

Атомные электростанции Италии

В сентябре 1964 г. советская делегация во главе с А. М. Петросьянцем по приглашению Национального комитета по ядерной энергии Италии посетила атомные электростанции и ядерные центры страны.

Делегация посетила АЭС в Гарильяно (мощность 160 Мет), в Латине (мощность 210 Мет), Трино-Верчеллесе (мощность 272 Мет.) Центр ядерных исследований в Касачча, Научно-исследовательский институт во Фраскати. Кроме того, делегация ознакомилась со структурой и задачами Национального комитета по атомной энергии Италии (СNEN).

АЭС в Гарильяно

Электростанция расположена в устье р. Гарильяно в провинции Казерта. На станции установлен кипящий реактор, работающий в блоке с турбиной на насыщенном паре.

Ядерное оборудование электростанции изготовлялось по проекту американской фирмы «Дженерал электрик», остальное оборудование изготовлено по проектам итальянских фирм. Строительство АЭС было начато в 1960 г., в июне 1963 г. реактор был доведен до критического состояния и с января 1964 г. находится в эксплуатации.

АЭС в Гарильяно является усовершенствованным типом действующей в США Дрезденской АЭС с кипящим реактором. Основные усовершенствования заключаются в следующем: а) биологическая защита АЭС доведена до минимально необходимых размеров, что снизило стоимость станции; б) около реактора установлена разборная защита из бетонных блоков, обеспечивающая необходимую радиационную безопасность персонала; в) регулирующие стержни из бористой стали (2 вес. % В) заменены на стержни, состоящие из трубок с порошком карбида бора; г) в активную зону введены камеры деления для измерения распределения энерговыделения.

Конструкция реактора обеспечивает хорошую саморегулируемость установки в переходных режимах. Несмотря на то, что турбина работает на активном паре первого контура, имеется возможность кратковременного пребывания обслуживающего персонала в машинном зале. Запас до критических тепловых нагрузок составляет 3 против расчетного значения 1,7, что позволяет увеличить мощность реактора. Станция достаточно компактна, что достигнуто за счет разборных защитных блоков, установкой местных кранов и подъемников, вынесением за пределы защитной оболочки баков чистой воды и т. п. Аварийный запас воды в конденсаторе расхолаживания обеспечивает расхолаживание реактора в течение 8 ч при полном обесточивании станции. Проверка оборудования на макетах и специальных стендах обеспечила его качественную подготовку к эксплуатации в реакторе. Малогабаритная система

перегрузки с захватной штангой проста по конструкции и удобна в эксплуатации. Перегрузка горючего в реакторе осуществляется под слоем воды. При этом значительный вес кассет (300—400 кг) позволяет проводить перегрузку за сравнительно короткое время. В корпусах реактора и парогенераторов применяется наплавка из нержавеющей стали. Трубные решетки парогенераторов также выполнены с наплавкой. В местах уплотнений используются трубчатые прокладки с затяжкой соединений методом предварительной натяжки шпилек.

Планировка помещений станции и их отделка просты и недороги. Качество отделочных работ высокое.

Необходимо отметить, что на станции применяется большое количество малогабаритных приборов итальянского производства на полупроводниках и печатных схемах. Во многих случаях приборы установлены непосредственно на линиях мнемосхем. Щиты управления занимают немного места и удобны в обслуживании.

АЭС показала хорошие эксплуатационные качества. Она практически все время работает на полной мощности. Остановки станции за время эксплуатации не связаны с какими-либо неисправностями основного реакторного оборудования.

Испытания подтвердили большие запасы до критических тепловых нагрузок, позволяющие увеличить мощность реактора на 50% (т. е. на 75 Мет). Увеличение мощности будет осуществлено повышением паропроизводительности реактора. При этом объемное паросодержание в наиболее напряженном канале достигнет 70—75% вместо 61%, а в среднем по реактору увеличится с 23 до 32%. В связи с повышением мощности реактора на станции решено установить еще одну турбину.

Эксплуатационный персонал станции состоит из 110 человек. Стоимость производства электроэнергии составляет 9,5 коп/квт·ч, в то время как стоимость электроэнергии в этом районе, вырабатываемой тепловыми станциями, составляет 5—6 коп/квт·ч.

АЭС «Энрико Ферми» в Трино-Верчеллесе

Станция с водо-водяным реактором полезной мощностью 272 Мет построена в северной части Италии в 120 км к западу от Милана в провинции Трино-Верчеллесе на реке По. Реактор АЭС «Энрико Ферми» доведен до критического состояния в конце июля 1964 г. Станция рассматривается итальянскими специалистами как наиболее совершенная из серии АЭС с водо-водяными реакторами. По сравнению с аналогичной АЭС США «Янки» мощность АЭС «Энрико Ферми» увеличена почти в два раза в результате некоторых существенных усовершенствований, главным образом активной зоны реактора. К ним относятся:

а) использование химического регулирования реактора;

б) применение трех концентрических зон обогащения урана. Во внутренней зоне обогащение урана составляет 2,7%, в промежуточной зоне — 3,4% и во внешней зоне — 3,9%;

в) сочетание в стержнях управления поглощающих и делящихся материалов.

Итальянская фирма SELNI купила реактор и основное технологическое оборудование первого контура у фирмы «Вестингауз». Полная стоимость АЭС составила 45·10⁹ лир. В эту сумму включена стоимость изготовления топливных кассет, равная 1,8·10⁹ лир. Стоимость же урана не включена, так как США предоставили Италии многолетний кредит на ядерное горючее. Удельная стоимость киловатта АЭС составляет ~175 тыс. лир (257 долл./квт).

При коэффициенте использования установленной мощности 0,7 стоимость электроэнергии с учетом возврата плутония и U²³⁵ будет 7,5—8 лир/квт·ч, т. е. примерно в полтора раза дороже стоимости электроэнергии, вырабатываемой обычными тепловыми электростанциями этого района.

Обслуживающий персонал станции состоит из 30 человек сменного персонала и 100 человек ремонтного персонала и администрации. Все оборудование первого контура рассчитано на мощность 843 Мвт (т.). Теплоносителем служит обычная очищенная вода давлением 142 атм. Температура воды на входе в реактор 266° С, на выходе 297° С.

Все оборудование и коммуникации первого контура размещаются в защитной цилиндрической оболочке. Диаметр оболочки 30,5 м, высота 58 м, толщина стенок 16 мм для верхнего свода и 38 мм в остальных местах. Оболочка рассчитана на давление 2,3 атм. Внутри оболочки предусмотрены разбрызгиватели воды для снижения давления пара при аварии.

Парогенераторы и компенсаторы объема расположены вокруг реактора без специальной защиты. При необходимости они могут быть окружены разобранной бетонной защитой толщиной 45 см. Парогенераторы, насосы, арматура и трубопроводы петель первого контура размещены в одном боксе. Крепление оборудования осуществляется на подвесках. Подвески насосов пружинные. На трубопроводах первого контура отсутствуют компенсаторы температурных расширений, что объясняется небольшим отличием температуры «холодных» и «горячих» трубопроводов. Компонровка, а также легкие переходные площадки обеспечивают удобный доступ к любому оборудованию.

АЭС «Латина»

Электростанция находится рядом с Латиной в 700 м от моря. На АЭС установлен графито-газовый реактор, являющийся развитием английских реакторов в Беркли и Брадфордле. Большинство оборудования АЭС разработано и изготовлено английской промышленностью.

На АЭС установлено три турбогенератора по 70 Мвт и два турбогенератора по 12 Мвт. В реактор газ поступает по шести циркуляционным петлям. Газовые допуски плавное изменение числа оборотов в минуту от 550 до 2500, имеют масляную систему уплотнения.

Строительство АЭС начато в 1959 г. и закончено в 1963 г. Пусковые работы начались в ноябре 1962 г. и закончились в марте 1964 г.

Температура газа на выходе из реактора измеряется в 300 каналах (10%). Измерение и запись температур осуществляются счетной машиной. Температура гра-

фита на номинальной мощности не превышает 800° С. Подъем мощности реактора с нуля до контролируемого уровня занимает 30 ч. Утечки газа через уплотнения газодувок невелики и составляют менее 90 кг/сутки; в то же время в других местах теряется около 7 т/сутки. В основном утечка газа происходит через арматуру, фланцевые соединения и другие неплотности, при промывке перегрузочной машины и в системе контроля целостности твэлов. Контроль целостности твэлов осуществляется во всех каналах реактора с автоматическим подключением группы каналов к прибору. Контроль осуществляется по активности рубидия и цезия, осаждаемых на поверхность движущегося тросика. Максимальная температура твэлов (450° С) обеспечивает температуру газа на выходе 395° С. В настоящее время рассматривается возможность повышения температуры твэлов еще на 28° С, что позволило бы повысить к. п. д. станции до 30%.

Себестоимость электроэнергии при относительно высоком использовании установленной мощности АЭС (7000 ч) равна 7,79 лир/квт·ч, в то время как составляет 1 квт·ч на тепловых станциях в этом районе составляет 5—6 лир.

АЭС «Латина» по сравнению со станциями в Гарильяно и «Эрико Ферми» отличается значительно большими размерами, громоздкостью оборудования и большим количеством обслуживающего персонала (290 человек).

Ознакомление с АЭС Италии показало, что итальянские специалисты творчески подошли к предложенным США и Англией проектам АЭС и в процессе их строительства и эксплуатации внесли ряд усовершенствований, улучшающих характеристики станций.

Центр ядерных исследований в Касачча

Центр ядерных исследований в Касачча расположен в 24 км от Рима; принадлежит Национальному комитету по ядерной энергии (CNEN). Он создан в июле 1960 г. и за короткое время вырос в довольно крупный технологический и экспериментальный центр. В сентябре 1964 г. в центре работало 1000 сотрудников.

Центр Касачча разделен на 9 секторов, из которых 7 научных: реакторный (располагающийся реактором TRIGA-II, лабораторией прикладной ядерной физики, реакторным цехом и линейным ускорителем); лабораторный; электроники; металлургический (с горячими камерами, лабораториями металлургии, промышленной химии и керамической технологии); переработки (с установками по переработке радиоактивных и обычных отходов); геологии и добычи ископаемых; биологический (с лабораториями по исследованию животных и сельскохозяйственных растений); осуществляет охрану здоровья сотрудников и контроль за радиационной безопасностью).

Наиболее крупным в центре является лабораторный сектор. В нем разрабатываются электронный аналог АЭС, электронный манипулятор, стандартное оборудование и приборы для ядерных реакторов. Имеется экспериментальный реактор нулевой мощности с органическим теплоносителем «Сантовакс», а также экспериментальный зал для исследования взаимодействия материалов с органическими жидкостями, а также теплопередающих характеристик твэлов. Построена критическая сборка с органическим замедлителем и теплоносителем ROSPO, на которой исследуются твэлы для опытного орвано-органического реактора PRO.

Ведутся также петлевые эксперименты для реактора PRO.

Из органических теплоносителей особое внимание уделяется сантоваку и ортотерфенилу.

Итальянские специалисты считают, что органические реакторы могут оказаться перспективными как для АЭС небольшой мощности, так и для атомных ТЭЦ и опреснения морской воды.

Научный центр Фраскати

Центр принадлежит Национальному комитету по атомной энергии CNEN, он находится в местечке Фраскати в 23 км от Рима. Около 270 сотрудников работают в трех лабораториях: синхротронной, накопительных колец, плазменных исследований.

Электронный синхротрон на энергию 1100 Мэв эксплуатируется с 1959 г. Интенсивность внутреннего пучка $5 \cdot 10^9$ электронов в импульсе при частоте повторения 20 гц. Длительность импульса 3—4 мсек. В качестве инжектора электронов используется ускоритель Ван де Граафа на энергию 3 Мэв с током пучка 0,1 а/имп. В настоящее время на синхротроне проводятся исследования на четырех пучках γ -излучения.

В настоящее время во Фраскати нет ни одного действующего накопительного кольца. Построенное ранее малое накопительное кольцо на энергию электронов около 200 Мэв передано во Францию; в настоящее время в лаборатории Орсей накоплено 10^7 электронов при сечении пучка $1 \times 0,08$ мм.

Сейчас во Фраскати строится большое электронно-позитронное накопительное кольцо ADONE с характеристиками:

Максимальная энергия частиц	1,5 Гэв
Интенсивность пучка	$2 \cdot 10^{11}$ частиц
Время жизни частиц	1—1,5 ч
Число прямолинейных секций для исследования взаимодействия пучков	4

Число взаимодействий в 1 ч на прямолинейной секции при эффективном сечении взаимодействия 10^{-32} см²

Магнитное поле в момент инжекции	2,4 кгс
Магнитное поле в момент достижения максимальной энергии	10 кгс
Средний радиус кольца	16,2 м
Вес железа	322 т
Вес меди	31 т
Сечение вакуумной камеры	6,22 см
Вакуум	10^{-9} мм рт. ст.

В качестве инжектора электронов и позитронов предполагается использовать линейный ускоритель, покупаемый в США.

Группа физиков, занимающаяся плазменными исследованиями, небольшая. Экспериментальная база довольно ограниченная. Исследования проводятся в двух направлениях. Одна группа изучает колебания и волны в холодной плазме. Исследуются колебания как в обычных дуговых разрядах, так и в цезиевой и калиевой плазме. Температура цезиевой плазмы 2600° К, плотность 10^{10} — 10^{11} см⁻³.

Второе направление — исследование высокотемпературной плотной плазмы. Здесь интересные результаты получены по оптическому зондированию плазмы с помощью рубиновых лазеров. Проводилось интерферометрирование плотности плазмы в тэтатроне, тевево фотографирование плазмы и исследование рассеяния света лазера в плазме на малые углы (3°). В последнем опыте удалось наблюдать рассеяние света не на отдельных электронах, а на неоднородностях пространственного заряда масштаба дебаевского радиуса экранирования. Исследование спектра рассеянного света позволяет определить как температуру электронов, так и температуру ионов плазмы.

В. В. Стекольников,
А. Н. Григорьянц, С. Д. Фанченко

О поездке в Англию

По приглашению Управления по атомной энергии и Центрального энергетического управления группа советских специалистов — участников III Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии посетила в сентябре 1964 г. Англию и ознакомилась с АЭС и ядерной лабораторией в Беркли, строящейся АЭС в Олдбери, Харуэллским атомным центром, комплексом установок в Уиндскейле и атомным центром в Уинфрите.

Описания центров и установок, с которыми познакомилась делегация, неоднократно публиковались. Поэтому в данной статье основное внимание уделяется некоторым деталям, результатам исследований и вопросам методики, представляющим общий интерес. Следует отметить благожелательный прием, оказанный нашей делегации.

Лаборатория ядерной энергетики в Беркли

Лаборатория состоит из двух отделений: «горячего» и «холодного». В горячем отделении проводятся работы по изучению воздействия облучения на твэлы магноксового типа, графит и конструкционные материалы.

Появление трещины в магноксовой оболочке твэла (при рабочих температурах порядка 450° С) сопровождается интенсивной реакцией окисления урана углекислым газом; в результате этого трещина очень быстро увеличивается. Так как регистрация выхода радиоактивности в контур требует определенного времени, то возникает опасность распространения заметной радиоактивности по контуру. Поиски подходящего промежуточного слоя показали, что наилучшим предохраняющим материалом является алюминий. Промежуточный слой, рассчитанный на рабочую температуру 450—500° С, представляет собой интерметаллическое соединение урана с алюминием толщиной ~ 50 мк.

Ведутся исследования радиационной деформации графита, которая считается линейно зависящей от дозы облучения. Полученные довольно простые соотношения с эмпирическими коэффициентами дают возможность оценить ожидаемую деформацию графита во всем диапазоне реакторных условий. Формулы учитывают также анизотропию образцов. При проектных расчетах исходят из допустимости деформации 0,5% за 30 лет.