

В общий срок включены 30 дней между первой и второй фазами, которые потребуются для замены измерительных приборов и некоторого изменения отдельного оборудования.

Сооружение первой чехословацкой АЭС является сложным и ответственным делом. Успешный ввод в эксплуатацию А-1 требует максимальных усилий большой группы специалистов, поставщиков, научных и проектных институтов и, конечно, персонала АЭС. Нема-

лую помощь в решении проблем пуска станции оказывают советские специалисты.

Предыдущие результаты показывают, что все технические проблемы, выявившиеся в ходе подготовки к пуску, могут быть успешно решены.

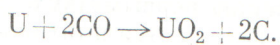
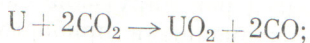
Имеются реальные условия для того, чтобы первая АЭС страны была введена в эксплуатацию в соответствии с планом в конце 1971 г.

Контроль герметичности оболочек ТВЭЛОВ в реакторах с газовым теплоносителем

Э. ГЛАДКИ, Э. МЕЛИХАР, И. КУБИК, В. КАПИШОВСКИ (ЧССР)

УДК 621.039.52.034.3

В реакторах с металлическим ураном и газовым теплоносителем (CO₂) возникновением трещины в покрытии ТВЭЛА повышает вероятность реакции теплоносителя с горючим:



Окисление горючего способствует увеличению трещины и может привести к возгоранию покрытия [1]. В связи с этим приобретает особую важность разработка системы контроля герметичности оболочек (КГО) ТВЭЛОВ. В чехословацкой программе развития ядерной энергетики, которая до сих пор ориентировалась прежде всего на реакторы с газовым теплоносителем, проблеме КГО уделено большое внимание [2—4]. В настоящей работе описаны основные результаты исследований, проведенных в этой области, в частности некоторые вопросы, связанные с выбором метода обнаружения негерметичного ТВЭЛА и с теоретической оптимизацией системы КГО.

Выбор метода обнаружения негерметичного ТВЭЛА и структуры системы КГО. При разработке системы КГО необходимо учитывать следующие требования [5]:

обеспечение надежного и быстрого обнаружения негерметичного ТВЭЛА при использовании минимального числа детекторов;

создание возможности наблюдать за развитием повреждения (особенно в случае повреждения с медленным увеличением дефекта);

внедрение удобного метода регистрации результатов с целью быстрой и легкой оценки;

обеспечение максимальной степени автоматизации при эксплуатации системы;

включение системы КГО в систему регулирования и управления реактором.

На реакторах с газовым теплоносителем перечисленным требованиям удовлетворяют два метода: электропреципитация и фильтрация. Оба метода основаны на осаждении дочерних аэрозольных продуктов распада (изотопы рубидия и цезия) газообразных осколков и измерении активности осажденной дисперсной фазы. Детекторы системы КГО, основанные на принципе электропреципитации, использованы практически на всех АЭС с реакторами с газовым теплоносителем [6]. На первой в ЧССР АЭС А-1 предполагается применить метод фильтрации с использованием жестких фильтров. Фильтрационные детекторы с обменной фильтрующей поверхностью испытаны на экспериментальных газовых петлях.

Для реакторов с газовым теплоносителем стоимость системы КГО может составить значительную часть затрат на оборудование АЭС. Поэтому при разработке системы КГО исходили из необходимости обеспечить выполнение всех указанных выше требований при минимальном числе детекторов. В результате был выбран метод отбора проб теплоносителя из технологических каналов, объединенных в группы, с периодическим контролем отдельных каналов. При обнаружении канала с поврежденным ТВЭЛОМ включается так называемый «следающий» детектор, который постоянно регистрирует активность теплоносителя до извлечения ТВЭЛА.

Ввиду большого числа обрабатываемых данных и их важного значения как одного из источников информации об эксплуатационном состоянии реактора желательно подключить систему КГО к ЭЦВМ в системе СУЗ.

Для обнаружения микротрещин, при которых происходит утечка долгоживущих осколков деления, перспективным является метод газовой хроматографии, дающий возможность избирательно определять изотопы криптона и ксенона в теплоносителе [7].

Обнаружение негерметичного твэла с быстрым развитием дефекта возможно при постоянном измерении проб теплоносителя, отбираемых из первого контура, с применением детектора такого же типа, что и в самой системе КГО. Этот дополнительный контроль особенно важен в связи с выбранным методом отбора проб из технологических каналов, объединенных в группы, и периодическим контролем отдельных твэлов. Теоретический анализ показал, что высоким быстродействием отличается также контроль осколков деления в теплоносителе, основанный на регистрации запаздывающих нейтронов [7].

Выбранная структура системы КГО обеспечивает достаточную надежность для широкого спектра возможных типов повреждения оболочек твэлов и получение ценной информации о поведении и общем состоянии загрузки.

Оценки чувствительности и быстродействия детекторов системы КГО. Для выбора условий работы детекторов и оптимизации всей структуры системы КГО предложены методы оценки чувствительности детекторов и ее зависимости от различных параметров. Под чувствительностью здесь и далее подразумевается величина обнаженной поверхности горючего, которая вызывает показания детектора, равные фоновым. Это определение дает возможность быстрой оценки влияния рабочих и конструктивных параметров детектора и системы КГО на его чувствительность и позволяет провести сравнение отдельных типов детекторов.

Показания детектора любого типа можно охарактеризовать соотношением [8]:

$$N_{ijk} = F_i \sum_{j=1}^n A_j M_k,$$

где F_i выражает механизм утечки осколков деления; вид члена A_j зависит от того, ведется ли расчет сигнала для определенного повреждения (A_1) или для фона (A_2); M_k характеризует тип и конструкцию детектора. Каждый из перечисленных членов часто представляет собой громоздкое математическое выражение, особенно сложное для диффузионного механизма утечки осколков деления через микротрещины [9].

Чувствительность δ , согласно приведенному определению можно выразить соотношением

$$\delta = \frac{N_d + P_1 + P_2 + N_{i2k}}{N_{i1k}},$$

где N_d — доля фона использованного детектора, обусловленная внешним излучением; P_1 и P_2 — доли фона детектора, обусловленные поверхностным загрязнением активной зоны ураном и активацией теплоносителя и его примесей соответственно.

На рис. 1 представлены результаты расчетов величины δ в зависимости от времени t_1 переноса проб теплоносителя для электропреципитатора с проволочным электродом. Зависимость величины δ от времени t_1 переноса проб до фильтра очистки при разных временах t_2 распада проб между фильтром, очищающим газовый поток, и фильтром-накопителем изотопов рубидия и цезия изображена на рис. 2. Величины сигнала при данной площади горючего и величины δ при оптимальных параметрах отдельных детекторов и предполагаемых эксплуатационных параметрах АЭС приведены в таблице.

Сравнение величины сигнала и чувствительности отдельных детекторов

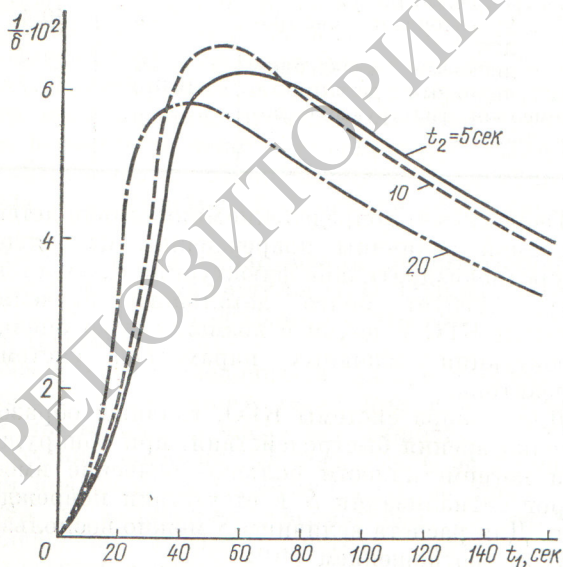
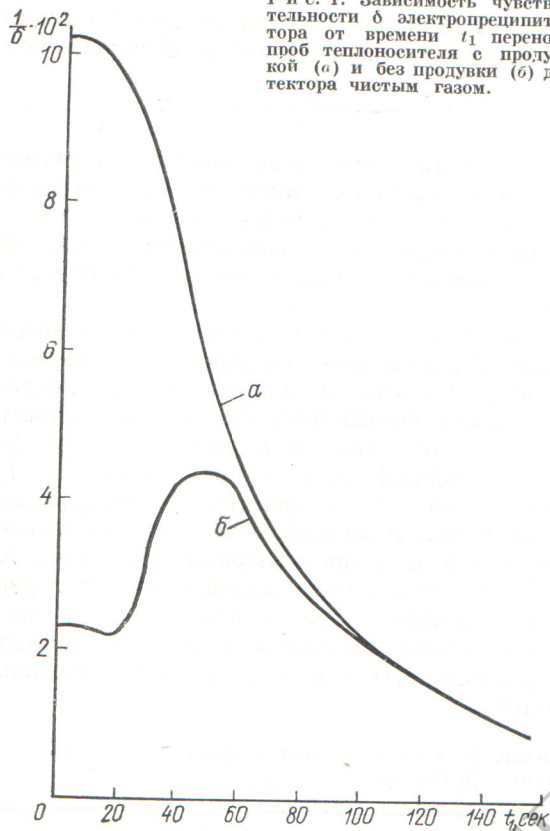
Тип детектора	Величина сигнала, $\mu\text{мп/сек} \cdot \text{см}^2$	δ , мм^2
Электропреципитатор: с проволочным электродом	9640	10,4
с дисковым электродом	400	22,8
Фильтрационный детектор с обменной фильтрующей поверхностью	10670	16,7

Теоретическое определение минимально детектируемой величины повреждения, исходящее из среднеквадратичной флюктуации фона детектора, требует более детального изучения системы КГО в целом с возможностью оценки флюктуации основных параметров системы и реактора.

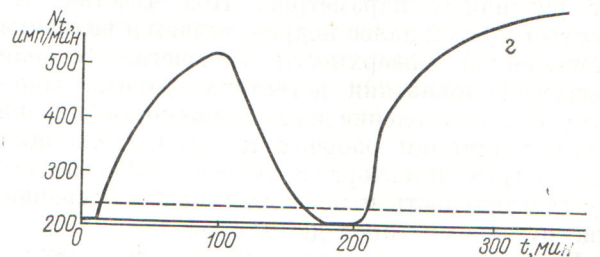
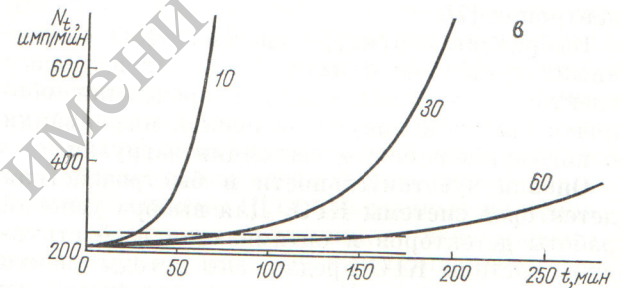
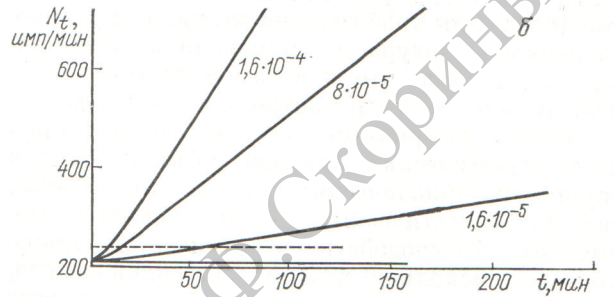
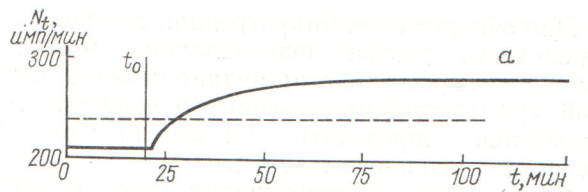
Для выбора системы КГО, главным образом с точки зрения быстродействия, при обнаружении негерметичности большое значение имеет порог сигнализации S в отсутствие повреждения. Для расчета величины S можно воспользоваться соотношением [10]:

$$S = N_\phi + 0,1N_\phi + \frac{5}{\sqrt{2t}} \sqrt{N_\phi},$$

Р и с. 1. Зависимость чувствительности δ электропреципитатора от времени t_1 переноса проб теплоносителя с продувкой (а) и без продувки (б) детектора чистым газом.



Р и с. 2. Зависимость чувствительности δ фильтрационного детектора от времени t_1 переноса проб теплоносителя при разных значениях t_2 .



Р и с. 3. Временная зависимость показаний N_i детектора КГО в случаях:

а — постоянной величины дефекта; б — линейного развития дефекта (цифры у кривых — численные значения τ в см²/сек); в — экспоненциального развития дефекта (цифры у кривых — численные значения $T_{1/2}$ в минутах); г — повреждения с возникновением окислов. Пунктиром обозначен порог сигнализации, сплошной горизонтальной прямой — фон детектора.

где N_ϕ — фон детектора; τ — постоянная времени интегратора.

Быстродействие зависит также от скорости развития повреждения и от соответствующей временной зависимости показаний детектора. При оценке системы КГО, использованной на А-1, пытались провести расчет временной зави-

симости показаний детектора КГО для следующих видов повреждения оболочки твэла [11]: 1) постоянная величина дефекта; 2) линейное развитие дефекта; 3) экспоненциальное развитие дефекта; 4) обнажение определенной поверхности горючего, возникновение окислов на обнаженной площади, опадание окислов и повторное обнажение горючего.

Первые три типа повреждений можно охарактеризовать следующим образом:

1. Постоянная величина дефекта:

$$M_k = K_0 (1 - e^{-\lambda'_i t}),$$

где K_0 — константа; λ'_i — постоянная распада дочерних продуктов осколков деления (рубиндия, цезия).

2. Линейное развитие дефекта:

$$M_k = K_0 r \left[t + \frac{1}{\lambda'_i} (e^{-\lambda'_i t} - 1) \right],$$

где r — скорость развития дефекта ($см^2/сек$).

3. Экспоненциальное развитие дефекта:

$$M_k = K_0 \frac{\lambda'_i}{b + \lambda'_i} (e^{bt} - e^{-\lambda'_i t}),$$

где $b = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$; $T_{1/2}$ — «период полуразвития» повреждения.

Математическое выражение для временной зависимости сигнала в случае повреждения четвертого типа слишком громоздко для воспроизведения в рамках данной работы.

Рассчитанные временные зависимости показаний детектора КГО, соответствующие при-

веденным типам повреждений, графически изображены на рис. 3 (а—г).

Рассматриваемые типы повреждений не включают все возможные повреждения, и их описание не будет точно соответствовать действительности. Сравнение результатов теоретического анализа с данными, получаемыми при эксплуатации системы КГО, облегчит обработку и интерпретацию результатов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Cartwright. In «Detection and Location of Failed Fuel Elements». Vienna, IAEA, 1968, p. 175.
2. Z. Melichar, E. Hladký. Ibid, p. 45.
3. E. Hladký, Z. Melichar. Bulletin EGÚ, No. 3—4, 41, 1968.
4. E. Hladký et al. Rozbor problému a návrh experimentálních zkoušek systému KPO na A-1, Výzkumná zpráva EGÚ, 07190101, 1968.
5. A. Roguin. Rapport CEA-R-2789, 1965.
6. Z. Melichar, E. Hladký. Návrh metody detekce poruchy obalu palivových článků pro A-2, Výzkumná zpráva EGÚ 07200101, 1968.
7. J. Morávek, I. Pietrik. Návrh riešenia kontinuálnych kontrol produktov štiepenia v primárnom okruhu, Výskumná zpráva EGÚ 00060403, 1970.
8. E. Hladký, I. Kubík. Souhrn vztahu pro výpočet signálu a citlivosti porušeného palivového článku a návrh blokového schéma programu pro strojový výpočet. Výzkumná zpráva EGÚ 07200103, 1970.
9. R. French. J. Nucl. Energy, 20 (6), 451 (1966).
10. P. Douet, J. Graftieaux. Rapport CEA-R-3328, 1967.
11. E. Hladký, Z. Melichar. Jaderná energie, 16 (3), 73, 1970.

Опыт сооружения и пуска реактора БОР-60

А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, О. Д. КАЗАЧКОВСКИЙ, Б. Б. БАТУРОВ, В. В. СТЕКОЛЬНИКОВ, М. А. БАРСКИЙ, Ю. В. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, В. М. АРХИПОВ, С. М. БЛАГОВОЛИН, Е. В. БОРИСЮК, И. С. ГОЛОВНИН, В. М. ГРЯЗЕВ, М. А. ДЕМЬЯНОВИЧ, А. В. КАРПОВ, В. П. КЕВРОЛЕВ, В. Н. КОВЕРДЯЕВ, Н. В. КРАСНОЯРОВ, Б. И. ЛУКАСЕВИЧ, В. А. МЕДВЕДКОВ, А. М. СМЕРНОВ, М. Ф. ТРОЯНОВ (СССР)

УДК 621.039.526

Начало разработки реактора БОР-60 под научным руководством Физико-энергетического института (ФЭИ) относится к концу 1963 г. В середине 1965 г. началось строительство здания реакторной установки в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР), и 27 декабря 1969 г. реактор достиг энергетического уровня мощности.

Обеспечивая большую удельную мощность и высокую температуру натриевого теплоносителя, реактор позволяет проводить в широком диапазоне условий испытания твэлов и конструкционных материалов для строящихся

атомных электростанций БН-350 и БН-600, а также для перспективных более мощных АЭС с быстрыми реакторами-бридерами. Уровень мощности 40—60 Мвт позволяет испытать в рабочих условиях различное оборудование, в том числе парогенераторы, насосы, теплообменники, запорную и регулируемую арматуру и т. п.

Характеристики реактора и описание основных устройств приведены в работах [1—4]. Данный доклад посвящен вопросам сооружения реактора и проведения пуско-наладочных работ.