

Указанные значения получены в предположении линейной зависимости  $\partial\rho/\partial Q$  и  $\partial\rho/\partial t$  от мощности и температуры в небольшом диапазоне их изменения и независимости мощностного коэффициента реактивности от концентрации бора в теплоносителе. Последнее основано на том, что замеченное при разогреве или охлаждении теплоносителя, содержащего бор, изменение реактивности хорошо совпадает с той величиной, которая может быть вызвана изменением плотности теплоносителя, а значит, и объемного содержания бора в размножающей решетке.

Хотя температурный коэффициент реактивности в присутствии борной кислоты остался отрицательным и саморегулируемость реактора сохранилась, однако при работе с борной кислотой содержанием в воде 2,9 г/кг чувствительность реактора к возмущениям внешней нагрузки повысилась. Предположив, что температурный коэффициент реактивности линейно зависит от содержания борной кислоты при концентрации борной кислоты 4,75 г/кг, в реакторе второго блока можно ожидать прекращения действия отрицательной обратной связи по температуре воды (нормально при работе на номинальной мощности содержание борной кислоты не превышает 2,5 г/кг).

Полученные в этих опытах значения температурного коэффициента реактивности удовлетворительно согласуются с результатами непосредственных измерений при физическом пуске реактора [2] и расчетными величинами [3]. Для иллюстрации возможности расчетного описания исследовавшихся процессов на рис. 7 представлено сравнение результатов расчета и эксперимента по саморегулированию реактора при сбросе нагрузки (расчетная величина температурного коэффициента реактивности  $\alpha_n = -2,0 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ ).

Полученные в этих опытах данные позволили наладить и испытать работу автоматического регулятора мощности при быстром сбросе электрической мощности блока с 270 до 150 Мвт (на 30% от номинального значения). Отра-

ботка возмущения осуществлялась регулирующей группой поглотителей таким образом, чтобы давление пара в парогенераторах поддерживалось в заданном диапазоне. Испытания проводились при концентрации борной кислоты в воде первого контура 1,46 г/кг, которой соответствует температурный коэффициент реактивности  $-3 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ .

В результате переходного процесса (рис. 8) поглотители регулирующей группы переместились на 46 см, что соответствовало расчетному вводу отрицательной реактивности, равной 0,0063. Эта величина, очевидно, должна была скомпенсировать мощностной и температурный эффекты реактивности, обусловленные изменением нагрузки на 30% и средней температуры воды в первом контуре на  $8^\circ\text{C}$ , т. е.

$$\Delta\rho = \Delta\rho_U + \Delta\rho_H = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 30 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 0,0068,$$

что хорошо согласуется с величиной отрицательной реактивности, введенной органами регулирования. Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные испытания второго блока Ново-Воронежской АЭС позволили обосновать безопасные условия его эксплуатации.
2. Сопоставление с расчетом некоторых параметров реактора, определенных экспериментально, доказало применимость используемых расчетных методик.
3. Введение борной кислоты в теплоноситель способствовало выравниванию энерговыделения в активной зоне при сохранении устойчивости работы реактора в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L. T o n g. Nucl. Engng and Design, 6, 301 (1967).
2. А. Н. Камышан и др. «Экспериментальное исследование физических характеристик второго блока НВ АЭС». Доклад на конференции СЭВ (Ульяновск, 5—9 октября 1970 г.).
3. А. Н. Новиков и др. «Сопоставление результатов физических расчетов с данными предпусковых и пусковых испытаний реактора второго блока НВ АЭС». Там же.

## Опыт эксплуатации АЭС в Райнсберге

С. МЕНЦЕЛЬ (ГДР)

Первая в ГДР Райнсбергская АЭС введена в эксплуатацию 9 мая 1966 г. [1]. В результате четырехлетней эксплуатации станции можно сделать вывод, что в целом она работает весьма успешно и что по сравнению с проектом имеются

определенные резервы, позволяющие повысить выработку электроэнергии. За этот период накоплен большой опыт по всем технологическим операциям. К концу четырехлетней эксплуатации выработано более 1,5 млрд квт·ч.

УДК 621.311.25



Это стало возможным благодаря стабильной эксплуатации, характеризующейся как графиком нагрузки станции (рис. 1), так и графиком суммарной выработки электроэнергии (рис. 2).

Что касается эффективности использования горючего, то здесь также достигнуты хорошие результаты. До сих пор на Райнсбергской АЭС проведены четыре перегрузки горючего (табл. 1). Выгрузка относительно небольшого числа кассет в конце первой кампании объясняется тем, что в 1968 г. станция перешла на режим работы, обеспечивающий бесперебойную работу в зимний период. Поэтому в 1968 г. производилось две перегрузки, и вторая кампания реактора была относительно небольшой. Сравнение фактических данных с проектными показывает, что использование горючего существенно лучше расчетного. Это также подтверждается достигнутым средним выгоранием 11 750 *Мет·сутки/т*, что превышает проектное выгорание на 35%.

Однако для полной оценки результатов эксплуатации АЭС этих данных еще недостаточно. Как известно, работоспособность электростанции принято характеризовать коэффициентом использования времени (КИВ) и коэффициентом использования установленной мощности (КИМ).

Сравнение КИМ для Райнсбергской АЭС (табл. 2) с аналогичными данными для зарубежных АЭС с реакторами с водой под давлением, для которых среднегодовое значение КИМ составляет 57,6 и 62,3%, показывает, что на АЭС в Райнсберге получены хорошие результаты. Данные табл. 2 показывают, что Райнсбергская АЭС вполне работоспособна также и в период наибольшего потребления электроэнергии в зимний период. В период рабочих дней с учетом дневных пиков нагрузки удалось достигнуть значений КИМ и КИВ 97,3 и 94,4% соответственно, так как необходимые кратковременные ремонтные работы в большинстве случаев проводились в выходные дни или ночью. Эти данные свидетельствуют о том, что наиболее целесообразный режим работы АЭС должен предусматривать периодический профилактический ремонт

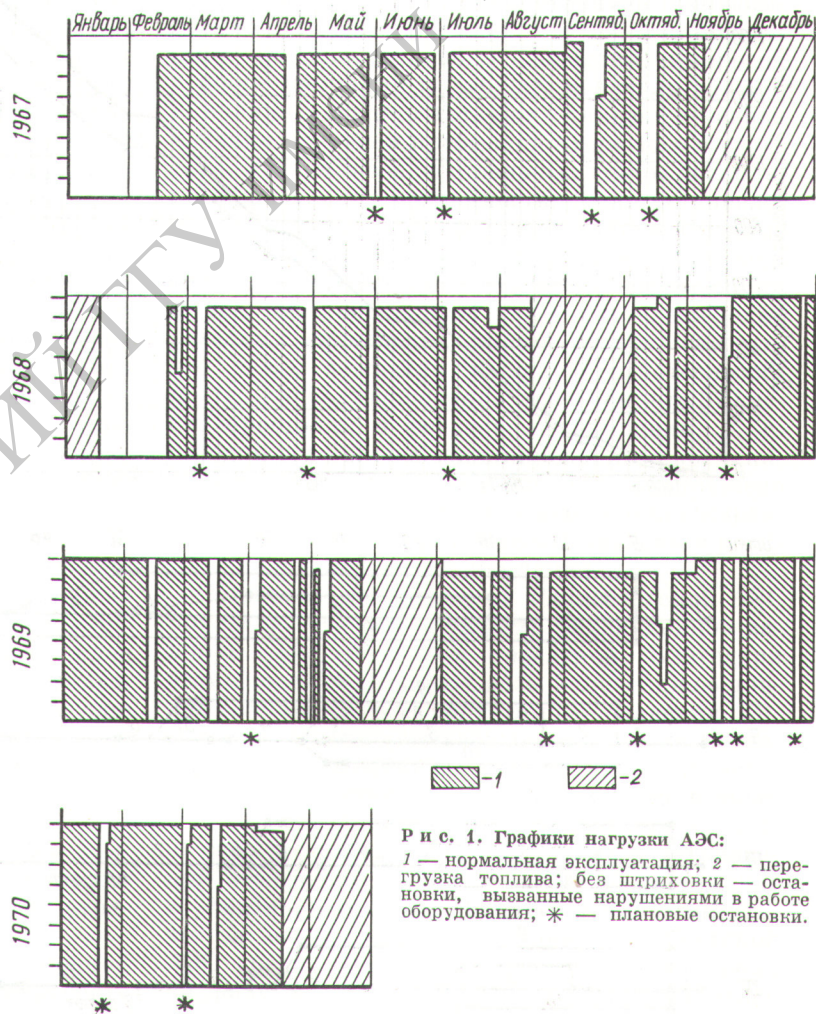
Перегрузки горючего

Таблица 1

Кампания	Продолжительность работы, <i>эфф.сутки</i> (по проекту 183 <i>эфф.сутки</i> )	Число выгруженных кассет (по проекту 44 кассеты)	Выгорание выгруженного горючего, <i>Мет·сутки/т</i>	
			Среднее	Максимальное
1	302	27	5 000	6 400
2	177	37	8 000	10 800
3	227	47	11 750*	15 700*
4	253	42		

\* Для кассет, находящихся в реакторе с начала эксплуатации.

и устранение неисправностей, которые могут привести к нарушению нормальной эксплуатации станции. Среди факторов, приводящих к уменьшению КИВ, период перегрузки горючего и реви-





Коэффициенты использования  
энергии и мощности

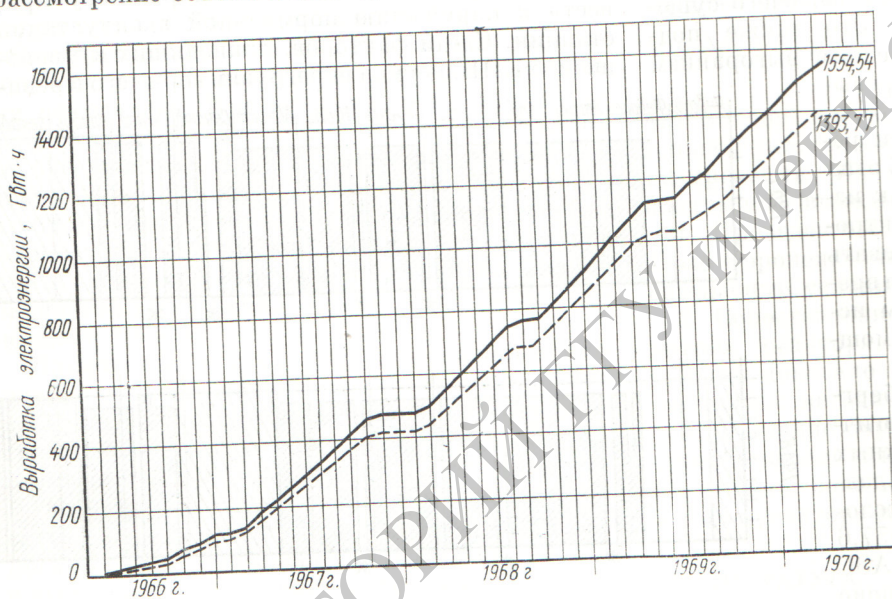
Таблица 2

Год	КИВ, %	КИМ, %
1967	61,0	59,0
1968	67,7	66,1
1969	71,2	71,3
1968/1969 (зимний период)	91,6	92,9
1960/1970	86,4	86,7

зии реактора занимает в каждом году примерно половину времени всех остановок. Детальное рассмотрение объема и последовательности про-

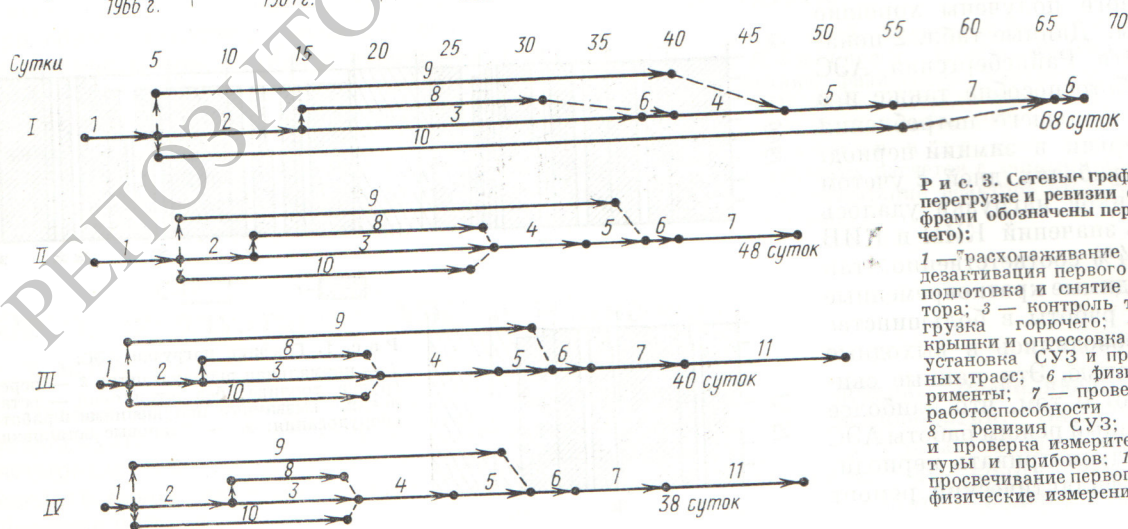
водимых на АЭС работ и перегрузок горючего ясно показывает (рис. 3), что непосредственно на перегрузку горючего, начиная с контроля герметичности оболочек твэлов и кончая подготовкой корпуса реактора для установки крышки, уходит меньше 25% всего времени остановки. В тоже время эти графики показывают, что продолжительность остановки в значительной степени определяется проводимыми на реакторе работами, начиная со съема крышки и кончая пуском реактора. На длительность остановки влияют также работы по ревизии оборудования первого контура. Поскольку сроки между ревизиями основного оборудования не всегда постоянны, то и объем этих работ по отдельным годам также не одинаков. Работы по ревизии оборудования второго контура обычно выполняются в предусмотренные сроки, если не возникают чрезвычайные обстоятельства, как, например, ремонт турбины.

Хотя период остановки и можно несколько сократить путем хорошей технологической подготовки, но в принципе он все же определяется конструкцией и применяемым оборудовани-



Р и с. 2. Производство электроэнергии на АЭС:

— брутто; - - - нетто.



Р и с. 3. Сетевые графики работ при перегрузке и ревизии (римскими цифрами обозначены перегрузки горючего):

1 — расхолаживание реактора и дезактивация первого контура; 2 — подготовка и снятие крышки реактора; 3 — контроль твэлов и перегрузка горючего; 4 — установка крышки и опрессовка реактора; 5 — установка СУЗ и проверка кабельных трасс; 6 — физические эксперименты; 7 — проверка защиты и работоспособности оборудования; 8 — ревизия СУЗ; 9 — ревизия и проверка измерительной аппаратуры и приборов; 10 — ревизия и просвечивание первого контура; 11 — физические измерения на реакторе.



ем. Это особенно касается реактора и защитных устройств. Поэтому при разработке будущих АЭС обязательной задачей проектировщиков и конструкторов является обеспечение удобного ремонта и снижение до минимума потребности в профилактических работах. Тем самым можно уже на стадии проектирования положительно повлиять на работоспособность АЭС.

Достигнутые коэффициенты использования Райнсбергской АЭС убедительно подтверждают надежную и стабильную работу основного оборудования. Этот вывод относится как к технологическим контурам, так и к электрическим измеряющим устройствам. Эта общая положительная оценка не снижается от того, что в период работы АЭС имели место нарушения и повреждения, приводившие к частичному отключению некоторого оборудования. Данные табл. 3 наглядно показывают, что на АЭС в Райнсберге (как и на других АЭС) наибольшее число нарушений возникало во втором контуре, т. е. в той части АЭС, к качеству которой во время сооружения предъявлялись существенно меньшие требования. Нарушения в первом контуре были вызваны отчасти выходом из строя электрических элементов системы защиты и управления, что приводило к срабатыванию аварийной защиты. Кроме таких нарушений, как повреждения катушек удерживающих магнитов кассет аварийной защиты и рубашек двигателей приводов, которые, однако, не приводили к внеплановым остановам, имелись недостатки в системе подпитки воды. Вследствие толчков поршневых насосов в системе трубопроводов возникали сильные вибрации, приводившие к обрыву вспомогательных трубопроводов. Установка демпферов уменьшила вибрацию, однако полностью ее не устранила.

Основной проблемой во втором контуре являлись поломки лопаток цилиндра высокого давления турбины. Хотя эти поломки по количеству нарушений составили незначительную часть, но по длительности простоя АЭС вклад их весьма значителен. Поломки лопаток вызваны вибрациями, причина которых сейчас исследуется. Ввиду значительной эрозии чугунных диафрагм они были заменены стальными диафрагмами, что привело к существенным улучшениям. Благодаря специальному режиму работы и изменению системы дренажа в последнюю кампанию повреждения лопаток турбины не наблюдалось. Выбранный режим положительно отразился также и на работе диафрагм.

С точки зрения дозиметрии и радиационной защиты опыт эксплуатации АЭС в Райнсберге

Количество нарушений на АЭС в период 1967—1970 гг.

Таблица 3

Место нарушения	1967	1968	1969	1970 (до мая)
Первый контур	10	8	10	4
Второй контур	25	12	27	8
Электрические установки	5	4	6	0

также дал положительные результаты. Соблюдение допустимых значений по выбросу как газообразной, так и аэрозольной активности в период всей эксплуатации не вызывало никаких трудностей. Опыт свидетельствует о тесной связи между интегральным выгоранием топливных кассет и концентрацией выбрасываемых благородных газов в период кампании (рис. 4). Максимальные значения выбросов в конце кампании и выбросы в начале каждой кампании свидетельствуют также о связи с общим временем пребывания горючего в реакторе. Утечка газов из отдельных твэлов несколько искажает эту зависимость. Было установлено, что утечка газов из твэлов только в первые дни повышает величину выбросов. Для подтверждения этого в период четвертой кампании в реакторе специально была оставлена одна кассета с дефектным твэлом. Можно сказать, что твэлы показали хорошую работоспособность. Это подтверждается еще и тем, что 37 кассет простояли в реакторе 4 кампании, т. е. на один год больше запланированного времени, несмотря на это в них не было обнаружено дефектных твэлов. Для дальнейшего исследования стойкости твэлов 7 кассет оставлены в реакторе на период пятой кампании.

Обширные измерения на Райнсбергской АЭС показали, что эффективность радиационной защиты оказалась выше проектной. Благодаря этому средняя мощность дозы излучения составляет не более 6% допустимого значения [3]. Эти результаты подтверждаются также незначительными дозами облучения обслуживающего персонала станции. Особое внимание и определенные трудозатраты требуются для предотвращения превышения допустимых загрязнений помещений до, во время и после ремонта и ревизионных работ. Следует также отметить, что за все время эксплуатации Райнсбергской АЭС среди рабочего и ремонтного персонала ни разу не было облучения персонала выше



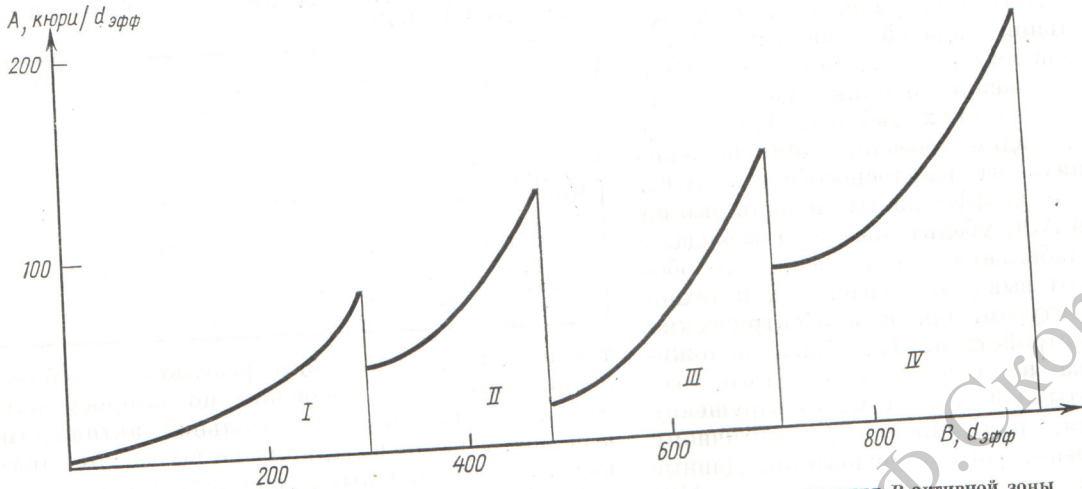


Рис. 4. Удельный выброс активности  $A$  благородных газов в зависимости от выгорания  $B$  активной зоны для первых четырех кампаний (римскими цифрами обозначены кампании).

допустимой годовой дозы. На рис. 5 представлены суммарные дозы наружного облучения всего персонала за отдельные кампании реактора. Из рис. 5 видно, что, как и следовало ожидать, наибольшему облучению персонал подвергается во время перегрузочных и ревизионных работ. Поэтому для того, чтобы годовая доза облучения не превышала допустимого значения, часть этого персонала временно отстранялась от работ, выполняемых в условиях облу-

чения. Таким образом, при планировании ремонтных работ и необходимого количества персонала следует учитывать не только объем ремонтных работ, но и возможные дозы облучения. Тем самым еще раз подчеркивается необходимость применения оборудования и конструкций, удобных для ремонта и требующих небольшого ухода.

После ввода в строй Райнсбергской АЭС проводились обширные исследования, цель кото-

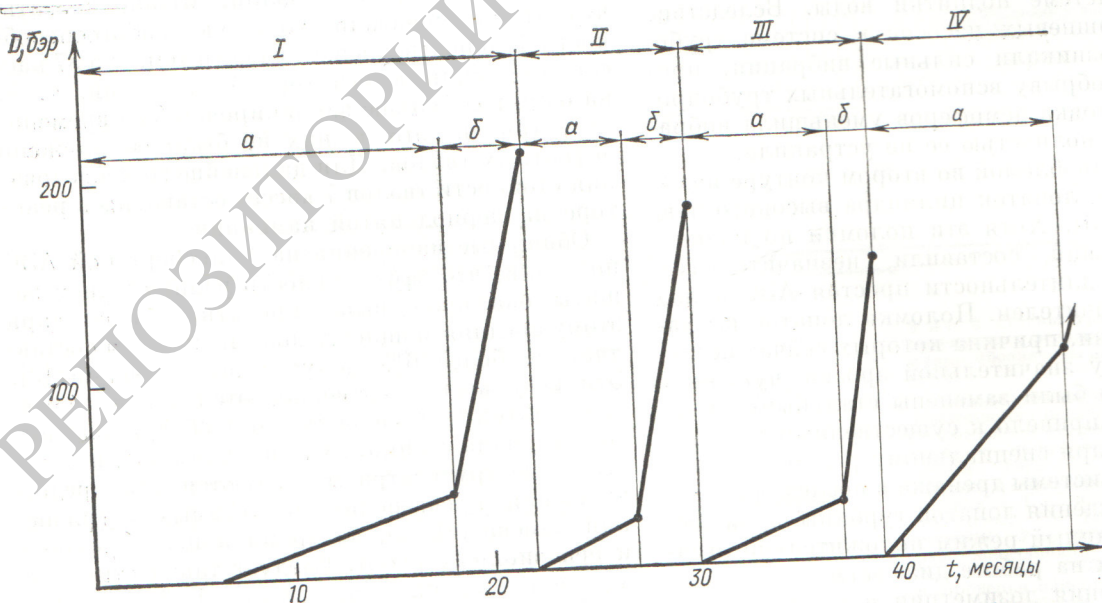


Рис. 5. Внешнее облучение персонала АЭС за первые четыре кампании (римскими цифрами обозначены кампании):  $a$  — период эксплуатации;  $б$  — период перегрузки горючего и ревизии.



рых заключалась в уточнении данных, полученных во время пуска станции, освоении сложных технологических операций и обеспечении устойчивой работы оборудования. Затем было решено выяснить резервы основного оборудования с тем, чтобы на основании этого определить максимально возможную мощность АЭС. Было установлено, что без существенных изменений и дополнительных капиталовложений мощность станции может быть повышена до 80 Мвт (эл.). Однако такое повышение мощности невозможно реализовывать в течение всего года. Дело в том, что для исключения тепловой перенапряженности твэлов коэффициент неравномерности энерговыделения не должен превышать 1,9, а температура охлаждающей воды должна обеспечивать вакуум в конденсаторе турбины  $0,04 \text{ кг/см}^2$  [4].

В области химии также проводились большие работы по оптимизации режимов эксплуатации. При этом особое внимание уделялось химии воды. Постоянно проводилось улучшение водохимического режима и одновременно разрабатывались способы для дальнейшего совершенствования системы водоподготовки. Особенно нужно подчеркнуть разработанный на АЭС метод дезактивации первого контура, который неоднократно применялся с большим успехом [5—7].

Задачи Райнсбергской АЭС не ограничиваются обеспечением устойчивой работы АЭС и проведением исследований по повышению ее эффективности; они тесно связаны с сборжением и эксплуатацией в ГДР будущих крупных АЭС.

Научно-техническое развитие требует полного использования экспериментальных возможностей для систематических исследований, которые наиболее целесообразно проводить как раз на станциях с установленной мощностью ниже 100 Мвт. Результаты таких исследований на Райнсбергской АЭС будут учтены на новых АЭС. Особое внимание следует обратить на разработку и опробование технологии и методов распространения полученных результатов на большие станции. Кроме того, надо иметь в виду, что для опробования вновь разработанного оборудования его испытания должны проводиться в реальных рабочих условиях. В настоящее время на Райнсбергской АЭС разрабатывается метод регулирования реактора борной кислотой на мощности, включая обработку борсодержащего теплоносителя первого контура. Начаты исследования по экспериментальному определению выгорания в твэлах.

Для обеспечения высоких эксплуатационных качеств новых АЭС необходимо, чтобы накопленный на Райнсбергской АЭС опыт и результаты исследований тщательно обрабатывались и своевременно передавались как строителям, так и обслуживающему персоналу будущих станций. Успешное решение этой задачи возможно только в том случае, если передача полученных результатов будет происходить организованно. Для этого в 1969 г. в Райнсберге была основана специальная школа, в которой опытные специалисты АЭС знакомят инженеров ГДР с различными проблемами ядерной энергетики. Уже в ближайшие месяцы эта школа будет заниматься преимущественно обучением обслуживающего персонала АЭС «Норд» — второй АЭС ГДР, которая в данное время находится в стадии строительства. Все инженеры и квалифицированные специалисты этой АЭС пройдут специальное обучение в Райнсберге. При необходимости Райнсбергская школа может быть использована для обучения специалистов стран — членов СЭВ.

Из рассмотренного следует, что Райнсбергская АЭС успешно проработала четыре года. За это время полностью освоено оборудование станции, выявлены резервы по мощности, что позволило превзойти проектную мощность АЭС. Накопленный опыт эксплуатации имеет большое значение для проектировщиков и конструкторов новых АЭС, показывает, в каком направлении следует приложить наибольшие усилия для обеспечения эффективной эксплуатации будущих АЭС. Не меньшее значение имеет передача этого опыта обслуживающему персоналу будущих АЭС.

В заключение следует сказать, что на Райнсбергской АЭС, являющейся первенцом страны, не только осуществляется устойчивая выработка электроэнергии, но и решается целый комплекс задач, связанных с развитием ядерной энергетики. Тем самым Райнсбергская АЭС вносит важный вклад в решение проблемы производства электроэнергии на базе атомной энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А к к е р м а н н, Г а й с т х а р д. «Атомная электростанция Райнсберг». Энергитехник, 18 (1968), страница 292.
2. С и б к е р. 22. Résultats d'une enquête statistique sur réalisation et la disponibilité des centrales nucléaires de puissance. Международное совещание о модернизированных электростанциях. Люттих, 11—15 мая 1970 г.



3. W. Gerullis und andere. Kernenergie 12, Н. 10, 328 (1969).
4. Шонхер, Мареш. «Исследования по повышению мощности АЭС Райнсберг». Kernenergie 13 (1970).
5. R. Winkler und andere. Kernenergie 12, Н. 11, 347 (1969).
6. K. Langecker und R. Winkler. Kernenergie, 12, Н. 11, 357 (1969).
7. R. Winkler und andere. Kernenergie 12, Н. 11, 341 (1969).

## Распределение отложений и активности на поверхностях оборудования и коммуникаций одноконтурного реактора ВК-50

Л. Н. РОЖДЕСТВЕНСКАЯ, А. И. ЗАБЕЛИН, Ю. В. ЧЕЧЕТКИН,  
Ю. Г. ЛАВРИНОВИЧ, Т. С. СВЯТЫШЕВА (С С С Р)

УДК 621.039.553.3

Накопление экспериментальных данных по изучению источников радиоактивных излучений, распределению и динамике роста активности в отложениях технологических контуров установки представляет большой практический интерес. Эти данные позволят эффективно использовать теоретические модели и расчетные методы для прогнозирования радиационной обстановки на будущих АЭС, правильно решать вопросы защиты, выбора конструкционных материалов и водно-химического режима. В этом отношении большое значение имеет опыт, полученный при эксплуатации одноконтурного реактора ВК-50.

АЭС с реактором ВК-50 представляет собой одноконтурную установку с кипящим реактором корпусного типа. В состав конструкционных материалов входят нержавеющая и углеродистая стали, латунь, циркониевый сплав и др. Общая поверхность перлитной стали, контактирующая с теплоносителем первого контура, составляет около  $4000 \text{ м}^2$  (около 39% всей поверхности), нержавеющей сталей —  $1750 \text{ м}^2$  (около 6%), латуни (без технологического конденсатора) —  $9100 \text{ м}^2$  (около 52%) и т. д.

Ниже представлен материал, полученный в период эксплуатации реактора с октября 1965 г. по апрель 1970 г. В это время реактор работал при тепловой мощности 60—140 *Мвт*, за исключением последнего этапа работы (февраль — март 1970 г.), когда тепловая мощность реактора была увеличена до 160—185 *Мвт*.

Предусмотренный проектом ввод в питательную воду гидразин-гидрата для подавления радиолитиза и создания нормируемой величины  $\text{pH} \geq 7,0$  привел к возрастанию скорости коррозии латуни. Поэтому с декабря 1965 г. был принят бескоррекционный нейтральный водно-химический режим. Основные его показатели приведены в табл. 1 и 2. На первом этапе работы (октябрь — декабрь 1965 г.) активность воды и пара реактора была обусловлена в основном активацией продуктов коррозионного процес-

схождения (медь-64, марганец-56), примесей (натрий-24) и ядер теплоносителя (азот-13, азот-16 и фтор-18). С января 1966 г. возросла активность иодов, что было связано с появлением газовой негерметичности твэлов. В дальнейшем (сентябрь 1966 г. — апрель 1968 г.) в теплоносителе были идентифицированы изотопы осколочного происхождения (церий-144, цезий-137, барий-140 и лантан-140 и т. д.). С июня 1968 г. активность осколочных элементов в воде реактора возросла на два порядка. Суточные выбросы газовой активности при этом достигали 1500—2000 *кюри*. Активность сухого остатка возросла и составляла в реакторной воде  $(1,2 \div 4,8) \cdot 10^{-4}$  *кюри/кг*, в паре реактора  $(0,9 - 2,2) \cdot 10^{-5}$  *кюри/кг*, в конденсаторе турбины  $(0,6 - 1,4) \cdot 10^{-6}$  *кюри/кг*. Величина активности иода-131 в это время в воде реактора изменялась от  $6 \cdot 10^{-7}$  до  $6 \cdot 10^{-6}$  *кюри/кг*, иода 133 и иода-135 достигала величины  $1,7 \cdot 10^{-5}$  *кюри/кг*, молибдена-99 —  $2,5 \cdot 10^{-6}$  *кюри/кг*, бария-140 —  $6,2 \cdot 10^{-7}$  *кюри/кг*. Это было обусловлено увеличением дефектов в негерметичных твэлах, перегруженных в предыдущий ППР на периферию активной зоны. В период проведения III и IV ППР эти твэлы были извлечены из реактора, что повлекло за собой снижение осколочной активности более чем в 10 раз. Активность натрия-24 в воде реактора менялась в зависимости от величины подсосов технической воды через неплотности конденсатора и мощности реактора. Содержание элементов коррозионного происхождения в теплоносителе и их активность в процессе эксплуатации установки менялись незначительно, за исключением первых этапов работы реактора.

Поскольку, как показала практика, основными компонентами отложений на внутренних поверхностях контура являются соединения железа, был изучен их дисперсный спектр по водному тракту (табл. 3). Из таблицы следует, что максимальное количество нерастворимых взвесей в теплоносителе характерно для началь-