. Володина и др. — СССР, Р. Боже и др. — Франция, О'Нейла и др. — Великобритания), графиту (доклады Ф. Задо и Кандича — Югославия), металлокерамическому сплаву $Mg - Be$ (доклад В. Е. Иванова и др. — СССР).

Материалы конференции будут опубликованы МАГАТЭ в начале 1964 г.

Р. Е. Котельников

II Международный конгресс по автоматическому управлению

В августе — сентябре 1963 г. в Базеле (Швейцария) состоялся Второй конгресс Международной Федерации по автоматическому управлению (ИФАК). Была также организована выставка оборудования систем автоматического управления.

В работе конгресса приняло участие около 1500 делегатов из 30 стран. Делегация от Советского Союза состояла из 80 человек и возглавлялась академиком В. А. Трапезниковым. Всего было представлено 157 докладов, которые были распределены по 57 разделам. Наиболее важными были следующие разделы: оптимальные системы; самонастраивающиеся системы; нелинейные системы со случайными параметрами; релейные системы; нелинейные стохастические системы; системы обучения и предсказания; оптимальное программирование; надежность; астронавтические системы; применения автоматки в промышленности.

Обзорные доклады были посвящены надежности, статистическим методам в автоматическом управлении, обучающимся машинам, самонастраивающимся системам, достижениям в обработке информации и их отражению в автоматическом управлении, компонентам систем управления, применению автоматки в работе и управлении электрическими энергосистемами, успехам автоматки в черной металлургии, технике проката металлов, в химической и нефтяной промышленности. По сравнению с Первым конгрессом ИФАК* число докладов, относящихся к ядерной и реакторной тематике, сократилось. В то же время теоретический уровень работ во многих областях автоматического управления значительно повысился, в первую очередь это относится к теории обучающихся автоматов, самонастраивающихся и оптимизирующих систем, к вопросам устойчивости и надежности. Большое внимание уделялось теоретическому анализу поведения существенно нелинейных систем автоматического управления, вопросам их устойчивости (в особенности методу Ляпунова). Значительно возрос интерес к статистическим методам изучения линейных и нелинейных динамических систем, а также к связанной с этими методами технике.

Тенденция к усложнению систем автоматического управления делает оправданным то внимание, которое уделялось на конгрессе проблеме надежности. Кроме

обзорных докладов Б. С. Сотскова (СССР), Г. Вайсмана (ФРГ) и Г. Глинского (Канада), наибольший интерес представляет доклад английских специалистов Л. Лоренса и Р. Скотчера, посвященный исследованию надежности систем управления ядерными энергетическими установками, и доклад Дж. Даммера (Великобритания), изучавшего надежность деталей электронной аппаратуры. В первом из них обосновываются соображения о необходимости повышения надежности автоматического управления реакторов путем создания многоканальных систем, т. е. путем резервирования (введения избыточности). Показано, что в случае резервирования необходимо применять устройства самоконтроля, при помощи которых можно в короткий срок обнаружить неисправные элементы и автоматически заменить их на резервные. Замена одноканальной системы на трехканальную увеличивает надежность системы в 10^4 раз. Для изучения практических вопросов надежности систем управления ядерными реакторами в Великобритании сооружен специальный стенд, на котором отрабатываются схемы повышенной надежности совместно с моделью реактора. Из доклада Дж. Даммера видно, что в Великобритании в течение длительного времени (с 1949 г.) ведется тщательный анализ работы элементов электронных схем. Из полученных данных автор заключает, что надежности электронной аппаратуры в значительной степени способствует применение логических модульных элементов, в особенности полупроводниковых, с использованием избыточности и хорошо организованной системой температурной стабилизации.

Среди докладов, посвященных применению цифровых управляющих машин, привлекает внимание работа Т. Тюрпена и Ж. Тийе (Франция) «Принципы и осуществление автоматической системы перегрузки горючего в ядерном реакторе». Описаны общие принципы действия французской перегрузочной машины и схемы управления. Устройство предназначено для перегрузки твэлов в уран-графитовом реакторе, охлаждаемом углекислым газом. Все операции выполняются без остановки реактора (температура газа $350^\circ C$, давление 28 кг/см^2). Характерным является высокая степень автоматизации и разделение функций системы перегрузки между несколькими машинами. При значительных весах (вес поворотного круга с загрузочными машинами составляет 1200 т) обеспечивается точность

* См. «Атомная энергия», 9, 418 (1960).