

где

$$N_l(x) = \frac{1}{x\varphi} \int_{-x}^{x \frac{2l\varphi}{x}} N_l(x, y) dy$$

— усредненная по поперечной координате y плотность населения в секторе l в виде функции продольной координаты сектора x .

Полученные оценки риска необходимо сравнить с допустимыми значениями. Условия удовлетворения требованиям безопасности имеют вид

$$S_1 \leq S_{1\text{доп}}, S_2 \leq S_{2\text{доп}}. \quad (19)$$

Если выполняются оба условия, то АЭС безопасна.

Допустимый риск, по-видимому, следует устанавливать, ориентируясь на величину риска от естественных причин и учитывая при этом социальные, экологические и прочие аспекты. Существует мнение, что привнесенный риск должен составлять незначительную долю естественного риска. Величина естественного индивидуального риска, например, по статистическим данным США составляет 10^{-5} — 10^{-6} летальных случаев в год.

УДК 621.039.534.63.24

О схемах очистки натрия первого и второго контуров быстрых реакторов

БАКЛУШИН Р. П., КОЗЛОВ Ф. А.

Технологическая схема крупной АЭС с быстрым реактором включает десятки разных вспомогательных систем, предназначенных для отвода тепла от различных узлов, для обеспечения требуемого качества теплоносителей, безопасности обслуживающего персонала и т. п. Одна из них — система очистки теплоносителя. Ее основными элементами, обеспечивающими очистку от кислорода, продуктов взаимодействия с водой и других примесей, являются холодные ловушки [1, 2].

Спроектированные для АЭС с реактором БН-350 системы очистки поддерживают необходимое качество теплоносителя [3]. Полученный опыт позволяет наметить пути улучшения таких систем для будущих установок, которые должны обеспечить большую гибкость в эксплуатации, независимость работы системы очистки

Изложенная методика позволяет в результате сравнительного анализа безопасности различных по структуре вариантов АЭС вскрыть слабые места, выявить основные источники радиационной опасности, выбрать наиболее приемлемый вариант.

Поступила в Редакцию 22/VII 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farmer F. In: Proc. of Symp. «Containment and Siting of Nuclear Power Plants», Vienna, 3—7 April, 1967.
2. Клемин А. И., Поляков Е. Ф. «Атомная техника за рубежом». 1970, № 10, с. 35.
3. Клемин А. И., Поляков Е. Ф. «Атомная техника за рубежом», 1971, № 3, с. 3.
4. Емельянов П. Я., Клемин А. И., Поляков Е. Ф. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 5, с. 408.
5. Клемин А. И. Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1973.
6. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. М., «Наука», 1967.
7. Gifford F. «Advances Geophys.», 1959, v. 6.
8. Pasguill F. «Meteorolog. Mag.», 1961, v. 90, N 1063.
9. Pasguill F. Atmospheric Diffusion. D. Van Nostrand Co., 1962.
10. Beattie J. UKAEA, Rep. AHSB(S). R64, 1963.
11. The Evaluation of Risk from Radiation. ICRP. Publication 8, Pergamon Press, 1966.

от режима основного контура, возможность интенсификации удаления примесей при больших загрязнениях.

Выбор объема системы очистки (емкости по примесям [2]) и ее производительности определяется: общим количеством примесей ΣP_i , которые должны быть уловлены за срок службы установки; требованием по времени очистки контура, особенно в случае аварийных загрязнений; технологией; удобством эксплуатации и обеспечением необходимого резерва оборудования.

Для первого контур общее количество примесей ΣP_1 задается следующими источниками.

1. Начальным загрязнением ($P_{\text{нач}}$). Для первого контура установок БН-350 эта величина оказалась равной 30 кг (в пересчете на кислород) или $3,4 \text{ г/м}^2$ поверхности. Удельная вели-

чина загрязнений для второго контура 2,2 г O_2/m^2 , что хорошо совпадает со значениями, полученными на экспериментальных стендах: 1,4—2,4 г/ m^2 [4]. Большее значение для первого контура связано с тем, что внутри корпуса реактора велись продолжительные монтажные и наладочные работы.

2. Примесями, вносимыми при ремонтах ($P_{рем}$). Теплоноситель загрязняется в основном за счет взаимодействия остатков натрия с атмосферным воздухом. Продуктами взаимодействия являются гидроксид, окись натрия и в меньшем количестве карбонат натрия [5]. Проведенные оценки показывают, что остающиеся на поверхности конструкционного материала пленки взаимодействуют практически полностью за несколько минут. При этом образуется до нескольких десятков грамм примесей на 1 m^2 смоченной натрием поверхности. Это означает, что, например, при ремонте теплообменника БН-350 в контур может поступать до 30 кг примесей. Если в контуре окажутся участки с неполным дренированием натрия, то загрязнение может быть и большим. Меры по ограничению доступа воздуха в контур (скафандры, поддув газа и т. п.) значительно уменьшают образование окислов и других загрязнений. В зависимости от сложности и длительности ремонта фактические цифры при замене, например, основных насосов колеблются в пределах 1—4 кг примесей за ремонт. Хотя эти цифры являются ориентировочными, они дают основу для проведения оценок по загрязнению теплоносителя. Учитывая различные виды ремонта для таких оценок, можно принять, что за 1 год в контур вносится в среднем 10 кг примесей (в пересчете на кислород). Эта величина превышает фактические результаты, полученные на БН-350. Тогда за время эксплуатации ($\tau^* = 20$ лет) установки $P_{рем} = 200$ кг.

3. Примесями, обусловленными загрузкой свежих пакетов ($P_{п}$). Количество примесей можно рассчитать по формуле

$$P_{п} = p \left(S_{AZ} \frac{N_{AZ} \tau^*}{\tau_{AZ}} + S_{ЭК} \frac{N_{ЭК} \tau^*}{\tau_{ЭК}} \right),$$

где p — удельное загрязнение поверхности, $кг/м^2$; S_{AZ} , $S_{ЭК}$ — поверхность пакетов активной зоны и экрана, омываемая натрием; N_{AZ} , $N_{ЭК}$ — число пакетов активной зоны и экранов; τ_{AZ} , $\tau_{ЭК}$ — кампания пакета активной зоны и экрана соответственно.

Для БН-350 при удельной загрязненности поверхности 2 г/ m^2 $P_{п} = 100$ кг.

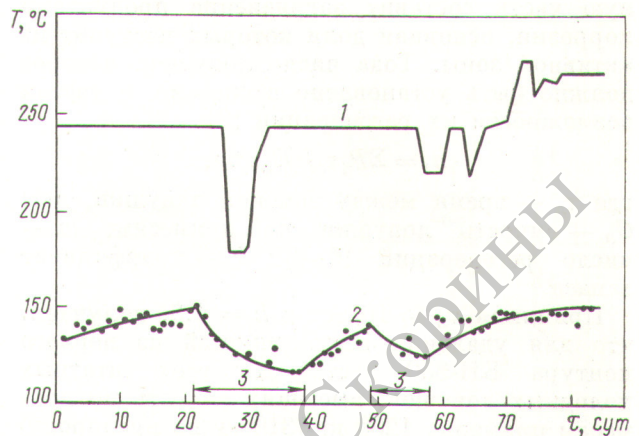


Рис. 1. Накопление примесей в первом контуре БН-350 в январе — марте 1974 г.:

1 — температура натрия; 2 — температура закипания; 3 — работа холодной ловушки

4. Загрязнением в процессе нормальной эксплуатации установки за счет диффузии других источников ($P_{ист}$).

На рис. 1 представлены данные по изменению температуры закипания в первом контуре. Усреднение за все время в предположении, что возрастание температуры закипания обусловлено кислородом, дает источник примеси интенсивностью $G_{пр1} = 50$ г $O_2/сут$.

Загрязнение за все время работы установки $P_{ист} = 365 G_{пр} \tau^*$. Учитывая, что с ростом температуры $G_{пр}$ должна возрастать, увеличим ее в 2 раза по сравнению с экспериментальной (~100 г/сут), тогда $P_{ист1} = 720$ кг.

5. Загрязнением за счет продуктов коррозии конструкционных материалов. Результаты расчетов, проведенных с использованием данных работ [6—8], приведены в табл. 1.

Общее загрязнение за 20 лет работы $\Sigma P_1 = 1400$ кг O_2 (~5,5 т примесей), причем замет-

Поступление продуктов коррозии конструкционных материалов в теплоноситель Таблица 1

| CO_2 , 10 ⁴ мас. % | Интенсивность поступления, г/ m^2 год | | | БН-350, мг/год | |
|------------------------------------|---|--------|--------|----------------|---------------|
| | 300° С | 500° С | 700° С | Первый контур | Второй контур |
| 5 [6] | 0,15 | 6 | 57 | 18 | 3,5 |
| 10 [6] | 0,5 | 19 | 182 | 60 | 11,5 |
| 10 [8] | | 21 | 860 | 43 | 5,7 |
| 25 [6] | 1,7 | 65 | 603 | 194 | 37 |
| 45 [7] | 9,2 | 108 | 4100 | 221 | 29,7 |

ную часть составит загрязнение продуктами коррозии, основная доля которых поступит из активной зоны. Тогда число ловушек, которое должно быть установлено в системе, с учетом возможности их регенерации [9]

$$n_1 = \Sigma P_1 \tau_{\text{л}} k / G_{\text{л}} \tau^* m,$$

где $\tau_{\text{л}}$ — время между заменой ловушки, лет; $G_{\text{л}}$ — емкость ловушки по примесям; m — число регенераций [6—8]; k — коэффициент запаса.

Принимая $\tau_{\text{л}} = 10$ лет и $k = 1,3$, получаем, что для удаления всех примесей из первого контура БН-350 достаточно трех штатных холодных ловушек, имеющих емкость по примесям примерно 1200 кг (310 кг по кислороду) и не приспособленных к регенерации ($m = 1$).

Для второго контура следует учитывать дополнительные источники примесей: попадание воды в натрий при течи парогенератора и загрязнение теплоносителя за счет диффузии коррозионного водорода из третьего контура. Аварийное попадание воды может достигать нескольких сот килограмм. Однако очевидно, что такие ситуации редки. Опытных данных по этому вопросу еще недостаточно. Поэтому для дальнейших оценок принят диапазон изменения 20—100 кг $\text{H}_2\text{O}/\text{год}$. Поступление коррозионного водорода третьего контура, рассчитанное на основании опубликованных данных, для БН-350 находится в пределах 2—12 кг/год. Разброс обусловлен ориентировочным значением удельного потока 1,5—/10 н.см³/(м²·ч) [10, 11].

Таким образом, для второго контура за 20 лет получено

$$\Sigma P_2 = P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{кор}} + P_{\text{рем}} + P_{\text{нач}} = (3 \div 14) \text{ т}$$

примесей и их соединений. Учитывая, что основную часть их составляют водородные соединения, емкость ловушки по которым в 1,5 раза ниже емкости по кислороду, имеем для условий БН-350:

$$n_2 = \frac{\Sigma P_2 \tau_{\text{л}} 1,5}{G_{\text{л}} \tau^* m} k = (2 \div 9) k / m.$$

Число ловушек должно выбираться также с учетом времени очистки теплоносителя и контура в присутствии нерастворенных примесей и их концентрации, обеспечиваемой холодными ловушками с учетом постоянно действующих источников примесей.

Если примеси растворены в теплоносителе и в контуре имеет место идеальное перемешивание, то число ловушек, обеспечивающих очистку теплоносителя за требуемое время,

рассчитывается по формуле $n = 5V_{\text{к}}/\beta Q_{\text{л}} \tau_{\text{оч}}$, где $V_{\text{к}}$ — объем натрия в контуре, м³; β — коэффициент удержания примесей в ловушке; $Q_{\text{л}}$ — расход через ловушку, м³/г; $\tau_{\text{оч}}$ — время очистки контура, ч. Очевидно, что в нормальных условиях эксплуатации время очистки теплоносителя не должно превышать 2—3 сут.

Если в установке имеется постоянно действующий источник примеси интенсивностью $G_{\text{пр}}$ (продукты коррозии, осколки деления, коррозионный водород, нерастворенные продукты взаимодействия натрия с водой и т. п.), то равновесная концентрация примеси (C) при постоянной работе ловушки определяется соотношением

$$C = C'_{\text{л}} + \frac{G_{\text{пр}}}{240 Q_{\text{л}} n \beta \rho},$$

где $C'_{\text{л}}$ — концентрация насыщения при максимальной температуре в ловушке, мас.%; ρ — плотность, кг/м³. Если исходить из условия недопустимости образования взвесей в результате кристаллизации примесей при наименьшей температуре теплоносителя, т. е. $C < C'_{\text{к}}$, то

$$n > \frac{G_{\text{пр}}}{240 Q_{\text{л}} \rho (C'_{\text{к}} - C'_{\text{л}}) \beta},$$

где $C'_{\text{к}}$ — концентрация насыщения при минимальной температуре, мас.%.

Результаты расчетов n для установки БН-350 по продуктам коррозии в предположении, что их основная масса поступает в виде железа, приведены в табл. 2. Значения $C'_{\text{к}}$ и $C'_{\text{л}}$ определяли по результатам работ, указанным в табл. 2. Их анализ с учетом того, что данные [13], вероятнее всего, ошибочны, а работа с большой концентрацией кислорода в натрии невозможна, показывает, что избежать образования взвесей и осадков в результате кристаллизации продуктов коррозии в крупных промышленных установках при существующей в настоящее

Расчет числа ловушек, необходимых для очистки от продуктов коррозии Таблица 2

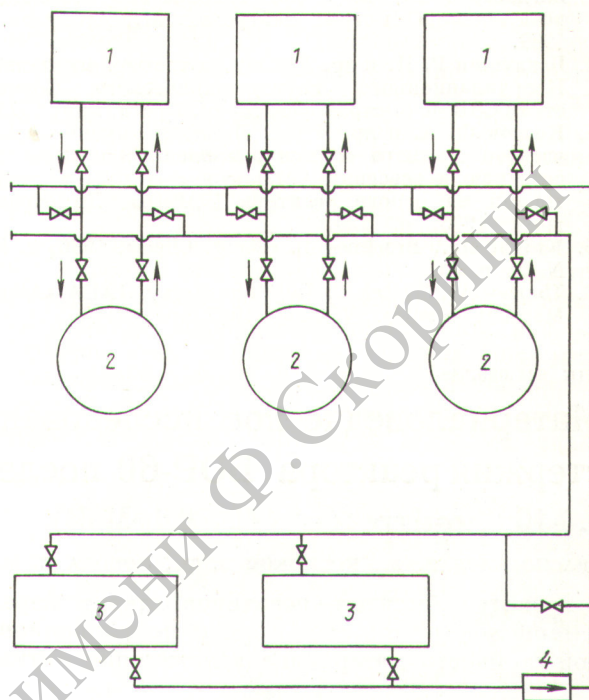
| $C'_{\text{к}} - C'_{\text{л}} \cdot 10^7$, мас.% | Первый контур БН-350 | | | Второй контур БН-350 | | |
|---|-----------------------------------|------|------|-------------------------|------|------|
| | $C_{\text{O}_2} \cdot 10^4$ мас.% | | | | | |
| | 5 | 10 | 25 | 5 | 10 | 25 |
| 2 [13] | 100 | 300 | 900 | 16 | 48 | 160 |
| 12 [13] | 16 | 48 | 144 | 3 | 8 | 30 |
| 2,9 [11, 12] | 68 | 280 | 620 | 11 | 33 | 110 |
| 70 [12] | 3 | 9 | 27 | < 1 | ~ 2 | 4 |
| $4 \cdot 10^3$ [14] | << 1 | << 1 | << 1 | << 1 | << 1 | << 1 |

время производительности холодных ловушек весьма трудно. Присутствие взвесей неизбежно, и для удаления их необходимо разрабатывать специальные средства очистки. Поэтому при выборе числа холодных ловушек с учетом их производительности нужно исходить из приемлемого времени очистки теплоносителя и контура в случае аварийного загрязнения их примесями. Очевидно, что определяющим здесь является случай с присутствием нерастворенных примесей в установке. Однако в этом случае учитывают условия, которые не позволяют использовать полную производительность ловушек. Поэтому критерий производительности не может являться определяющим при выборе числа ловушек, хотя и должен учитываться. Задачу быстрой очистки теплоносителя в таких ситуациях лучше всего решать выбором схемы, позволяющей подключать на аварийную петлю все имеющиеся на установке холодные ловушки.

С точки зрения организации эксплуатации важно иметь в виду ряд дополнительных факторов. При работе реактора с негерметичными или разрушенными твэлами продукты, обладающие высокой радиоактивностью, скапливаются в ловушке. Вследствие этого перед ее регенерацией или удалением необходима длительная выдержка. Ловушка может оказаться временно неработоспособной по другим причинам, например вследствие отказа электрообогрева, который нельзя немедленно устранить. Поэтому с точки зрения эксплуатации желательно иметь три-четыре ловушки. Оптимальным числом ловушек принятой конструкции для системы очистки первого контура БН-350 следует считать цифру 3, которую целесообразно рекомендовать для будущих АЭС.

При определении числа ловушек, подключаемых к каждой петле второго контура, следует иметь в виду, что (как показывает опыт) парогенератор не может работать с малыми течами, а рассчитывать схему на постоянные большие течи и большие загрязнения, очевидно, неправильно. Поэтому установка на каждой петле второго контура больше одной ловушки при наличии связей с ловушками других петель представляется неоправданной.

Исходя из этого, для использования в будущих АЭС может быть рекомендован вариант, представленный на рис. 2. Для установки с тремя петлями предусмотрены три ловушки, каждая из которых может подключаться в любой петле или использоваться для очистки натрия в сливных баках. Недостатком такой схемы является возможность перекачки натрия



Р и с. 2. Рекомендуемая принципиальная схема системы очистки второго контура:

1 — петли 1—3; 2 — холодные ловушки 1—3; 3 — сливные баки; 4 — электромагнитный насос

из петли в петлю в результате неплотности арматуры или неправильных действий персонала. Но опасность этого может быть практически исключена введением соответствующих блокировок и организационных мер.

Приведенные данные позволяют судить о перспективном направлении изменения конструкции холодных ловушек. Имеющиеся конструкции ловушек обладают достаточной емкостью, но некоторое увеличение их производительности (в 1,5—2 раза) было бы полезным. С этой точки зрения более перспективными представляются ловушки с натрий-калиевым охлаждением (типа БН-350). Но и существующие холодные ловушки в достаточной мере удовлетворяют по своей производительности и емкости требованиям к построению систем очистки по крайней мере до мощностей реактора 4000—5000 МВт (т).

Поступила в Редакцию 28/II 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин В. И. и др. В кн.: Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Т. 1, Обнинск, ФЭИ, 1958.

2. Багдасаров Ю. Е. и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1969.
3. Баклушин Р. П. и др. Доклад на третьем заседании Координационного научно-технического Совета стран СЭВ по быстрым реакторам. Прага, март 1973.
4. Козлов Ф. А. и др. В кн.: Доклады научно-технического семинара «Обмен накопленным опытом по созданию и освоению установок с быстрыми реакторами на основе реактора БОР-60». Димитровград, 1973, с. 220.
5. Knight Mc., Brockneg L. «Inorg. Chem», 1966, v. 5, N 9, p. 10.
6. Thorley A., Tyzack C. In: Proc. Symp. IAEA «Alkal Metal Coolants». Vienna, 1967, p. 97.
7. Weeks J. e.a. Ibid., p. 3.
8. Zebroski E. Ibid., p. 195.
9. Волчков Л. Г. и др. Советско-английский семинар: «Компоненты и основные принципы проектирования реакторов». Димитровград, ноябрь 1975.
10. Birault I. e.a. In: Proc. Intern. Conf. on Sodium Technology and Fast Reactor Design. ANL-7520. Pt. 1. 1968, p. 345.
11. Simons E. «Reactor Mater.», 1969, v. 12, N 3, p. 184.
12. Claar T. «Reactor Technology», 1970, v. 13, N 2, p. 124.
13. Bans R.e.a. In: Proc. Intern. Conf., Geneva, 1956, v. 9, p. 356.
14. Epstein L. «Science», 1950, v. 112, p. 426.

УДК 621.039.548

Материаловедческое исследование гильзы компенсирующего стержня реактора БОР-60 после облучения флюенсом $1,6 \cdot 10^{23}$ нейтр./см² ($E > 0,1$ МэВ)

КРАСНОСЕЛОВ В. А., КОСЕНКОВ В. М., ЛОВОДА Е. М., ОСТРОВСКИЙ З. Е., ГОНЧАРЕНКО Ю. Д.

Развитие быстрых реакторов ставит перед материаловедцами новые задачи по радиационной стойкости материалов конструкций актив-

ных зон. Прежде всего это относится к проблемам распухания и радиационного охрупчивания чехлов и оболочек. В частности, было предпринято материаловедческое исследование аустенизированной стали X18H9, из которой изготовлены направляющие гильзы компенсирующих стержней реактора БОР-60. Такая гильза, представляющая собой диффузионно-хромированную шестигранную трубу с внутренним диаметром 42 мм и размером «под ключ» 44 мм, была извлечена из центральной ячейки активной зоны после пяти лет эксплуатации реактора. Максимальный флюенс нейтронов для материала гильзы за это время составил $\sim 1,6 \cdot 10^{23}$ нейтр./см² ($E > 0,1$ МэВ). Распределение флюенса и температуры облучения по высоте активной зоны представлено на рис. 1. Следует отметить, что указанному режиму соответствовало $\sim 80\%$ полученного флюенса, а оставшиеся $\sim 20\%$ были получены при несколько более низкой температуре, но не менее 350 °С.

Методика исследования. Радиационное распухание материала изучалось тремя независимыми методами. В первом измеряли размер гильзы «под ключ» по трем парам граней с погрешностью $\pm 0,01$ мм. Во втором измеряли

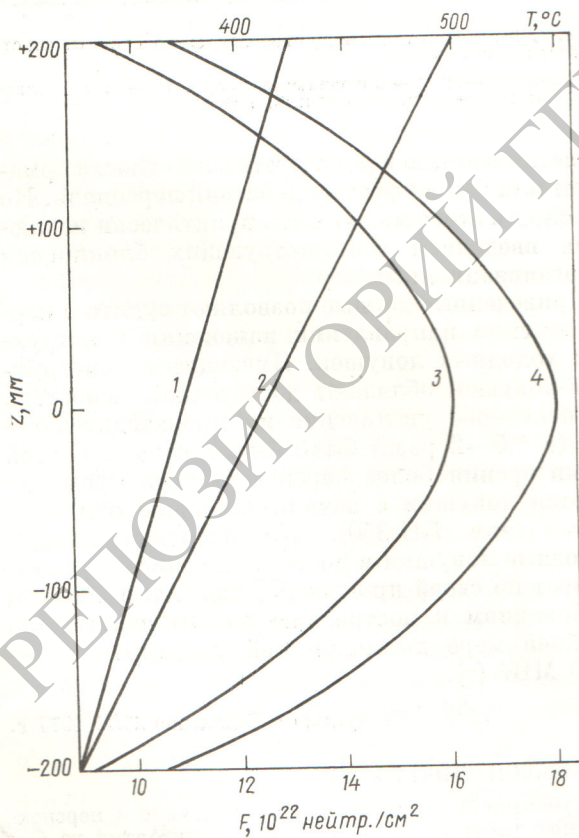


Рис. 1. Распределение флюенса F и температуры облучения по высоте активной зоны z :

1 — температура внутренней поверхности гильзы (со стороны проточного натрия); 2 — температура внешней поверхности гильзы (со стороны топливных пакетов); 3 — флюенс для $E > 0,1$ МэВ; 4 — флюенс для $E > 0$