

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ, ОХЛАЖДАЕМЫХ СПЛАВАМИ КАЛИЯ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

А.М. Кузьмин, В.С. Окунев

Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), г. Москва



В статье представлены некоторые оптимизированные характеристики естественной безопасности быстрых реакторов, охлаждаемых сплавами К-Pb и К-Bi, полученные в результате исследований на установках типа БН-800 и «Суперфеникс» с нитридным смешанным топливом. Результаты могут быть полезны при создании нового поколения ядерных реакторов.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск перспективных теплоносителей для единичных блоков БР специального назначения (например, выжигателей младших актинидов) требует рассмотрения различных теплоносителей на основе сплавов жидких металлов, в том числе сплавов щелочных металлов с тяжелыми, что, возможно, позволит объединить некоторые преимущества охлаждения чистым металлом и устранить ряд серьезных недостатков, присущих отдельным компонентам сплава, в первую очередь, с точки зрения безопасности. Как возможные теплоносители БР специального назначения представляют определенный интерес сплавы калия со свинцом и калия с висмутом. Более жесткий спектр нейтронов в таких БР (по сравнению с реакторами с натриевым охлаждением) способствует снижению пустотного эффекта реактивности (ПЭР).

Калий в чистом виде практически не рассматривался в качестве теплоносителя РУ, за исключением космических ЯЭУ, охлаждаемых кипящим металлом [1]. Эвтектический сплав NaK используется в качестве теплоносителя II контура БР и ранее применялся для охлаждения активных зон БР EBR-I (США) и DFR (Великобритания). Из тяжелых металлов в качестве теплоносителя ЯЭУ подводных лодок используется эвтектический сплав свинца и висмута. В энергетических БР нового поколения авторами [2] предлагается использовать чистый свинец.

Использование сплавов на основе калия в качестве теплоносителя позволит совместить преимущества относительно низкой температуры плавления, низкого давления паров и относительно слабого поглощения нейтронов (натрий по сравнению с калием слабее поглощает, а калий меньше замедляет нейтроны). По сравнению с натрием калий имеет меньшую вязкость и плотность и, следовательно,

требует меньших затрат мощности на прокачку. Как теплоситель калий уступает натрию по теплопроводности и теплоемкости. Калиевый теплоноситель почти в два раза проигрывает натриевому по значению коэффициента теплоотдачи. По сравнению с натрием калий менее распространен в природе, его производство дороже. Однако при строительстве единичных блоков БР, это не является серьезным препятствием использования в качестве теплоносителя сплавов на основе калия.

Одна из основных проблем использования теплоносителя на основе сплавов тяжелых и щелочных металлов — коррозия конструкционных материалов — может быть решена, например, за счет минимизации содержания кислорода в теплоносителе (общее требование для щелочных металлов), отказа от использования высоконикелевых сталей и введения химических ингибиторов в теплоноситель (требование для тяжелых металлов).

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

На практике приходится решать многокритериальные задачи оптимального проектирования РУ (задачи многопараметрической или векторной оптимизации). Их удобно сводить к задачам, где целевой функционал определен однозначно, а остальные критерии присутствуют в виде ограничений. Так, в практических задачах в качестве критерия оптимальности обычно рассматривают один из экономических показателей работы АЭС, а условия безопасной работы формулируют в виде ограничений для соответствующих функционалов — функционалов безопасности, характеризующих аварийные режимы. Поскольку сегодня требования безопасности вышли на первый план, на предварительных этапах проектирования в качестве целевого функционала в задачах оптимизации компоновок РУ может рассматриваться один из функционалов безопасности, например, значение отдельной составляющей какого-либо эффекта или коэффициента реактивности. Одной из важных характеристик, определяющей естественную безопасность реактора, является ПЭР. Поэтому наибольший интерес представляет решение задачи его минимизации. Проблема оптимизации (минимизации или максимизации) непосредственно отдельных составляющих коэффициентов реактивности (например, доплеровской) также представляет определенный интерес, но не является первоочередной задачей. Гораздо важнее в задачах оптимального проектирования учитывать (например, в виде ограничений) такие функционалы безопасности (большинство из которых, в свою очередь, зависят от коэффициентов реактивности), как максимальная температура компонентов активной зоны (топлива, теплоносителя, оболочек твэлов и др.), тепловая мощность реактора, давление в полости для сбора газообразных продуктов деления, прочностные и другие характеристики в аварийных режимах работы реактора.

Поскольку ПЭР имеет сильную пространственную зависимость (ПЭР при осушении центральной области активной зоны традиционных компоновок БР обычно положителен и значительно превышает значение, соответствующее осушению всего реактора), в задачах оптимального проектирования представляет интерес учет обоих эффектов: осушение всего реактора (активной зоны и экранов), характеризующее значением ПЭР_p и осушение зоны малого обогащения и торцевого экрана над ней — ПЭР_c . Последний случай может быть реализован, например, при вскипании теплоносителя. Решались задачи минимизации ПЭР_p с различными ограничениями, в том числе $\text{ПЭР}_c < \beta$ где β — эффективная доля запаздывающих нейтронов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе представлены результаты решения задач минимизации пустотного эффекта реактивности (ПЭР) в традиционных компоновках БР (две активные зоны с топливом различного обогащения, окруженные боковым и торцевыми экранами) типа БН-800 и «Суперфеникс», с ограничениями для функционалов, характеризующих поведение РУ в наиболее опасных аварийных ситуациях, сопровождающихся отказом аварийной защиты (ситуации типа ATWS). В качестве теплоносителя используются сплавы 90%К-10%Рb и 90%К-10%Вi (в процентах указано массовое содержание). Увеличение доли тяжелого металла в сплаве приводит к значительному увеличению температуры плавления (замерзания) теплоносителя, что нежелательно с точки зрения безопасности.

Исследования проводились с помощью расчетно-оптимизационного комплекса DRACON-N и программ FRISS-2D [3]. Теплофизические характеристики теплоносителя рассчитывались на основе соотношений и рекомендаций, приведенных в работе [4].

Требование минимизации запаса реактивности на выгорание учитывалось с помощью условия $K_{BA}=1$, неравномерность энерговыделения по радиусу активной зоны — функционалом k_r . Основным требованием к получаемым (оптимальным) компоновкам является их совместимость по геометрическим размерам активной зоны с РУ БН-800 и «Суперфеникс».

Основные результаты представлены в табл. 1—5. Остановимся подробнее на этих исследованиях.

БР С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ К-Рb

Результаты решения задач оптимизации компоновок БР, охлаждаемым сплавом 90%К-10%Рb, представлены в табл. 1.

Варианты 1 и 2 (для РУ типа БН-800 и «Суперфеникс») (табл.1) получены в результате решения задачи минимизации ПЭР_р без ограничений для ПЭР_ц; (через черту в таблицах приведены значения, соответствующие зонам малого и большого обогащения и боковому экрану). При этом требовалось геометрическое соответствие оптимальных вариантов компоновкам БН-800 и «Суперфеникс». Для реактора типа БН-800 учтены ограничения — $\sum \Delta R_i = R_0$ и $\sum \Delta H_j < H_0$, где ΔR_i , ΔH_j — радиальные и аксиальные размеры i -ой зоны и j -го слоя реактора соответственно, R_0 и H_0 — радиус и толщина активной зоны БН-800 или «Суперфеникс» соответственно. Для РУ «Суперфеникс» последнее ограничение заменено равенством.

Как видно из табл.1, максимальная температура оболочек твэлов в первой радиальной зоне реактора типа БН-800 (торцевой экран над зоной малого обогащения) при работе на номинальной мощности достигает своего предельно допустимого значения (900 К). Температура теплоносителя в номинальном режиме в этом случае достаточно высока, что неблагоприятно сказывается на поведении реактора в аварийном режиме LOF WS (прекращение принудительной циркуляции теплоносителя первого контура с отказом аварийной защиты): максимальная температура $T_{т.н.}^{max}$ теплоносителя в этом аварийном процессе достигает предельно допустимого значения $T_{т.н.}^{доп}$, соответствующего началу кипения.

Одна из наиболее опасных комбинаций аварийных ситуаций — наложение процессов LOF WS, TOP WS и OVC WS — приводит к аварии (расчетное значение $T_{т.н.}^{max}$ значительно превышает температуру кипения — табл.2). Прочие аварийные ситуации из числа наиболее опасных для БР с жидкометаллическим охлаждением не приводят к нарушению работоспособности барьеров безопасности (табл.2).

Таблица 1

Компоновки БР, охлаждаемые сплавом 90%K-10%Pb

Основные управления и функционалы задачи	РУ типа БН-800			РУ типа "Суперфеникс"	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 1	Вариант 2
Управления:					
обогащение топлива, %	13,1/13,9		3,3/14,3	12,7/15,9	7,7/23,5
диаметр топливной таблетки, мм	8,13		9,48	6,68	5,0
относительный шаг решетки твэл	1,165/1,156		1,151	1,202/1,216	1,341/1,216
радиальные размеры зон, см	123,6/54,6/11,3		164,9/83,0/16,4	144,4/35,1/50,0	120,7/101,1/7,4
высота активной зоны, см	76,5		53,9	100,0	34,4
толщина торцевого экрана, см	11,2		6,3	30	24,9
массовый расход теплоносителя РУ, кг/(м ² с)	5727,9/ 8524,9		5049,8/ 8175,9	7875,2/ 8678,8	6316,4/ 10336,0
Функционалы:					
тепловая (электрическая) мощность РУ, МВт	2100(800)			3000 (1200)	
T _{вх} , К	639,1	539,1	639,1	639,1	
средний подогрев теплоносителя, К	179		143	175	144
максимальные температуры, К:					
- топлива	1403/1368	1294/1275	837/1752	1248/1330	888/1800
- теплоносителя	870/807	770/708	685/804	832/833	681/807
- оболочки твэл	900/838	799/740	694/867	854/860	696/882
KBA	1,06		1,05	1,06	0,61
k _г	1,6		3,1	1,6	2,19
ПЭР _ц , %Δk/k	3,20	3,21	0,21	5,46	0,36
ПЭР _р , %Δk/k	-0,28	-3,24	-4,71	-1,30	0,36
максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см	449,2/467,7	449,9/468,4	137,7/823,0	317,5/371,4	116,7/553,8
коэффициенты реактивности, 10 ⁶ ×(Δk/k)/K					
- доплеровский	-1,76/-1,43	-1,97/-1,65	-14,73/-2,65	-2,44/-1,06	-0,07/-1,37
- плотностной	4,52/2,11	5,17/2,51	-0,10/4,02	8,00/2,42	-0,07/-1,37
доля естественной циркуляции, %	17,87/9,74/4,03	17,89/9,75/4,03	9,56/12,23/4,60	9,52/8,88/4,33	6,58/7,33/5,48

Снижение ПЭР_р происходит в основном за счет увеличения радиуса активной зоны при уменьшении толщины бокового экрана (для выполнения ограничения $\Sigma\Delta R_i=R_0$) и уменьшения ее высоты при одновременном уменьшении толщины торцевых экранов (сказывается отсутствие требования $\Sigma\Delta H_j=H_0$). При этом шаг решетки в центральной активной зоне (малого обогащения), диаметр твэлов активной зоны увеличиваются и достигают значений, соответствующих компромиссу между требованиями KBA=1 и $T_{т.н.}^{max} < T_{т.н.}^{доп}$ в процессе LOF WS.

Вариант 2 БН-800 (табл.1) отличается от варианта 1 меньшим значением температуры T_{вх} теплоносителя на входе в активную зону. При этом значительно изменились лишь температуры компонентов реактора (в том числе в аварийных режимах работы). ПЭР_ц для вариантов 1 и 2 РУ типа БН-800 (полученных при отсутствии ограничения для него) почти на порядок превышает значение β.

Подобные исследования для РУ типа «Суперфеникс» представлены в двух последних колонках табл.1. Отличительная черта варианта 1 РУ типа «Суперфеникс» - фиксированные значения высоты активной зоны и толщины бокового и торце-

Таблица 2

Функционалы безопасности в аварийных режимах БР, охлаждаемых сплавом 90%К-10%Рb

Аварийные режимы и функционалы безопасности	РУ типа БН-800			РУ типа "Суперфеникс"	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 1	Вариант 2
LOF WS:					
максимальная температура теплоносителя(К) при времени выбега ГЦН					
- 30 с	951/1044	857/952	753/1007	1001/1027	742/1022
- 40 с	940/1031	817/911	751/988	983/1007	736/997
TOP WS (ввод 0,9β за 10 с):					
максимальная температура топлива, К	1593/1563	1492/1462	904/2118	1428/1534	980/2228
максимальная температура теплоносителя, К	910/840	810/737	696/847	873/874	695/863
OVC WS(увеличение расхода в 2 раза за 10 с):					
максимальная температура топлива, К	1576/1573	1468/1465	872/1972	1406/1520	955/2118
OVCWS (подключение "холодной" петли):					
максимальная температура топлива, К	1626/1614	1473/1441	883/2125	1407/1514	968/2284
LOHS WS:					
максимальная температура теплоносителя, К	878/854	780/757	784/831	862/860	786/816
(LOF+TOP+ OVC) WS при времени выбега ГЦН - 40 с:					
максимальная температура теплоносителя, К					
- в переходном режиме	996/1120	902/1029	794/1079	1053/1083	762/1091
- в установившемся режиме	991/1120	897/1159	785/1091	1044/1075	753/1131

вых кранов, которые не изменялись в процессе оптимизации (не входили в вектор управления). Большее уплощение активной зоны РУ «Суперфеникс» по сравнению с проектным для БН-800 позволило значительно снизить не только ПЭР по реактору, но и $T_{т.н.}^{\max}$ в аварийном режиме LOF WS (табл. 2). В этом случае ограничение для $T_{т.н.}^{\max}$ в процессе LOF WS не является препятствием для снижения ПЭР_р. Конфликтный характер носят требования минимизации ПЭР_р и выполнения ограничений для КВА и k_r . Ограничение для k_r особенно усиливает конфликтный характер оптимизационной задачи при фиксированных размерах активной зоны.

Вариант 3 (табл.1) РУ типа БН-800 получен при ограничении ПЭР_ц < β и отсутствии ограничений для радиуса активной зоны и k_r . Конфликтный характер оптимизационной задачи проявляется в требовании:

- выполнения ограничения КВА=1;
- поддержания критичности: $K_{эф}=1$, т.к. большую часть реактора занимает сырьевая вставка.

Максимальная температура теплоносителя в аварийном режиме LOF WS не достигает предельно допустимого значения (табл.2) и, таким образом, практически не влияет на конфликтный характер задачи. Высокая неравномерность энерговыделения по радиусу активной зоны сказывается на увеличении температуры компонентов реактора и, в первую очередь, центра твэла в зоне большого обогащения. Хотя максимальная температура топлива в номинальном режиме работы РУ не достигает предельно допустимой — 1800 К (соответствует началу интенсивного газовыделения в топливе), ее значение в аварийных режимах, инициирован-

ных вводом положительной реактивности, подключением «холодной» резервной петли или переводом ГЦН на повышенную производительность, превышает 1800 К, сохраняя при этом большой запас до плавления. Полученная компоновка характеризуется большим уплотнением активной зоны, что значительно повышает безопасность реактора (с точки зрения снижения ПЭР_ц до значения, меньшего β, и улучшения внутренней самозащищенности от других аварий из числа ATWS), и в то же время ухудшает экономические характеристики ЯЭУ.

Оптимизационная задача в такой постановке (на поиск вектора управления, при котором ПЭР→min, ПЭР_р<β, ПЭР_ц<β, и выполняются ограничения для ряда функционалов в номинальном и аварийных режимах) для РУ типа «Суперфеникс» не имеет решения: не удастся преодолеть конфликт между требованиями снижения ПЭР_ц (до значения, меньшего β) и КВА=1.

В отсутствии ограничений для КВА и k_r удастся снизить ПЭР_р до значения, меньшего β. При этом ПЭР_ц также не превышает β (вар.2, «Суперфеникс»).

Дальнейшее снижение ПЭР (при наличии ограничения для КВА или без него) возможно потребует

- снижения диаметра топливных таблеток и объемной доли топлива в центре активной зоны, или замены центральной зоны (малого обогащения) полостью;
- введения полости между активной зоной и верхним экраном;
- уменьшения плотности (повышения пористости) и объемной доли топлива в зоне малого обогащения, что предполагает, например, использование твэлов с большим центральным отверстием или наличие «холостых» твэлов (по аналогии с проектами БР, разрабатываемых в рамках программы CAPRA [5]).

Важность того или иного способа снижения ПЭР (введения гетерогенности — сырьевой вставки в центр активной зоны, полости в центре активной зоны и/или между активной зоной и верхним экраном, повышения пористости топлива) и выбор наиболее значимого из них могут быть определены на основе относительных значений коэффициентов чувствительности ПЭР к соответствующим управлениям: обогащению топлива, диаметру топливной таблетки или объемной доли топлива, плотности топлива в центральной активной зоне представлены в табл.3. Относительные значения коэффициентов чувствительности функционалов k_{эфф}, k_r,

Таблица 3
Относительные значения коэффициентов чувствительности некоторых функционалов к управлениям для РУ типа «Суперфеникс» (вариант 2) с теплоносителем КРb

Управление	Функционал				
	k _{эф}	k _r	КВА	ПЭР _ц	ПЭР _р
Обогащение топлива:					
ЗМО	4,99· 10 ⁻⁴	-4,29· 10 ⁻²	-1,25· 10 ⁻²	1,91· 10 ⁻¹	5,24· 10 ⁻³
ЗБО	5,30· 10 ⁻¹	4,65· 10 ⁻²	-1,13	-2,21	3,14
Диаметр топливной таблетки:					
ЗМО	7,74· 10 ⁻⁴	-6,82· 10 ⁻²	1,27· 10 ⁻²	7,07· 10 ⁻²	1,03· 10 ⁻²
ЗБО	1,34· 10 ⁻¹	1,45· 10 ⁻¹	-5,44· 10 ⁻²	6,72· 10 ⁻¹	1,13
Шаг решетки твэл:					
ЗМО	-9,01·10 ⁻³	1,54· 10 ¹	-1,04·10 ⁻¹	-1,23	1,63 10 ⁻²
ЗБО	-1,06·10 ⁻¹	-3,86·10 ⁻¹	3,11· 10 ⁻¹	-1,61 10 ¹	-3,72
Радиус ЗМО	2,39·10 ⁻²	6,55· 10 ⁻³	-1,25 10 ⁻⁴	-6,86 10 ⁻⁶	6,03 10 ⁻⁶
Полувысота активной зоны	3,61· 10 ⁻¹	1,04· 10 ⁻¹	-1,77 10 ⁻²	8,45	6,56 10 ⁻¹

Примечание: ЗМО и ЗБО - зоны малого и большого обогащения соответственно

КВА, ПЭР_ц и ПЭР_р к некоторым управлениям. На основе этих данных можно выделить наиболее значимые (с точки зрения влияния на основные функционалы задачи) управляющие параметры.

БР С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ К-VI

Подобные исследования проведены для БР типа БН-800 и «Суперфеникс», охлаждаемых сплавом 90%К-10%Ві (табл.4, 5). Такой сплав характеризуется более низкой, по сравнению с К-РЬ-теплоносителем температурой замерзания, что благоприятно сказывается на развитии аварийных режимов типа ОВС.

Результаты исследований показывают, что отказ от условия равенства диаметра топливных таблеток твэлов позволил улучшить значения ПЭР_р и ПЭР_ц (табл.4). Причем удалось добиться выполнения условия ПЭР_р<β и ПЭР_ц<β.

Полученные варианты обладают свойством внутренней самозащищенности от аварий типа TOP WS, LOHS WS, OVC WS. Для РУ большой мощности («Суперфеникс») с приемлемым значением ПЭР (ПЭР_р<β, ПЭР_ц<β) аварийный режим LOF WS, инициированным одновременным обесточиванием всех ГЦН, может привести к кипению теплоносителя (табл.5).

Таблица 4

Компоновки БР, охлаждаемые сплавом 90%К-10%Ві

Основные управления и функционалы задачи	РУ типа БН-800 (ПЭР _р →min, нет ограничения для ПЭР _ц)	РУ типа "Суперфеникс" (ПЭР _р →min, ПЭР _р <β, ПЭР _ц <β, нет ограничения для К _Г)
Управления:		
обогащение топлива, %	13,1/13,9	5,0/14,1
диаметр топливной таблетки, мм	8,14	7,14/7,08
относительный шаг решетки твэл	1,165/1,156	1,174/1,150
радиальные размеры зон, см	123,8/54,6/11,1	135,9/93,5/0
высота активной зоны, см	76,1	76,2
толщина торцевого экрана, см	11,0	0,3
массовый расход теплоносителя РУ, кг/(м ² с)	5722,6/8519,6	6140,9/10327,1
Функционалы:		
Т _{вх} , К	639,1	
средний подогрев теплоносителя, К	179	181
максимальные температуры, К:		
- топлива	1396/1376	924/1722
- теплоносителя	870/807	726/848
- оболочки твэл	898/839	728/900
КВА	1,06	
К _Г	1,6	3,4
ПЭР _ц , %Δk/k	3,02	0,36
ПЭР _р , %Δk/k	-3,21	0,28
максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см	451,5/469,8	178,6/645,0
коэффициенты реактивности, 10 ⁶ x (Δk/k)/К		
- доплеровский	-1,80/-1,46	-0,19/-2,89
- плотностной	5,17/2,44	-0,10/2,91
доля естественной циркуляции, %	17,68/9,63/3,99	9,66/8,87/5,57

Таблица 5

Функционалы безопасности в аварийных режимах БР, охлаждаемых сплавом 90%K-10%Bі

Аварийные режимы и функционалы безопасности	РУ типа БН-800 ($P_{\text{ЭР}p} \rightarrow \min$, нет ограничения для $P_{\text{ЭР}ц}$)	РУ типа "Суперфеникс" ($P_{\text{ЭР}p} \rightarrow \min$, $P_{\text{ЭР}p} < \beta$, $P_{\text{ЭР}ц} < \beta$, нет ограничения для k_r)
LOF WS:		
максимальная температура теплоносителя (К) при времени выбега ГЦН		
- 30 с	955/1049	902/1368
- 40 с	943/1036	901/1354
TOP WS (ввод 0,9 β за 10 с):		
максимальная температура топлива, К	1596/1567	1010/1883
максимальная температура теплоносителя, К	909/837	733/865
OVC WS (увеличение расхода в 2 раза за 10с):		
максимальная температура топлива, К	1573/1570	972/1788
OVC WS (подключение "холодной" петли):		
максимальная температура топлива, К	1577/1545	986/1868
LOHS WS:		
максимальная температура теплоносителя, К	879/855	842/902
(LOF+TOP+ OVC) WS при времени выбега ГЦН - 40 с:		
максимальная температура теплоносителя, К	1000/1041	939/1446

ВЫВОДЫ

Использование в качестве теплоносителя I контура БР сплавов KРb и KВі позволит достичь приемлемых значений ПЭР ($P_{\text{ЭР}p} < \beta$, $P_{\text{ЭР}ц} < \beta$) в традиционных компоновках БР при одновременном безопасном завершении ряда наиболее опасных аварийных ситуаций из числа ATWS.

Теплоносители на основе сплавов калия и тяжелого металла позволяют увеличить мощность РУ при приемлемых значениях ПЭР и обеспечить высокий уровень естественной безопасности таких реакторов.

С точки зрения минимизации ПЭР при ограничениях для функционалов безопасности трудно отдать предпочтение какому-либо из рассмотренных теплоносителей.

БР, охлаждаемый сплавом калия и висмута обладает худшей самозащищенностью от аварий типа LOF WS, TOP WS и LOHS WS и лучшей — от процессов OVC WS. В РУ, охлаждаемых сплавом K-Pb аварийные ситуации типа OVC WS потенциально более опасны из-за высокой температуры замерзания теплоносителя. Однако при оптимальном выборе вектора управления такой недостаток не является принципиальным, т.к. полученные компоновки с K-Pb-охлаждением обладают свойством внутренней самозащищенности даже от гипотетических аварий, из числа OVC WS (инициированных, например, значительным увеличением расхода в I контуре при переводе ГЦН на повышенную производительность или подключением «холодной» петли с температурой, близкой к температуре замерзания теплоносителя.

Список литературы

1. Коллиер Дж., Хьюитт Дж. Введение в ядерную энергетику (пер. с англ.). -М.: Энергоатомиздат, 1989.

2. 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.

3. Кузьмина А.М., Окунев В.С. Программно-методическое обеспечение для решения задач оптимизации компоновок ядерных реакторов нового поколения // Известия РАН. Энергетика. - 1996. - №5. - С. 66-74.
4. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. - М.: Атомиздат, 1976.
5. Picard E., Noiton J., Plitz H. et.al. High Plutonium Content Oxide Fuel for Pu Burning in Fast Reactors. CAPRA Irradiation Programme and First in Pire Experimental Results // Proc.: «Global'97». - 1997. - V.1. - P.538-534.

Поступила в редакцию 6.07.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.566

Calculation of the Resource Performances of Equipment under Nonlinear Effects of Degradation Processes \ O.M. Gulina, N.L. Sal'nikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 5 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 4 titles.

The method of nonlinear summation of damages for calculation of the resource performances of equipment working under corrosion and the change of modes of operation conditions is developed. Parameter describing the process of degradation of a material under these conditions is introduced, and the equation for estimation of this parameter is obtained. For the solution of the problem the statistics on failures of equipment and the dependence of time before failure from parameters of medium and performances of a material is utilized.

УДК 620.179.16

Ultrasonic Method of Control of Stressed State of a Metal for Technological Channels of RBMK-type Nuclear Reactors on the Basis of Acousto-elasticity Effect \ M.A. Trofimov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 9 titles.

The analysis of theoretical investigations devoted to the acoustic elasticity effect is carried out. Modules of the second and the third order and their quantitative assessments are considered. On the basis of the analysis results the theoretical basing of the control method of stressed state for the metal of technological channels of RBMK-type nuclear reactors is proposed.

УДК 62-762.6: 62-13.621.318

Magnetic End Sealing \ Jan Fidler; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 4 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, titles.

End sealing of rotated heat installations, such as steam turbines, used both for classical heat power stations and for NPPs are very important from the point of view of providing the tight and reliability of equipment. To secure the sealing between the rotors are usually used the labyrinth noncontact sealings. Besides the classical noncontact and contact sealings tested by long-lived operational experience, the magnetic end sealings with the powder seal have been developed. However, the field of their applicability is restricted. The opportunities of usage this sealings are discussed in the paper.

УДК 620.179.1: 621.039.004.58

Calculation of Optimal Travel Velocity of a Transducer during Nondestructive Control of NPP's Lengthy Objects \ V.V. Chegodaev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 3 pages, 1 illustration. – References, 3 titles.

The calculation of optimum velocity based on the main criteria of optimization of travel velocity of a transducer (in particular minimization of the control time and parameters of minimal defects) are given. The basing of the calculation using the V.A. Kotelnikov theorem is given. The expression for evaluation of the maximal travel velocity of the transducer is obtained and the example of calculation is given.

УДК 621.039.526

Optimization of the Characteristics of Inherent Self-Protection of Fast Reactors Cooled Potassium-Heavy Metal Alloys \ A.M. Kuzmin, V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 9 pages, 5 tables. – References, 5 titles.

Some optimal inherent safety characteristics of LMFRs cores cooled with K-Pb and K-Bi alloys are analysed and presented in this paper. The core concept is based on the BN-800

and Superphenix design concept fuelled with UN-PuN. These results can be useful for the design of new generation of nuclear reactors.

УДК 621.039.514.4

Tests of Digital Reactimeter with 15 Groups of Delayed Neutrons in Experiments on ZPR \ Yu.V. Volkov, T.G. Petrosov, D.A. Klinov, V.F. Ukraintsev, Ya.V. Slemenitchs, M.Moniri; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 10 pages, 5 illustrations, 5 tables. – References, 2 titles.

The mathematical model of the reactimeter for low power heavy water reactor with using of 15 groups of delayed neutrons is described. Realization of this model on the personal computer in the on-line option is also described. Results of the reactimeter testing and improving its operating regimes by using a signals filter and different delayed neutron data sets are presented.

УДК 536.248: 532.5: 621.039.52

Hydrodynamics and Heat Generation in a Liquid Vertical Eutectic Jet as a Target for the Intense Neutron Source \ E.F.Avdeev, S.L.Dorokhovitch; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.

As the target of high-power spallation neutron source the vertical jet of melted lead-bismuth eutectics directed towards to the beam of protons is considered. Locking up vacuum chamber of the accelerator is offered to be realized using the supersonic jet of an inert gas. The computational estimations of gas leakage to the vacuum chamber are given. The analytical solution of a magnetohydrodynamic task and the determination of jet borders using approximation of flow is given. The thermal power of the target, distribution of temperature along the height of the jet and the neutron yield for choosed parameters of protons beam are calculated.

УДК 536.242

On the Basic Regularities of Crisis of Heat Exchange in Water Cooled Channels \ V.P. Bobkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages. – References, 14 titles.

The regularities for critical heat flows in channels cooled with boiling water are discribed. Accent is put on the solution of a problem of influence of various factors on crisis in complex channels. The developed semiempirical model for treating critical heat flows in channels is used. The detected obtained have allowed to receive new approaches to prediction of critical heat fluxes in channels.

УДК: 621. 039. 534.63

Some results of Experimental Studies of Evaporation-cooled Reactor Fuel Rod Operation Modes in Single-rod Three-circuit Model \ V.N. Bogomolov, V.N. Lopatinsky, V.N. Zamiussky, V.M. Ryaby; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 6 titles.

Some results of experimental studies on fuel rod heat removal obtained on physical three-circuit single-rod model which simulated evaporation-cooled reactor cooling system with sodium as a coolant are presented in this work. They give new insight into the problems of designing of sodium reactor installations with evaporation cooling.

УДК 546.718:621.039.7:539.174

Ruthenium as a 99Tc Transmutation Product: Necessary Separation Factor for Use \ A.A. Kozar, V.F. Peretroukhin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 10 pages, 3 illustrations. – References, 26 titles.

The process of preparation of stable ruthenium as platinum group metal by 99Tc transmutation is considered. On the basis of the analysis of parasitic capture of neutrons in targets it is shown