

ВОЗМОЖНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ БЫСТРОГО РЕАКТОРА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ СПЛАВОМ НАТРИЙ-КАЛИЙ

В.С. Окунев

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,
г. Москва*



Исследуется потенциал теплоносителя первого контура реактора на быстрых нейтронах на основе сплава Na-K с точки зрения обеспечения безопасности. Представлены результаты оптимизации характеристик безопасности такого реактора с учетом внутренней самозащищенности от наиболее опасных аварийных ситуаций, сопровождающихся отказом аварийной защиты.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка реакторных установок (РУ) нового поколения основывается на существующей нормативно-технической документации (ОПБ-88/97, ПБЯ РУ АС-89, СП-АС-88, НРБ-96 и др.), которой не противоречат основные положения философии естественной безопасности, сформулированные в [1]. В совокупности они отражают новые требования к безопасности, сформировавшиеся к концу XX столетия, предполагающие детерминистическое исключение тяжелых аварий на АЭС, в первую очередь, за счет исключения внутренне присущих реактору естественных факторов опасности.

Результаты, представленные в настоящей работе в определенной мере отражают современный взгляд на старую концепцию реактора на быстрых нейтронах (БР) в свете новых требований к безопасности.

Привлекательно ли использование эвтектики Na-K в качестве теплоносителя первого контура БР нового поколения с точки зрения обеспечения безопасности? Есть ли у этого сплава какие-либо достоинства кроме обеспечения внутренней самозащищенности от аварий с захолаживанием теплоносителя (режимы типа OVC), и, вообще, возможна ли «реанимация» старой концепции? Ответить на эти вопросы помогут результаты оптимизации характеристик безопасности БР, охлаждаемого таким сплавом.

ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ПЕРВЫХ БР

Для охлаждения первых БР выбирались теплоносители с низкой температурой замерзания, что не требовало дополнительного подогрева контуров при остановке реактора. Такими теплоносителями являются ртуть (температура замерзания 234,3К)

и эвтектический сплав 22%Na-78%K (261,7 К; в процентах указано массовое содержание компонентов). Ртуть тяжелее всех известных жидкостей, химически стойка, имеет низкую температуру замерзания, но и относительно низкую температуру кипения, что затрудняет ее использование в качестве теплоносителя БР из-за высокой вероятности кипения в аварийных режимах с ухудшением условий теплоотвода от активной зоны. Кроме того, ртуть и соединения на ее основе ядовиты. Ртутью охлаждались первый американский БР «Клементина» (физический пуск которого состоялся в 1946 г.) и первый советский БР-1, впоследствии реконструированный в БР-2 (1956 г.); сплавом Na-K - второй американский БР - EBR-I (1951 г.) и первый британский БР «Даунри» (или DFR, 1959 г.) [2]. Однако вскоре отказались и от использования ртути в качестве теплоносителя РУ из-за низкой температуры кипения, но, в основном, из-за высокой плотности и, следовательно, больших затрат мощности на циркуляцию; и от использования сплава Na-K в качестве теплоносителя первого контура энергетических БР. Основная причина отказа от эвтектики Na-K в пользу чистого натрия — необходимость снижения максимальной температуры теплоносителя Na-K по сравнению с чистым натрием и, следовательно, меньшая эффективность паросилового цикла. Кроме того, Na-K имеет меньшие теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, температуру кипения, больше поглощает нейтроны.

В современных условиях, когда требования безопасности вышли на первый план, а критерий максимизации коэффициента воспроизводства (или минимизации времени удвоения системы реакторов) и, соответственно, увеличения энергонапряженности активной зоны давно перестал быть актуальным, неплохо было бы выяснить, все ли аспекты применимости эвтектического сплава Na-K в качестве теплоносителя первого контура БР изучены до конца. Нет ли перспектив у сплава Na-K в связи с повышением требований к безопасности? Калий тяжелее натрия, следовательно, сплав Na-K меньше замедляет нейтроны, чем чистый натрий. При использовании сплавного теплоносителя можно ожидать снижения пустотного эффекта реактивности (ПЭР) по сравнению с традиционными БР с натриевым охлаждением активной зоны. Кроме того, было бы несправедливо обойти вниманием теплоноситель, использование которого позволяет детерминистически исключить целый класс аварийных ситуаций (усугубляющихся отказом аварийной защиты), вызванных переохлаждением теплоносителя (OVC WS). Тем более, такой сплав заслуживает внимания, т.к. он уже применялся для охлаждения активной зоны и применяется сегодня в качестве теплоносителя второго контура БР, т.е. технология использования эвтектики Na-K хорошо освоена.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Расчетные и оптимизационные исследования проведены с помощью программы DRACON-M [3], позволяющей рассматривать многозонные БР в двумерной цилиндрической геометрии. Распределения нейтронов и ценностей нейтронов определяются с использованием 26-групповой системы констант в диффузионном приближении на основе идей методов итерационного синтеза. Аварийные процессы описываются в приближении точечной нейтронной кинетики с учетом обратной связи по средним температурам топлива и теплоносителя. Оптимизационная задача решается с помощью метода последовательной линеаризации [4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сформулируем задачу поиска оптимального управления следующим образом. Найти значения вектора управления u с компонентами $\{u_k\}$, $k=1,2,...,K$, из области определения U : $u_k^{min} \leq u_k \leq u_k^{max}$, при которых целевой функционал (критерий оптималь-

ности) $F_0(u_k)$ принимает минимальное значение и выполняются ограничения $F_i(u_k) \leq F_i^{don}$ ($i=1,2,...,J, J+1, J+2,...,I$) для двух групп функционалов: J функционалов надежности и $(I-J)$ функционалов безопасности. Причем функционалы F_i ($i=0,1,2,...,I$) также зависят от переменных состояния, определенных на решениях известных уравнений. Предполагается, что значения u_k^{min} , u_k^{max} и F_i^{don} известны.

Основные компоненты вектора управления перечислены в табл. 1.

Рассматриваются два функционала, характеризующих ПЭР: эффект, соответствующий осушению всего реактора - ПЭР_р, и эффект, соответствующий осушению центральной зоны - зоны малого обогащения и торцевого экрана над ней - ПЭР_ц. В качестве целевого функционала выбран ПЭР_ц. Учитывались ограничения для функционалов надежности, характеризующих режим работы РУ на номинальной мощности (ос-

Таблица 1

Параметры компоновки и некоторые функционалы, характеризующие номинальный режим работы БР тепловой мощностью 3000 МВт, охлаждаемого сплавом Na-K

| Параметр | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 | Вариант 4 | Вариант 5 |
|--|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Состав теплоносителя, % (по массе) | 22%Na-78%K (эвтектика) | | | 79%Na-21%K | |
| Управления | | | | | |
| Обогащение топлива, % | 11,5 / 18,7 | 12,0/19,0 | 11,3 / 17,3 | 10,9 / 19,4 | 8,4 / 21,1 |
| Диаметр топливной таблетки, мм | 5,36 | 9,94 | 9,42 | 5,21 | 5,00 |
| Относительный шаг решетки твэлов | 1,176/ 1,423 | 1,150/ 1,439 | 1,159/ 1,373 | 1,180/ 1,416 | 1,202/ 1,407 |
| Температура теплоносителя на входе в активную зону, К | 439 | | | 639 | |
| Размер зон | | | | | |
| радиальный | 106,8/37,7/ 45,0 | 123,9/34,4/ 31,2 | 111,0/47,5/ 45,0 | 105,8/38,7/ 45,0 | 100,2/44,3/ 45,0 |
| аксиальный (полувысота активной зоны : экран) | 51,0 : 45,0 | 47,9 : 0,0 | 51,0 : 45,0 | 51,0 : 45,0 | 51,0 : 45,0 |
| Массовый расход теплоносителя, кг / (м ² с) | 5530,9/ 4686,2 | 6098,9/ 3735,0 | 7091,3/ 4754,0 | 5481,3/ 4636,6 | 5315,6/ 4670,0 |
| Функционалы | | | | | |
| Максимальная температура, К | | | | | |
| топлива | 1106/1103 | 1795/1618 | 1614/1910 | 1160/1343 | 1101/1520 |
| теплоносителя | 748/636 | 732/613 | 839/841 | 843 / 814 | 818/869 |
| оболочки твэла | 769/665 | 799/689 | 882/899 | 858 / 842 | 831/903 |
| Средний подогрев теплоносителя, К | 233 | 223 | 181 | 172 | 173 |
| Максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см | 255,4 / 295,9 | 975,0 / 884,6 | 684,2 / 916,4 | 214,3 / 324,5 | 184,9 / 389,9 |
| КВА | 1,06 | | | | 0,96 |
| Доля естественной циркуляции, % | 8,83/11,74/ 1,63 | 13,51/ 24,59/2,14 | 9,89/21,55/ 2,14 | 7,33/11,41/ 1,27 | 7,21/12,81/ 1,27 |
| Коэффициент реактивности, 10 ⁶ Δk / к) / К | | | | | |
| доплеровский | -4,623/ -1,398 | -3,699/ -0,673 | -2,308/ -1,034 | -4,288/ -2,047 | -2,226/ -2,844 |
| плотностной | 3,570/ 0,931 | 2,149/ -0,239 | 1,647/ -0,04 | 0,529/ 0,005 | 0,119/ 0,04 |

Примечание. Здесь и далее в таблицах через косую черту приведены значения, соответствующие зоне малого, большого обогащения и боковому экрану (последнее значение иногда отсутствует).

Таблица 2

Функционалы, характеризующие аварийные режимы, сопровождающиеся отказом

| Функционал | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 | Вариант 4 | Вариант 5 |
|---|--------------------------|-----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| LOCA WS (потеря теплоносителя) | | | | | |
| ПЭР при осушении, % $\Delta k / k$: | | | | | |
| реактора | -0,816 | -0,637 | 0,167 | -0,397 | 0,159 |
| центральной зоны | 1,152 | 0,359 | 0,353 | 1,011 | 0,320 |
| LOF WS (прекращение принудительной циркуляции) | | | | | |
| Переходный режим (К): | | | | | |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ при $t_{\text{н}}=30$ с | 1016/722 | — | — | 1082/892 | 1045/952 |
| $t_{\text{н}}=40$ с | 992/710 | — | — | 1063/881 | 1030/938 |
| Установившийся режим: | | | | | |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$, К | 946/682 | — | — | 1024/852 | 999/898 |
| $T_{\text{т}}^{\text{max}}$, К | | | | 1046/906 | 1016/969 |
| относительная мощность | 0,150 | — | — | 0,143 | 0,149 |
| TOP WS (ввод положительной реактивности) | | | | | |
| Переходный режим: | | | | | |
| $T_{\text{т}}^{\text{max}}$, К | 1253/1241 | 1912/1701 | 1677/1980 | 1279/1492 | 1206/1709 |
| относительная мощность | 1,185 | 1,067 | 1,047 | 1,197 | 1,197 |
| Установившийся режим: | | | | | |
| $T_{\text{т}}^{\text{max}}$, К | 1251/1236 | 1898/1688 | 1670/1971 | 1278/1488 | 1205/1704 |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$, К | 789/662 | 737/684 | 839/841 | 873/840 | 844/902 |
| относительная мощность | 1,172 | 1,053 | 1,038 | 1,185 | 1,186 |
| OVC WS (захолаживание теплоносителя): | | | | | |
| а) перевод насосов на повышенную производительность | | | | | |
| $T_{\text{т}}^{\text{max}}$, К | 1267/1310 | 1827/1660 | 1614/ 1910 ⁽¹⁾ | 1285/1547 | 1213/1775 |
| Относительная мощность | 1,420 | 1,097 | 1,059 | 1,400 | 1,405 |
| б) подключение резервной петли | | | | | |
| $T_{\text{т}}^{\text{max}}$, К | 1250/1235 | 1890/1678 | 1653/1957 | 1288/1510 | 1209/1737 |
| Относительная мощность | 1,214 | 1,071 | 1,051 | 1,259 | 1,257 |
| LOHS WS (прекращение теплоотвода от первого контура) | | | | | |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$, К | 719/696 | 823/752 | 959/960 | 845/842 | 835/859 |
| Наложение процессов LOF WS, TOP WS и OVC WS (б) | | | | | |
| Локальный максимум $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ (К): | | | | | |
| при $t = t_{\text{н}} = 30$ с | 1095 ⁽²⁾ /759 | — | — | 1145 ⁽¹⁾ / 927 | 1104 / 997 |
| при $t = t_{\text{н}} = 40$ с | 1075 ⁽²⁾ /749 | — | — | 1129 / 917 | 1103 / 983 |
| Установившийся режим: | | | | | |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$, К | 1098 ⁽²⁾ /742 | — | — | 1227 / 950 | 1154 ⁽²⁾ / 1004 |
| $T_{\text{т}}^{\text{max}}$, К | 1138/ 809 | — | — | 1264 / 1038 | 1184 / 1113 |
| относительная мощность | 0,204 | — | — | 0,205 | 0,228 |

Примечание. $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$, $T_{\text{т}}^{\text{max}}$ - максимальная температура теплоносителя и топлива соответственно, ⁽¹⁾ соответствует номинальному режиму, ⁽²⁾ незначительно превышает температуру кипения; прочерк соответствует интенсивному кипению теплоносителя.

новные из них перечислены в табл. 1), и функционалов безопасности, характеризующих аварийные режимы типа ATWS, т.е. ситуации, сопровождающиеся отказом ава-

рийной защиты (табл. 2). В числе последних также рассматривалось ограничение $\text{ПЭР}_p < 0$.

Среди температурных ограничений (которые в зависимости от режима работы РУ рассматриваются в качестве функционалов надежности или безопасности) в оптимизационных задачах, в первую очередь, рассматриваются

- максимальная температура оболочек твэлов $T_{об}^{max} \leq 800$ К (в номинальном режиме), что позволит обеспечить длительную работу РУ на номинальной мощности;
- максимальная температура теплоносителя $T_{тн}^{max} \leq 1057$ К (в номинальном и аварийных режимах), что исключает кипение теплоносителя во всех режимах работы реактора;

- максимальная температура топлива $T_m^{max} \leq 1800$ К (в номинальном режиме), $T_m^{max} \leq 2273$ К (в аварийных переходных режимах, соответствует консервативной оценке температуры начала разложения нитрида), $T_m^{max} \leq 2000$ К (в новом квазистационарном состоянии, установившемся в результате действия обратных реактивных связей, значительно более длительный режим по сравнению с переходным).

Расчеты проводились для традиционной компоновки БР (активная зона содержит две подзоны с топливом разного обогащения, окруженные боковым и торцевыми экранами) со смешанным нитридным топливом и теплоносителем Na-K. Компоновка совместима с РУ БН-800 по размерам и тепловой мощности.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БР, охлаждаемый эвтектикой НА-К

В табл. 1, 2 представлены варианты традиционной компоновки БР (содержащей две активные зоны разного обогащения, окруженные экранами) типа БН-800 с нитридным топливом и теплоносителем Na-K. Варианты 1-3 соответствуют БР, охлаждаемому эвтектикой 22%Na-78%K. Для вариантов 1 и 2 выполнены ограничения для функционалов, характеризующих надежность РУ. Температура теплоносителя на входе в активную зону ниже, чем в БН-800 и составляет 439 К (связано с меньшей температурой кипения сплава Na-K по сравнению с натрием приблизительно на 100 К). Первый вариант характеризуется отрицательным ПЭР при осушении реактора и положительным, превышающим β , - при осушении центральной зоны, значением коэффициента воспроизводства активной зоны $K_{ВА} \approx 1$ и внутренней самозащищенностью от четырех наиболее опасных для БР аварийных переходных режимов (см. табл. 2).

Среди температурных ограничений, в первую очередь, рассматриваются

- для максимальной температуры оболочек твэлов $T_{об}^{max} \leq 800$ К (в номинальном режиме);
- для максимальной температуры теплоносителя $T_{тн}^{max} \leq 1057$ К (в номинальном и аварийных режимах);
- для максимальной температуры топлива $T_m^{max} \leq 1800$ К (в номинальном режиме), $T_m^{max} \leq 2273$ К (в аварийных переходных режимах, соответствует консервативной оценке температуры начала разложения нитрида), $T_m^{max} \leq 2000$ К (в новом квазистационарном состоянии, установившемся в результате действия обратных реактивных связей).

Для обоих вариантов эти и другие ограничения выполнены для номинального режима работы РУ, причем с большим запасом по температуре топлива и теплоносителя.

Наиболее опасная комбинация аварийных процессов - одновременное наложение LOF WS, TOP WS и OVC WS (аббревиатуры расшифрованы в табл. 2) приводит к нарушению ограничения для максимальной температуры теплоносителя (незначительному для варианта 1 и весьма существенному для варианта 2), т.е. кипению тепло-

носителя (расчетные значения, приведенные в табл. 2, получены в приближении однофазности теплоносителя). Основной вклад в повышение температуры теплоносителя вносит режим LOF WS. Исключить кипение за счет увеличения времени выбега главных циркуляционных насосов, не изменяя параметров компоновки (входящих в вектор управления), не удастся. Повышению самозащищенности от такой аварии может способствовать увеличение высоты контура естественной циркуляции.

Задача минимизации ПЭР при условии выполнения ограничений для функционалов, характеризующих внутреннюю самозащищенность от всех рассмотренных аварийных ситуаций (табл. 2), и $\text{ПЭР}_\text{ц} < \beta$ (где β - эффективная доля запаздывающих нейтронов) не имеет решения. Дальнейшая (по сравнению с вариантом 1) минимизация $\text{ПЭР}_\text{ц}$ требует дополнительных степеней свободы, т.е. расширения вектора управления включения за счет включения в него дополнительных параметров: толщины торцевых и бокового экранов (вариант 1 получен при фиксированных значениях толщины экранов). В результате дальнейшей оптимизации $\text{ПЭР}_\text{ц}$ потребовалось уменьшение уплощения (отношения радиуса к высоте) активной зоны. При фиксированных радиальных размерах компоновки (суммарный радиус активной зоны и боковых экранов $\Sigma \Delta R_i = 189,5$ см) и ограничении на ее высоту (суммарная высота активной зоны и торцевых экранов $\Sigma \Delta H_j \leq 91$ см) это возможно при отказе от торцевых экранов и увеличении радиуса активной зоны за счет уменьшения толщины бокового экрана. Однако и при этом не удалось достичь приемлемого ПЭР и внутренней самозащищенности от аварий LOF WS и TOP WS. Это связано с противоположной ролью доплеровского коэффициента реактивности в режимах с уменьшением расхода и увеличением мощности. Таким образом, одновременное обеспечение самозащищенности от аварий LOF WS и TOP WS проблематично и связано с определенным компромиссом в выборе оптимального управления, т.е. изменением вектора управления в сторону ухудшения критерия оптимальности - $\text{ПЭР}_\text{ц}$. Для варианта 1 разрешение такого компромисса потребовало снижения энергонапряженности активной зоны, что привело, в свою очередь, к снижению температур (и, как следствие, ухудшение экономических характеристик станции в целом).

Для варианта 2 компромисс разрешен выбором в качестве наиболее предпочтительного одного из условий задачи за счет отказа от выполнения другого. В данном случае предпочтительность отдается требованию минимизации $\text{ПЭР}_\text{ц}$ до приемлемого значения ($\text{ПЭР}_\text{ц} < \beta$), а дополнительные степени свободы для обеспечения этой возможности были получены при исключении из условий задачи ограничений для функционалов, характеризующих внутреннюю самозащищенность от аварий LOF WS. Таким способом для варианта 2 удалось добиться минимизации ПЭР до значения, меньшего β . Платой за это стало аварийное завершение ситуаций, инициированных одновременным обесточиванием всех ГЦН, сопровождающимся отказом аварийной защиты и, как следствие, наложения режимов LOF WS + TOP WS + OVC WS, т.е. для варианта 2 оптимальной компоновки БР удалось достичь минимального $\text{ПЭР}_\text{ц}$ при условиях $\text{ПЭР}_\text{р} < 0$, $\text{ПЭР}_\text{ц} < \beta$ и внутренней самозащищенности от аварий типа TOP WS, OVC WS и LOHS WS. Вариант 2 характеризуется незначительным запасом по максимальной температуре топлива (5 К) в номинальном режиме работы РУ, меньшим, по сравнению с вариантом 1, запасом по $T_\text{м}^{\text{max}}$ в аварийных ситуациях, достаточными запасами по температуре теплоносителя в номинальном и аварийных режимах, высокими тепловыми нагрузками на ТВЭЛы по сравнению с РУ типа БН, но все-таки низкой эффективностью паросилового цикла.

Необходимо отметить, что наибольшая температура топлива для варианта 2 достигается в аварийных режимах с вводом положительной реактивности и подключением «холодной» резервной петли. Причем характер ее временного изменения в

процессе OVC WS для зон малого и большого обогащения различен. В зоне малого обогащения T_m^{max} монотонно увеличивается и выходит на новое квазистационарное состояние, в зоне большого обогащения - повышается, достигает локального максимума, затем незначительно уменьшается и вновь монотонно растет до нового квазистационарного уровня.

Таким образом, выполнение условий $PЭР_{ц} < \beta$ и самозащищенности от аварий LOF WS для БР, охлаждаемого эвтектическим сплавом Na-K, носит конфликтный характер, который, в свою очередь, определяется еще одним конфликтом — противоположными требованиями к доплеровскому коэффициенту реактивности в режимах LOF WS и TOP WS.

Полученные варианты (1 и 2 табл. 1, 2) обладают свойством внутренней самозащищенности от ряда аварий из числа ATWS. Это достигается за счет снижения рабочей температуры теплоносителя (и температуры на входе в активную зону), что, в свою очередь, негативно отражается на эффективности паросилового цикла и приводит к снижению к.п.д. до 27%. Низкая температура теплоносителя на входе в активную зону способствует осаждению примесей, находящихся в теплоносителе, на стенках входного коллектора и в нижней части активной зоны. Чтобы избежать подобных неприятностей, необходимо увеличить рабочие температуры теплоносителя в реакторе и температуру на входе в активную зону. Вариант 3 (табл. 1, 2) получен из варианта 1 при температурных ограничениях, характерных для БР с натриевым теплоносителем. Значения температуры на входе в активную зону (639 K) и среднего подогрева (181 K) приблизительно соответствуют РУ типа БН. Достичь приемлемого $PЭР_{ц}$ ($PЭР_{ц} < \beta$) в результате его минимизации и $PЭР_p < \beta$ при сохранении толщины экранов удалось лишь при исключении ограничений, определяющих внутреннюю самозащищенность от аварии LOF WS. Относительно высокая максимальная температура топлива в номинальном режиме (1910 K) вызывает опасение за самозащищенность реактора в аварийных режимах с неконтролируемым увеличением мощности. Однако, благодаря оптимальному выбору обратных реактивных связей и хорошим теплофизическим свойствам нитридного топлива, его температура в аварийных режимах меньше предельно допустимого значения, соответствующего началу разложения нитрида.

Вариант 3 характеризуется интенсивным кипением теплоносителя в аварийной ситуации LOF WS (уже на 10-й секунде процесса при времени выбега ГЦН 30 с). Исключить кипение не удастся ни повышением времени t_n выбега (даже при $t_n \rightarrow \infty$), ни увеличением (в пределах допустимого) высоты тягового участка контура естественной циркуляции, т.е. установившегося режима естественной циркуляции не существует. Такова плата за приемлемые ПЭР и термодинамическую эффективность паросилового цикла.

Теплоноситель на основе сплава Na-K с большим содержанием натрия

Как отмечено в [2], определенный интерес представляет теплоноситель на основе сплава Na-K, температура замерзания которого немного выше комнатной, например, 60°C. Этому условию соответствует сплав 79%Na-21%K.

Варианты 4, 5 табл. 1, 2 получены в результате расчетно-оптимизационных исследований БР, охлаждаемого таким сплавом. Вариант 4 получен из варианта 1 табл. 1 заменой эвтектики Na-K сплавом с 79%-содержанием натрия при условии выполнения основных ограничений задачи. (Повышение доли натрия в сплаве привело к увеличению эффективного коэффициента размножения нейтронов на 13%.) При этом область допустимых значений температуры на входе в активную зону (составляющая вектора управления задачи) сужена по сравнению с исходным вариантом ограниче-

нием $T_{вх} \geq 639$ К. Толщины экранов не включались в число управлений, т.е. не изменялись в процессе решения задачи. В целом полученный вариант характеризуется положительным $\text{ПЭР}_{ц}$ в несколько раз превышающим β , отрицательным ПЭР_p , внутренней самозащищенностью от аварий LOF WS, TOP WS, OVC WS и LOHS WS. Неодновременное наложение режимов (LOF+TOP+OVC) WS при $t_n \geq 40$ с приводит к локальному максимуму температуры теплоносителя (не превышающего допустимое значение) и кипению при $t \gg t_n$.

Минимизация ПЭР и снижение максимальной температуры оболочки и теплоносителя в номинальном и аварийных режимах работы БР являются основными конкурирующими процессами при оптимизации характеристик безопасности рассматриваемого реактора. Снижение $\text{ПЭР}_{ц}$ до значения, меньшего β , при $\text{ПЭР}_p < \beta$ и условии внутренней самозащищенности от ряда наиболее опасных аварий из числа ATWS (в том числе LOF WS) оказалось возможным за счет разрешения компромисса в сторону повышения температуры теплоносителя и оболочек твэлов в номинальном режиме, а также при незначительном снижении КВА (вариант 5). За счет снижения по абсолютному значению отрицательного доплеровского коэффициента реактивности (усугубляющего в данном случае аварийный режим LOF WS) удалось добиться улучшения (по сравнению с вариантом 1 табл. 1) самозащищенности от аварии LOF WS и наложения (LOF + TOP + OVC) WS, хотя в последнем случае теплоноситель кипит.

Таким образом один из компромиссных вариантов, характеризующийся внутренней самозащищенностью от наиболее опасных аварийных ситуаций и относительно высокой температурой теплоносителя в номинальном режиме, гарантирующей высокую термодинамическую эффективность паросилового цикла, является БР, охлаждаемый сплавом 79%Na-21%K.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование эвтектики Na-K для охлаждения активной зоны БР позволит не только детерминистически исключить аварии с захолаживанием теплоносителя, но и обеспечить внутреннюю самозащищенность от аварий других типов (из числа ATWS). Это достигается при комплексной оптимизации характеристик безопасности РУ. Таким образом, в свете новых требований к безопасности, сложившихся после Чернобыльской катастрофы, предполагающих исключение тяжелых аварий РУ, возможна «реанимация» старой концепции БР или, по крайней мере, можно утверждать, что с точки зрения возможности обеспечения внутренней самозащищенности концепция использования эвтектического сплава Na-K в качестве теплоносителя первого контура БР имеет право на существование.

С другой стороны, возможность отказа от систем электрообогрева контура является, пожалуй, единственным преимуществом БР, охлаждаемых сплавом на основе натрия и калия по сравнению с реакторами типа БН. С точки зрения возможности обеспечения внутренней самозащищенности от ряда аварий, реакторы, охлаждаемые сплавом Na-K, не имеют преимуществ по сравнению с БР с натриевым теплоносителем. Вследствие меньшей температуры кипения сплава Na-K по сравнению с чистым натрием для БР, охлаждаемых таким сплавом, трудно обеспечить самозащищенность от аварии типа LOF WS (даже при малом содержании калия в сплаве).

Литература

1. Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. и др. Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа) // Атомная энергия. - 1992. - Т. 72. - Вып. 4. - С. 317-329.
2. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах/Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. - М.: МИФИ, 1999.
4. Хромов В.В., Кузьмин А.М., Орлов В.В. Метод последовательной линеаризации в задачах оптимизации реакторов на быстрых нейтронах. - М.: Атомиздат, 1978.
5. Хаммел Г., Окрент Д. Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах/Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1975.

Поступила в редакцию 28.06.2002

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.311.25:621.039

Possibility of joint use of neural networks and best-estimate codes in system of operators support \ Yu.B. Vorobyov, V.D. Kuznetsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References, 4 titles.

The technique for support of the NPP's operator with use of technologies on the basis of thermal-hydraulic best estimate codes, systems of uncertainty analysis and technologies of an artificial intellect on a base of neural networks is offered. It is shown that it is possible with good reliability to identify character of possible accidents at the initial stage of their occurrence. Thus, the practical opportunity of the recognition such failures on NPP may be realized and the system for support of the operator with use of the offered approach can be created.

УДК 621.039:519.7

The Problem of Multicriteria Optimization for NPP Lifetime \ O.M. Gulina, A.A. Zhiganshin, T.P. Korniets; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 4 pages, 1 illustration. - References, 5 titles.

The problem of NPP unit lifetime optimization is formulated as multicriteria one. There is presented the form of economical criterion under degradation processes in the base equipment. The method of NPP lifetime estimation for the model with interval parameters is supposed.

УДК 621.039.52

Possibility of Safety Ensuring of the Fast Reactor, Cooled by Na-K Alloy \ V.S. Okunev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 2 tables. - References, 5 titles.

The possibilities of safety ensuring of the fast reactors, cooled by Na-K alloy are researched. The results of optimisation of the safety characteristics of core with discount self-protected to severe anticipated transients without scram are presented.

УДК 502.3

The Priorities and Some Findings of Research on Environmentally Occurring "Hot" Radioactive Particles. The General Characterization of "Hot" Radioactive Particles Applicability for Technical Purposes \ I.Ya. Gaziev, Ya. I. Gaziev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 4 illustrations, 2 tables. - References, 8 titles.

The data have been compiled on "hot" radioactive particles (HRPs) in the environment with their individual beta activities of about 1 Bq/particle or higher and on the environmental contamination patterns with these particles. Two priorities in research of environmental contamination with such radioactive particles have been outlined. The first is the data acquisition on the main physical characteristics of HRP in natural media to specify the principal features of environmental contamination with these particles. The second is the data availability on radiation exposure of the biosphere, including humans, to such particles. Some essential findings from the two approaches are considered in the paper. The possibilities of laboratory produced HRP have been shown for their uses in organizing and performing radioecological monitoring in the atmosphere - underlying surface - biota (with humans included) system.