

О ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ, ОХЛАЖДАЕМЫХ СПЛАВОМ Na-Pb

А.М. Кузьмин, В.С. Окунев, А.Н. Шмелев

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



Анализируется возможность применения сплава Na-Pb в качестве теплоносителя быстрых реакторов. Приведены некоторые физические характеристики и минимальный коэффициент реактивности, полученные для реактора БН-800.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие безопасной ядерной энергетики требует поиска новых технических решений и разработки новых концепций перспективных реакторов, в том числе на быстрых нейтронах (БР). Привлекает универсальность БР с точки зрения их потенциальных возможностей: наработчиков в отдаленной перспективе и выжигателей младших актинидов - в ближайшем будущем. В первом случае речь идет о серийном вводе БР, во втором - о строительстве относительно малого количества реакторных установок (РУ) специального назначения. На сегодняшний день в качестве реалистических в ближайшем и отдаленном будущем рассматриваются две концепции БР: с натриевым и свинцовым охлаждением. Технология использования натриевого теплоносителя хорошо отработана. Концепция БР со свинцовым охлаждением (БРС) основана на отработанной технологии свинцово-висмутового теплоносителя отечественных подводных лодок [1].

Обе концепции имеют преимущества и недостатки (табл.1). В связи с этим возникла проблема поиска теплоносителя, лишенного недостатков натрия и свинца. Идея «компромиссного» варианта - использования бинарного (двухкомпонентного) сплава натрия со свинцом в качестве теплоносителя БР - возможно позволила бы объединить преимущества натрия и свинца и устранить ряд существенных недостатков, присущих РУ с охлаждением чистым веществом (Na или Pb).

Необходимо отметить, что свинец находится в жидком (рабочем) состоянии в широком диапазоне температур 600-1999 К (для натрия диапазон значительно уже - 371-1156 К). Однако таким преимуществом трудно воспользоваться, т.к. этот диапазон для свинца смещен в область температур, намного превышающих температуру плавления оболочек твэлов (рис.1). Таким образом, рабочий интервал температур, соответствующий РУ со свинцовым охлаждением активной зоны (отмечен штриховкой на рис.1), значительно уже, чем у реакторов типа БН. Кроме того, для РУ типа БРС потенциально опасен аварийный режим типа OVC (захолаживание теплоносителя I контура), который может реализоваться при переводе ГЦН на повышенную производительность или подключении резервной («холодной») петли.

© А.М. Кузьмин, В.С. Окунев, А.Н. Шмелев, 2000

Таблица 1

Некоторые достоинства и недостатки натриевого и свинцового теплоносителей

Теплоноситель	Преимущества	Недостатки
Натрий	<ul style="list-style-type: none"> - эффективный теплоотвод; - низкая температура плавления (исключение аварий типа OVC); 	<ul style="list-style-type: none"> - высокая химическая активность (возможность потери теплоносителя в результате натриевого пожара, взрывоопасность при взаимодействии с воздухом и водой)
Свинец	<ul style="list-style-type: none"> - не горит; - взрывобезопасен; - замерзает при течи корпуса реактора вследствие высокой температуры плавления (исключение аварии типа LOCA); - высокая температура кипения, исключение кипения теплоносителя практически при любых аварийных ситуациях (исключение аварии типа LOCA в результате кипения) 	<ul style="list-style-type: none"> - плохой теплоотвод; - высокая коррозионная и эрозийная активность; - большие затраты мощности на прокачку; - большие размеры активной зоны, большие топливные загрузки (проигрыш в экономических характеристиках: капитальных затратах и топливной составляющей); - опасность аварии OVC вследствие высокой температуры плавления

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИНАРНОГО СПЛАВА NaPb ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ БР

Основные преимущества использования сплава NaPb по сравнению с натриевым теплоносителем следующие.

Во-первых, меньшая химическая активность сплава по сравнению с чистым натрием (взаимодействие натрия с воздухом и водой), возможно, позволит снизить вероятность пожаров и надеяться на исключение потери теплоносителя (авария типа LOCA) в результате его сгорания. Авторами работы [2] показано, что сплавы натрия с другими металлами, например, калием и цезием, пожаробезопасны при определенных концентрациях составляющих. При температурах 300-1000 К такие сплавы способны окисляться на воздухе без интенсивного выделения аэрозолей и заметного повышения температуры [2]. Как известно, чистые металлы - Na, K и Cs - пожароопасны. Вывод о невоспламеняемости сплавов на основе Na, K и Cs позволяет надеяться, что для бинарных сплавов NaPb также существует оптимальное соотношение концентраций его компонентов, позволяющее избежать горения теплоносителя, тем более что чистый жидкий свинец не горит в рассматриваемом диапазоне температур.

Во-вторых, даже незначительное повышение температуры кипения теплоносителя (увеличение температурного запаса до кипения) при увеличении доли свинца в сплаве NaPb благоприятно сказывается на развитии аварийных режимов с нарушением принудительного охлаждения активной зоны (LOF - нарушение принудительной циркуляции теплоносителя I контура, LOHS - нарушение теплоотвода от I контура) и, кроме того, способствует снижению вероятности реализации положительного пустотного эффекта реактивности (ПЭР) при кипении теплоносителя.

Меньшее упругое замедление нейтронов позволило бы увеличить объемную долю теплоносителя и снизить скорость его циркуляции через активную зону, т.е. улучшить теплогидравлику активной зоны и, что особенно важно, увеличить роль естественной циркуляции.

Небольшое содержание свинца в сплаве позволит избежать значительного ухудшения эффективности теплоотвода, повышения затрат мощности на прокачку теплоносителя, ударных нагрузок, а также увеличения размеров активной зоны. Последнее обстоятельство благоприятствует возможности использования сплава NaPb в качестве теплоносителя БР, сконструированных на основе существующих РУ или проектов, например, БН-800 практически без изменения мощности реактора и размеров активной зоны.

Что касается экономических характеристик, то, с одной стороны, свинец приблизительно в 1,5 раза дешевле натрия, с другой - большое содержание свинца в сплаве потребует увеличения размеров активной зоны (проигрыш в капитальных затратах) и увеличения топливной загрузки (проигрыш в топливной составляющей расчетных затрат).

И, наконец, теплоноситель на основе бинарного сплава натрия со свинцом обладает более низкой по сравнению с чистым натрием замедляющей способностью и меньшим сечением захвата нейтронов (благоприятствует улучшению брдинговых характеристик).

Одна из проблем использования свинцового охлаждения - большая по сравнению с натриевым эрозия оболочек твэлов и конструкционных материалов в потоке теплоносителя, а также большие затраты мощности на прокачку. Небольшое содержание свинца в сплаве NaPb и снижение скорости циркуляции теплоносителя возможно позволит уменьшить подобные неприятности.

Главная проблема использования теплоносителя NaPb с большим содержанием свинца - коррозия конструкционных сталей. Исследования, проведенные авторами работ [1,3], свидетельствуют о высокой коррозионной активности теплоносителей на основе тяжелых металлов (Pb, Bi). Авторами проектов БР со свинцовым охлаждением [1] сделан вывод о разрешимости проблемы коррозии в жидком свинце за счет поддержания оптимального кислородного режима. Однако присутствие кислорода в натрии нежелательно.

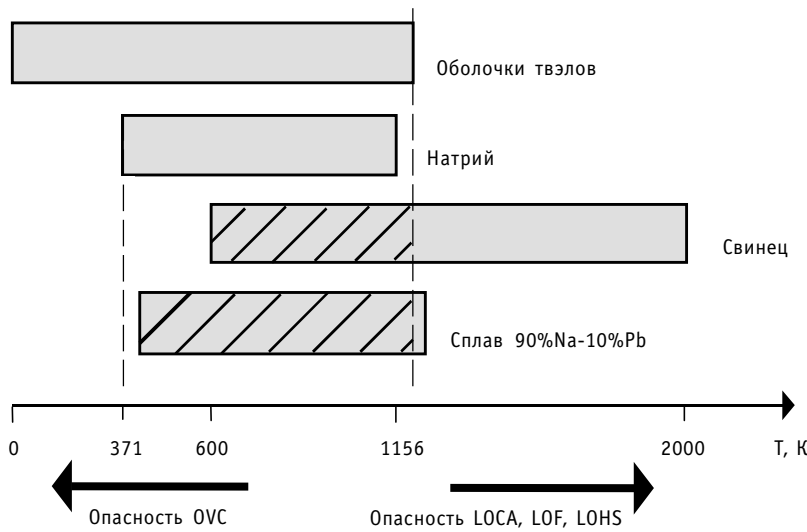


Рис.1. Диапазон рабочей температуры БР

Существуют другие способы борьбы с коррозией. В работе [3] представлены результаты исследования возможности повышения коррозионной стойкости материалов БР в жидком висмуте. Эти возможности могут быть реализованы и в БР, охлаждаемых жидким свинцом. Решение проблемы коррозии в жидком свинце можно обеспечить путем

- отказа от использования хромо-никелевых сталей (например, сталь Х16Н15М3Б) и высоконикелевых сплавов (инконель, нимоник и др. с содержанием Ni 40-52%), применяемых в реакторах типа БН; т.к. несмотря на хорошие механические свойства при высокой температуре нержавеющие стали и сплавы, содержащие никель, не могут быть использованы из-за высокой растворимости никеля в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе;

- использования тугоплавких металлов (тантал, ниобий, вольфрам, молибден), обладающих высокой коррозионной стойкостью в жидких свинце и висмуте.

При относительно невысоких температурах (соответствующих режиму работы БР на номинальной мощности) хорошей коррозионной стойкостью обладают углеродистые стали [3]. Повышению коррозионной стойкости способствуют графитовые покрытия или покрытия ZrC [3]. Препятствуют коррозии циркониевые, титановые, магниевые или хромовые добавки к висмуту [3].

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАТРИЕВО-СВИНЦОВОГО СПЛАВА В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Проанализируем возможность использования сплава NaPb для охлаждения РУ.

Натрий и свинец не образуют эвтектический сплав. Температура плавления сплава NaPb повышается при увеличении содержания свинца от 0 до 80% (по массе) и снижается при дальнейшем увеличении доли свинца от 80 до 100% (рис.2). При массовой доле натрия менее 50% температура плавления сплава превышает соответствующее значение для чистого свинца.

Плотность и теплоемкость сплава можно рассчитать, используя правило аддитивности (приближение Неймана-Коппа для определения теплоемкости) [5].

Расчет некоторых теплофизических характеристик сплава (вязкость, теплопроводность) затруднен тем, что натрий и свинец относятся к различным группам термодинамического подобию [5].

Температура кипения бинарного сплава $T_{\text{кип}}^{\text{NaPb}}$ при небольшом содержании свинца может быть рассчитана, например, на основании закона Рауля [5], где натрий рассматривается как основная составляющая сплава, а свинец - в качестве примеси:

$$T_{\text{кип}}^{\text{NaPb}} = T_{\text{кип}}^{\text{Na}} + 1000 K_3 M_{\text{Na}} / (A_{\text{Pb}} M_{\text{Pb}}), \quad (1)$$

где $T_{\text{кип}}^{\text{Na}}$ - температура кипения чистого натрия; $K_3 = 2,609$ - эбуллиоскопическая постоянная; M_{Na} , M_{Pb} - масса натрия и свинца в сплаве; A_{Pb} - атомная масса свинца.

Формула (1) тестировалась авторами на примере теплоносителя 25%Na-75%K (в процентах указано массовое содержание). Получено, что температура кипения этого сплава $T_{\text{кип}}^{\text{NaK}} = 1056,7\text{K}$ совпадает с приведенным в [5] $T_{\text{кип}}^{\text{NaK}} = 1057\text{K}$. Таким образом, соотношение (1) позволяет определить температуру кипения сплава даже при большом содержании примеси (в данном случае 25% натрия).

Для сплава 90%Na-10%Pb из соотношения (1) получаем, что $T_{\text{кип}}^{\text{NaPb}}$ превышает $T_{\text{кип}}^{\text{Na}}$ на 1,4 K и составляет 1157,4 K. Таким образом, при небольшом добавлении свинца в натрий температура кипения сплава NaPb повышается незначительно и вряд ли может рассматриваться в качестве серьезного преимущества использования сплава NaPb (по сравнению с чистым натрием) в качестве теплоносителя БР.

Заметим, что соотношение (1) для определения $T_{\text{кип}}^{\text{NaPb}}$ может давать значительную погрешность вследствие большой разницы атомных масс натрия и свинца. Грубая оценка при 10% (по массе) содержании свинца с помощью правила аддитивности дает $T_{\text{кип}}^{\text{NaPb}} \approx 1243 \text{ K}$ (для сравнения температура кипения сплава 25%Na-75%K, рассчитанная с помощью правила аддитивности, $T_{\text{кип}}^{\text{NaK}} \approx 1061 \text{ K}$).

БЕЗОПАСНОСТЬ БР, ОХЛАЖДАЕМЫХ СПЛАВОМ NaPb

Одним из важнейших факторов безопасности РУ является их самозащищенность от тяжелых аварий. БР со свинцовым охлаждением обладает значительно более высоким уровнем внутренней самозащищенности от аварий (в том числе типа ATWS - с отказом аварийной защиты) по сравнению с традиционными компоновками РУ типа БН. Разумно предположить, что БР, охлаждаемые бинарным сплавом натрия со свинцом, с точки зрения возможности обеспечения внутренней самозащищенности и достижения естественной безопасности, занимают промежуточное положение между РУ типа БН и БРС.

Уровень естественной безопасности в значительной степени зависит от обратных реактивных связей - температурных эффектов и коэффициентов реактивности. Важнейшим критерием самозащищенности от аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА) является ПЭР. В традиционных компоновках БР средней и большой мощности ПЭР, как правило, положителен и в несколько раз превышает значение эффективной доли β запаздывающих нейтронов. В проектах перспективных БР вероятность потери теплоносителя в результате его утечки пренебрежимо мала, и ПЭР может реализоваться лишь при выгорании натрия при пожаре или при появлении паровых пузырей в результате кипения. Известно, что ПЭР имеет сильную пространственную зависимость. Так, при удалении теплоносителя из центра активной зоны традиционной компоновки БР, как правило, возникает большая положительная реактивность, а при удалении из периферийных областей - отрицательная. Это замечание справедливо для РУ типа как БН, так и БРС. Поэтому первоочередной интерес представляет минимизация ПЭР, который возникает при опустошении центральной зоны реактора.

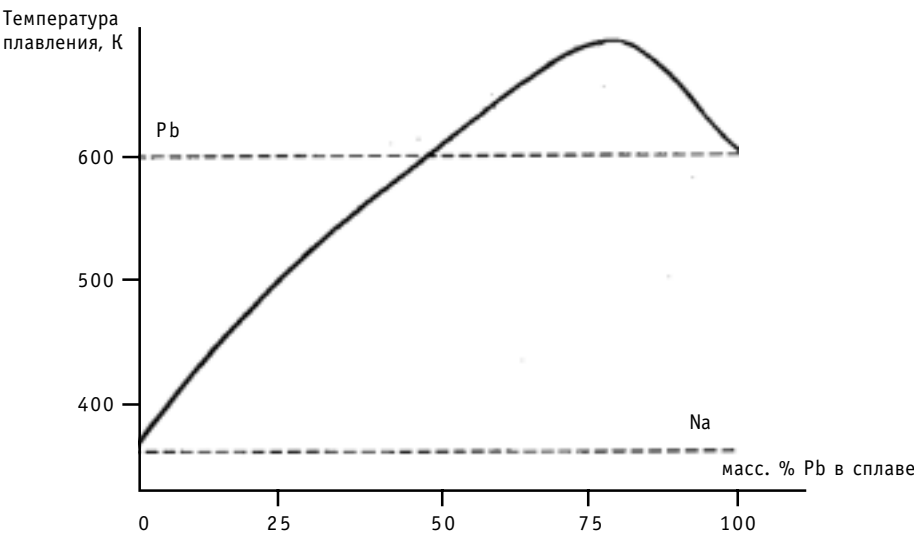


Рис.2. Зависимость температуры плавления сплава NaPb от массового содержания свинца (по материалам [4]); пунктирные линии соответствуют температурам плавления чистого свинца и натрия

Существуют различные потенциальные возможности снижения ПЭР. Практически все они основаны на увеличении утечки нейтронов. (Спектральный компонент ПЭР - за счет уменьшения доли нейтронного потока при низких энергиях - величина достаточно консервативная для выбранного вида топлива [6]). Главные способы снижения ПЭР следующие:

- изменение геометрических характеристик компоновки (увеличение утечки нейтронов за счет более плоской активной зоны);
- изменение состава активной зоны с целью увеличения утечки нейтронов путем перехода к гетерогенным компоновкам с аксиальными слоями (внутренними зонами воспроизводства) из воспроизводящего материала или путем создания полости над активной зоной;
- увеличение содержания свинца в сплаве NaPb с целью уменьшения сечения захвата нейтронов теплоносителем и эффекта замедления;
- и, наконец, один из возможных способов - замена природного свинца в бинарном сплаве изотопом ^{208}Pb [7].

Одним из существенных факторов, определяющих уровень внутренней самозащищенности, является доплеровский коэффициент реактивности. Как известно, величина доплеровской составляющей эффекта реактивности в БРС значительно ниже по сравнению с реакторами типа БН [1]. Это объясняется низкой замедляющей способностью свинца, что приводит к меньшей доле резонансных нейтронов в спектре БРС. В БР, охлаждаемых сплавом NaPb, доплеровский коэффициент реактивности принимает промежуточное значение и уменьшается по мере увеличения доли свинца в сплаве (табл. 2). В аварийных режимах работы реактора не менее важна минимизация плотностной составляющей температурного коэффициента реактивности, связанной с изменением плотности теплоносителя вследствие термического расширения. Значения плотностного коэффициента реактивности для БР с натриево-свинцовым охлаждением приведены в табл.2.

КОМПОНОВКИ БР, ОХЛАЖДАЕМЫХ НАТРИЕВО-СВИНЦОВЫМ СПЛАВОМ

С помощью расчетно-оптимизационного комплекса DRACON-M [8] получены различные компоновки энергетических БР с натриево-свинцовым охлаждением активной зоны (табл.2). Содержание свинца в бинарном сплаве варьировалось от 0 до 20% (по массе). Увеличение доли свинца приводит к повышению температуры затвердевания сплава, что нежелательно с точки зрения обеспечения внутренней самозащищенности РУ от аварии OVC (захолаживание теплоносителя I контура). В качестве исходной принята традиционная компоновка быстрого бридера (табл.2, колонка, соответствующая "0% свинца") со смешанным нитридным топливом и натриевым теплоносителем, полученная в результате решения задачи минимизации ПЭР при осушении центральной зоны реактора (зоны малого обогащения и верхнего торцевого экрана над ней) с ограничениями для функционалов безопасности в аварийной ситуации (LOF+TOP)WS, инициируемой одновременным прекращением принудительной циркуляции теплоносителя в I контуре и вводом положительной реактивности с отказом аварийной защиты [9].

Рассматривались варианты, полученные при замене натриевого теплоносителя сплавом NaPb с массовым содержанием свинца 5, 10 и 20%. Предполагается, что компоновки БР содержат две активные зоны различного обогащения, окруженные боковым и торцевыми экранами. Одно из основных требований (ограничений задачи) - соответствие мощности и внешних размеров активной зоны проектным для БН-800. Твэлы размещены в узлах треугольной решетки и дистанцио-

нированы проволочной навивкой (однозаходной в активной зоне, трехзаходной в боковом экране). Условие минимального запаса реактивности на выгорание моделируется ограничением для коэффициента воспроизводства активной зоны $K_{BA} \approx 1$. Неравномерность энерговыделения учитывается с помощью ограничения $k_f < 1,6$. Ограничения для K_{BA} и k_f выполнены для всех вариантов табл.2. Для сохранения бридинговых характеристик требовалось выполнение условия

$$\Delta R_{БЭ} \geq \Delta R_{БЭ}^{(0)}, \Delta H_{ТЭ} \geq \Delta H_{ТЭ}^{(0)}, \tag{2}$$

где $\Delta R_{БЭ}$ и $\Delta H_{ТЭ}$ - толщины бокового и торцевого экранов полученных компоновок реактора; $\Delta R_{БЭ}^{(0)}, \Delta H_{ТЭ}^{(0)}$ - значения, соответствующие исходному варианту с натриевым теплоносителем.

Таблица 2

Компоновки БР, охлаждаемых сплавом NaPb

Параметры компоновки и некоторые функционалы	Содержание свинца в сплаве NaPb, % по массе				
	0	5*	10*	20*	10**
Обогащение топлива в активной зоне, %	13,3/14,0	12,9/14,2	13,6/13,9	13,8/14,0	13,5/13,8
Диаметр топливной таблетки (в твэлах активной зоны), мм	7,25	7,12	6,69	6,72	8,99
Относительный шаг решетки твэлов активной зоны	1,21	1,15	1,15	1,15	1,18/1,15
Радиальные размеры активных зон, см	100,0/74,8	94,4/64,3	92,0/66,7	91,9/66,8	93,1/90,5
Высота активной зоны, см	66,4	61,4	61,6	61,6	26,0
Массовый расход теплоносителя, кг/(м ² с)	3267/4054	7044	8582	13790	5950/8531
ПЭР (осушение центральной активной зоны), % Δk/k	0,8143	0,9713	1,4421	2,0160	0,3070
ПЭР (осушение реактора), % Δk/k	-0,9133	-0,2510	-0,0955	0,7300	-0,3647
Коэффициенты реактивности, 10 ⁶ (Δk/k)/K:	-1,82/	-1,75/	-2,30/	-2,72/	-1,14/
	-2,66	-3,30	-3,46	-4,46	-4,19
	плотностной	плотностной	плотностной	плотностной	плотностной
	1,74/	1,27/	1,53/	0,83/	0,56/
	0,65	0,44	-0,09	-0,86	0,39
Максимальная температура в номинальном режиме, К:					
- топлива;	1436	1471/1549	1476/1467	1449/1459	1597/1663
- оболочек твэлов	900/862	830/847	822/819	781/782	763/749

Примечание: * размеры экранов не изменялись в процессе оптимизации;
** задача без ограничений (2); через косую черту приведены значения, соответствующие зонам малого и большого обогащения

Как и ожидалось, при замене натрия сплавом NaPb снижается эффективный коэффициент $k_{\text{эфф}}$ размножения нейтронов (т.е. реактор становится подкритическим - $k_{\text{эфф}} < 1$). Для выполнения условия $k_{\text{эфф}} = 1$ потребовалось изменить вектор управления (обогащение топлива, параметры решетки, объемные доли компонентов активной зоны и др.). Этим объясняются отличия компоновок с натриево-свинцовым охлаждением активной зоны от исходной с натриевым.

Переход к натриево-свинцовому теплоносителю требует увеличения размеров активной зоны по сравнению с реакторами типа БН. С увеличением содержания свинца в теплоносителе необходимо увеличивать и размеры активной зоны, однако ограничения вида

$$\sum_i \Delta R_i = R_0, \quad \sum_j \Delta H_j = H_0, \quad (3)$$

где ΔR_i , ΔH_j - радиальные и аксиальные размеры зон полученных компоновок; R_0 , H_0 - размеры, соответствующие исходному варианту с натриевым теплоносителем и проектным для БН-800, не позволяют этого сделать, в результате чего при решении оптимизационной задачи (минимизации ПЭР) значение относительного шага h решетки твэлов выходит на границу h_{min} , что соответствует минимальной топливной загрузке, повышает линейную нагрузку на твэлы и КВ, уменьшает долю естественной циркуляции и, следовательно, способствует ухудшению самозащищенности РУ. Такие ограничения препятствуют реализации более плотной активной зоны и снижению ПЭР. По мере увеличения свинца в теплоносителе эта тенденция усиливается, что приводит к ухудшению критерия оптимальности - ПЭР. Причем зависимость ПЭР при осушении центральной активной зоны БР (малого обогащения и экрана над ней) и при осушении всего реактора от массового содержания свинца в сплаве NaPb близка к линейной (рис.3).

Отметим, что снижение ПЭР до значения, не превышающего β , возможно при увеличении уплотнения активной зоны. Выполнения условия $\text{ПЭР} < \beta$ (табл.2) можно достичь при увеличении радиальных размеров активной зоны за счет уменьшения толщины бокового экрана (пара-

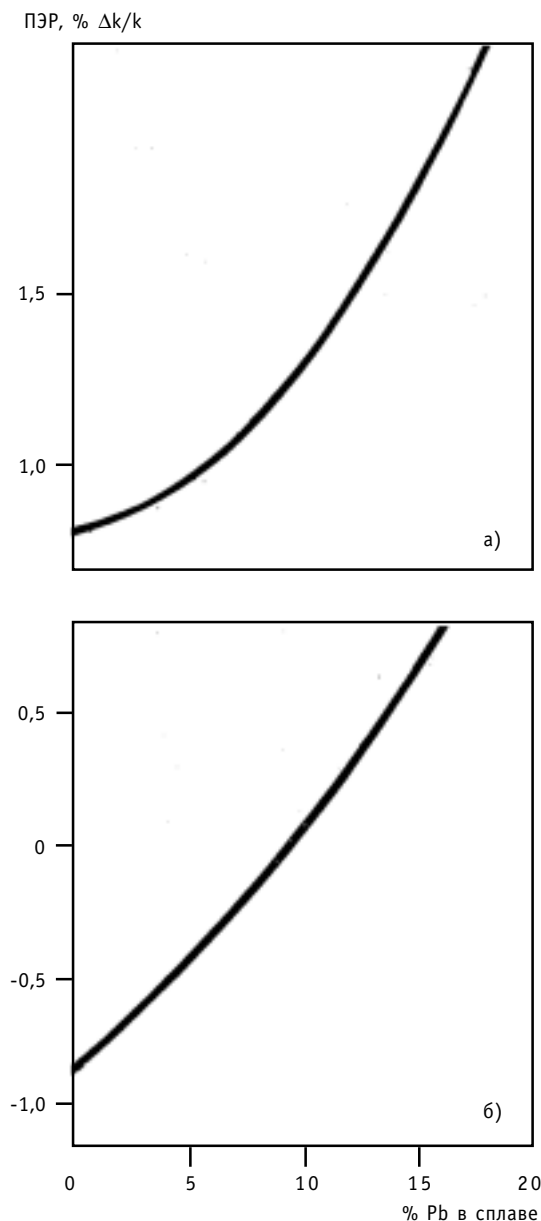


Рис.3. Зависимость ПЭР от массового содержания свинца в сплаве NaPb: а) осушение центральной зоны (малого обогащения и экрана над ней); б) осушение всего реактора)

метры ΔR_i , ΔH_j изменяются в процессе оптимизации) и, следовательно, бридинговых характеристик. При этом полученная компоновка по размерам также будет совместима с БН-800, т.е. выполнены ограничения (3), а ограничения (2) отсутствуют. При дальнейшем уменьшении толщины бокового экрана (что позволит увеличить шаг решетки твэлов) можно достичь отрицательных значений ПЭР, проявляющегося при осушении центральной зоны реактора.

Таким образом, вариант компоновки БР с натриево-свинцовым теплоносителем, полученный без ограничений (2), предпочтителен для уменьшения ПЭР.

ВЫВОДЫ

При использовании натриево-свинцового теплоносителя для охлаждения активной зоны РУ типа БН, возможно, возникнут проблемы, связанные с высокой по сравнению с чистым натрием коррозионной активностью сплава NaPb и большим ПЭР.

Для решения первой проблемы потребуется отказаться от использования никелевых сталей и сплавов в пользу применения материалов, коррозионно-стойких в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе, или специальных добавок [3].

Проблема ПЭР может быть решена при отказе от “привязки” к геометрическим характеристикам активной зоны БН-800, например, при увеличении радиуса активной зоны по сравнению с проектным значением и шага решетки твэлов. Тенденция снижения ПЭР проявляется при отказе от ограничений (2) задачи оптимального проектирования (табл.2). Таким образом, возможности использования теплоносителя на основе бинарного сплава NaPb с точки зрения снижения ПЭР могут быть реализованы при отказе от требования высоких бридинговых характеристик. Исключение воспроизводящих экранов в конструкции РУ, например, при проектировании БР-выжигателей младших актинидов, позволит значительно снизить ПЭР по сравнению с традиционными компоновками бридеров.

Решению проблем, связанных с эрозией и более высокими затратами мощности на прокачку теплоносителя, может способствовать, например, снижение скорости циркуляции сплава NaPb по сравнению со скоростью чистого натрия.

Выигрыш в повышении температуры плавления сплава NaPb по сравнению с чистым натрием практически не заметен при небольшом содержании свинца (до 20% по массе). В то же время температура затвердевания сплава NaPb выше по сравнению с натрием, что повышает вероятность затвердевания теплоносителя в аварийных режимах типа OVC.

Итак, проектирование БР с натриево-свинцовым охлаждением активной зоны должно проводиться без “привязки” к проектным значениям РУ типа БН. Это позволит воспользоваться некоторыми преимуществами сплава NaPb по сравнению с чистым натрием или свинцом.

В заключение отметим, что для окончательного выбора теплоносителя БР нового поколения необходимы более глубокие исследования. В настоящее время свойства сплава NaPb изучены недостаточно хорошо. При его использовании в качестве теплоносителя БР возможны серьезные неприятности, связанные с несовместимостью компонентов сплава (несмешиваемость, плохая растворимость компонентов, формирование ассоциатов — устойчивых соединений с высокой температурой плавления и т.п.) и потенциальной возможностью объединения недостатков чистых металлов в сплаве (повышение температуры затвердевания теплоносителя NaPb по сравнению с чистыми металлами, проблема коррозии и др.). Более детальный анализ применимости сплава NaPb в качестве теплоносителя БР — предмет дальнейших исследований.

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. Казачковский О.Д., Старков О.В., Кочеткова Е.А. и др. Некоторые особенности сплавов системы натрий-калий-цезий // Атомная энергия. - 1992. - Т.73. - Вып.6. - С.500-502.
3. Lane J. Fluid Fuel Reactors. Addison Wesley, 1958. - P.743-747.
4. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мелихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьинский О.С. Жидкометаллические теплоносители. - М.: Атомиздат, 1976.
6. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A. et al. Radiowaste Transmutation in Nuclear Reactors // Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation. - IAEA, Vienna, 1993. - P.77-86.
8. Kuzmin A.M., Okunev V.S., Morin D.V., Novikov A.E. DRACON-M Modernized Computer Code for Investigation with Account of Safety Functionals. - В сб.: Проблемы безопасности ядерно-энергетических установок: Тезисы докладов IX семинара по проблемам физики реакторов (Москва, 4-8 сентября 1995 г.). - М.: МИФИ, 1995. - Т.1. - С.208-209.
9. Кузьмина А.М., Окунев В.С. Некоторые тенденции изменения физических характеристик быстрых реакторов при оптимизации с ограничениями на функционалы безопасности // Атомная энергия. - 1996. - Т.80. - Вып.6. - С.429-437.

Поступила в редакцию 29.11.99.

to $(\tau)^{0.5}$ and depends on the rate introducing of reactivity and is inversely proportional to the feedback reactivity.

УДК 519.688:539.172.12

Calculation of Energy Release in Lead Target Irradiated with High Energy Protons with the Help of "CASCADE/INPE" Code System \A. Yu. Konobeyev, M. Vecchi; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages, 5 illustrations, 1 table. – References, 13 titles.

The calculation of energy release has been performed with the help of CASCADE/INPE code system for lead target irradiated with high energy protons. The comparison with available experimental data has been made. The results show that the main contribution to the energy release for the lead target is due to ionization losses of primary protons, ionization losses of secondary charged particles produced in nuclear reactions, photon interactions and light fragment emission from excited nuclei.

УДК 621.039.526

On Physical Characteristics of the Fast Reactors with the Na-Pb Coolant \A.M. Kuzmin, V.S. Okunev, A.N. Shmelev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 9 titles.

The possibility of implementation of the Na-Pb alloy as a coolant of fast reactors is analysed. Some physical characteristics and minimal void reactivity coefficient received for the BN-800 reactor are given.

УДК 621.039.526

Research on the Characteristics of Inherent Self-Protection of the Fast Reactor with the Sodium-Lead Coolant \A.M. Kuzmin, V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 3 illustrations, 3 tables. – References, 3 titles.

Some optimal inherent safety characteristics of LMFRs cores cooled with an alloy of sodium and lead, and ATWS analysis are presented in this paper. The core concept is based on the BN-800 design concept fuelled with UN-PuN. These results can be useful for the design of new generation of nuclear reactors.

УДК 621.039.526

Selection of Basic Parameters and Characteristics of a Perspective Fast Power Reactor with Sodium Coolant \V.I. Matveev, V.A. Eliseev, I.V. Malysheva; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 1 illustration, 4 tables. – References, 6 titles.

On the base of big experience of Russia in design and operation of fast power reactors the concept of new generation fast reactors is developed which meets all requirements on the inherent safety, high ecological compatibility of fuel cycle and the ability to natural uranium economy even at low breeding parameters.

УДК 621.039.526

The Possible Conceptual Framework and Optimization of Safety Characteristics of the LMFRs with Different Types of Fuels and Cooled with the Na-K-Cs-alloy \V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 3 tables. – References, 5 titles.

The layout of the LMFR with different types of fuels and cooling with the Na-K-Cs-alloy are discussed. The results are present of the solution of optimization problems with limitations for safety functionals characterizing an accident situations of ATWS types.

УДК 621.039.52.034.6

Thermodynamics and Kinetics of Interaction of Oxygen and Nickel Impurities in Lead-Bismuth Eutectic Alloy \B.A. Shmatko, A.E. Rusanov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 8 titles.