

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ, ОХЛАЖДАЕМЫХ СПЛАВАМИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

В.С. Окунев

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



Представлены результаты сравнительного анализа безопасности быстрых реакторов, охлаждаемых жидкими металлами и их сплавами. Сравниваются традиционные компоновки с минимальным (оптимальным) пустотным эффектом реактивности. Исследовались теплоносители трех групп: щелочные металлы и их сплавы, тяжелые металлы и их сплавы, сплавы щелочных металлов с тяжелыми.

Наиболее предпочтительны быстрые реакторы, охлаждаемые Pb, Bi и сплавом Pb-Bi. Менее предпочтительны компоновки, охлаждаемые щелочными металлами и их сплавами. Быстрые реакторы, охлаждаемые сплавами щелочных металлов с тяжелыми, занимают промежуточное положение по уровню самозащищенности.

ВВЕДЕНИЕ

Использование сплавов жидких металлов в качестве теплоносителя реактора на быстрых нейтронах (БР) позволяет регулировать, а значит, улучшать характеристики безопасности, надежности и экономичности. В статье представлены результаты сравнительного анализа безопасности БР, охлаждаемых жидкими металлами и их сплавами. Исследовались теплоносители трех групп: щелочные металлы и их сплавы, тяжелые металлы и их сплавы, сплавы щелочных металлов с тяжелыми.

Для выбора наиболее предпочтительного теплоносителя БР, а также для ранжирования различных теплоносителей на основе сплавов по степени предпочтительности с точки зрения максимизации внутренней самозащищенности установки от тяжелых аварий целесообразно сравнивать одинаковые компоновки, полученные в результате решения оптимизационных задач в одинаковой постановке: при едином критерии оптимальности, ограничениях для одних и тех же функционалов, при одинаковом выборе вектора управления. Предполагалось, что активная зона РУ содержит две подзоны со смешанным нитридным топливом различного обогащения (зоны малого и большого обогащения), которые окружены боковым и торцевыми экранами.

При решении задачи о влиянии выбранного теплоносителя на безопасность реактора на начальных этапах проектирования в качестве критерия оптимальности может рассматриваться один из функционалов безопасности, например, пустотный эффект реактивности (ПЭР). Поскольку ПЭР имеет сильную пространственную зависимость, в задачах учитывались два функционала: эффекты при осушении реактора (ПЭР_р) и центра

активной зоны — зоны малого обогащения и экрана над ней (ПЭР_ц). Сравнительный анализ безопасности БР, охлаждаемых сплавами жидких металлов, проводился для компоновок, полученных в результате решения классических вариационных задач на условный экстремум: задач поиска оптимального управления из области определения, при котором целевой функционал - ПЭР_ц достигает минимального значения и выполняются ограничения для ряда функционалов, определяющих надежную и безопасную работу БР. Функционалы надежности характеризуют работу реактора на номинальной мощности. К ним относятся температуры компонентов РУ, максимальная линейная нагрузка на твэлы, прочностные и другие характеристики. Функционалы безопасности – это экстремальные температуры, мощность и прочие характеристики в аварийных режимах типа ATWS (с отказом аварийной защиты). Кроме того, рассматривались ограничения $K_{BA} \approx 1$, $PЭР_p < \beta$ и др. В качестве управляющих параметров выбирались обогащение топлива, размеры зон реактора, диаметр топливной таблетки, шаг решетки твэлов, температура теплоносителя на входе в активную зону, расход в номинальном режиме, объемные доли материалов активной зоны и др.

Расчетные и оптимизационные исследования проведены с помощью программы DRACON-M [1], позволяющей рассматривать многозонные БР в двумерной цилиндрической геометрии. Аварийные процессы описываются в приближении точечной нейтронной кинетики с учетом обратной связи по средним температурам топлива и теплоносителя.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Внутреннюю самозащищенность БР, охлаждаемых различными теплоносителями, иллюстрирует табл.1. Приведена тепловая мощность реактора по отношению к РУ «Суперфеникс», если в качестве ограничений задачи рассматривалось условие совместимости полученной (оптимальной) компоновки по размерам активной зоны с «Суперфениксом», или по отношению к проектным для реактора БН-800, если компоновка совместима с ним по размерам. Условию внутренней самозащищенности от той или иной аварии в

Таблица 1
Внутренняя самозащищенность БР с различными теплоносителями

Теплоноситель	Na	Na-K-Cs	Na-K	Pb-Bi	Pb	Bi	Na-Pb	K-Pb	K-Bi	
		(эвтектика)					(10% тяжелого металла)			
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мощность РУ	0,5 ⁽¹⁾	0,5 ⁽¹⁾	1 ⁽²⁾	1,9 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾	1 ⁽²⁾	1 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾	1 ⁽²⁾
ПЭР при осушении										
– центра	~ β	> β	> β	< 0	< β	< 0	< β	~ β	~ β	> β
– реактора	< β	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	~ β	< β	< 0
Внутренняя самозащищенность от аварий типа «АТWS»										
LOF WS	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
LOHS WS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
TOP WS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
OVC WS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
(LOF+TOP+ +OVC) WS	+	–	–	+	+	+	+	+	–	+

Примечание. Указана мощность по отношению: ⁽¹⁾ к «Суперфениксу» (при размерах активной зоны, соответствующих «Суперфениксу»), ⁽²⁾ БН-800 (при размерах БН-800); знаками «плюс» и «минус» отмечено выполнение ограничений для функционалов безопасности: «+» — выполнено, «–» - нарушено. Каждый вариант представляет собой результат решения отдельной задачи оптимизации компоновки реактора (минимизации ПЭР_ц)

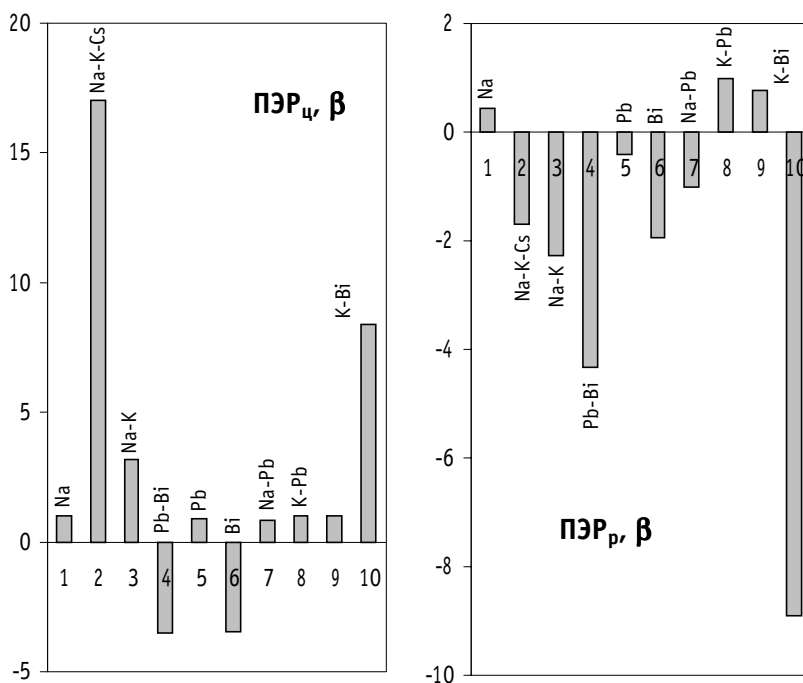


Рис. 1. ПЭР: по оси ординат отложены значения ПЭР/ β при осушении центральной зоны и всего реактора соответственно, по оси абсцисс на рис. 1-4 отложен номер варианта из табл. 1

табл.1 соответствует знак плюс, а нарушению хотя бы одного ограничения для какого-либо функционала безопасности - минус.

Для удобства сравнения результатов варианты компоновок БР в табл. 1 и на рис. 1-4 пронумерованы.

ПУСТОТНЫЙ ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОСТИ

Значение ПЭР, реализующегося при осушении центра активной зоны или всего реактора, указаны в табл. 1 по отношению к нулю, если они отрицательны, и по отношению к эффективной доле β запаздывающих нейтронов, если они положительны. Точные значения ПЭР (в единицах β) представлены на рис. 1 в виде гистограммы.

Как видно из табл. 1 и рис. 1, с точки зрения возможности достижения минимального ПЭР при осушении центра активной зоны реактора наиболее предпочтительны БР, охлаждаемые тяжелыми металлами и их сплавами.

Щелочные металлы и их сплавы менее предпочтительны - добиться приемлемого (не превышающего β) значения $PЭР_{ц}$, оставаясь в рамках традиционной компоновки, оказалось возможным только для БР, охлаждаемого натрием, и то при снижении мощности реактора в два раза. Это объясняется конфликтным характером основных требований и критериев, присутствующих в постановке оптимизационной задачи, в первую очередь, необходимостью одновременной минимизации ПЭР и выполнения ограничений для функционалов, определяющих внутреннюю самозащищенность от аварий с ухудшением условий теплоотвода. Причем при использовании теплоносителей с относительно низкой температурой кипения конфликт обостряется по мере уменьшения максимально допустимой температуры теплоносителя в процессах LOF WS (прекращение принудительной циркуляции теплоносителя первого контура с отказом аварийной защиты) или LOHS WS (прекращение теплоотвода от первого контура с отказом аварийной защиты). В этом случае, по сравнению с вариантами компоновок, охлаждаемых тяжелыми металлами и

их сплавами, низкая максимально допустимая температура теплоносителя по сути играет роль дополнительного ограничения, препятствующего минимизации ПЭР_ц (присутствие дополнительных ограничений не улучшает критерий оптимальности). Требование снижения максимальной температуры теплоносителя в аварийных режимах (сужающее область безопасных компоновок в пространстве управлений, внутри которой возможна минимизация ПЭР, и, следовательно, препятствующее снижению ПЭР) доминирует над эффектом ужесточения нейтронного спектра при использовании теплоносителя на основе более тяжелых элементов, чем натрий (способствующее снижению ПЭР). В результате этого ПЭР_ц для БР, охлаждаемых щелочным теплоносителем, максимален при использовании эвтектики Na-K-Cs (с температурой кипения 994 К), значительно ниже для РУ, охлаждаемой эвтектикой Na-K (1057 К), и еще ниже для БР с натриевым теплоносителем (1156 К), несмотря на наличие в сплавных теплоносителях более тяжелых, чем натрий, ядер цезия и калия.

Что касается БР, охлаждаемых сплавами щелочных металлов с тяжелыми, то даже при относительно малом (10%) содержании тяжелого металла удается обеспечить приемлемое значение ПЭР ($\text{ПЭР}_{\text{ц}} < \beta$), за исключением отдельных случаев, которые можно считать нехарактерными «флуктуациями» (табл. 1, рис. 1-4, вариант 10), что является определенной «платой» за повышение внутренней самозащищенности от аварий других типов. В целом БР с теплоносителями на основе сплавов щелочных металлов с тяжелыми по уровню внутренней самозащищенности от аварий типа LOCA WS (потеря теплоносителя с отказом аварийной защиты) занимают промежуточное положение между реакторами, охлаждаемыми тяжелым теплоносителем на основе свинца или висмута.

Большинство рассмотренных компоновок характеризуется отрицательным ПЭР при осушении всего реактора, а некоторые - небольшим (в пределах β) положительным эффектом. Поскольку функционал ПЭР_р не минимизировался, а присутствовал в оптимизационной задаче в качестве ограничения, то по его значению (рис. 1) вряд ли можно судить о предпочтительности того или иного теплоносителя БР.

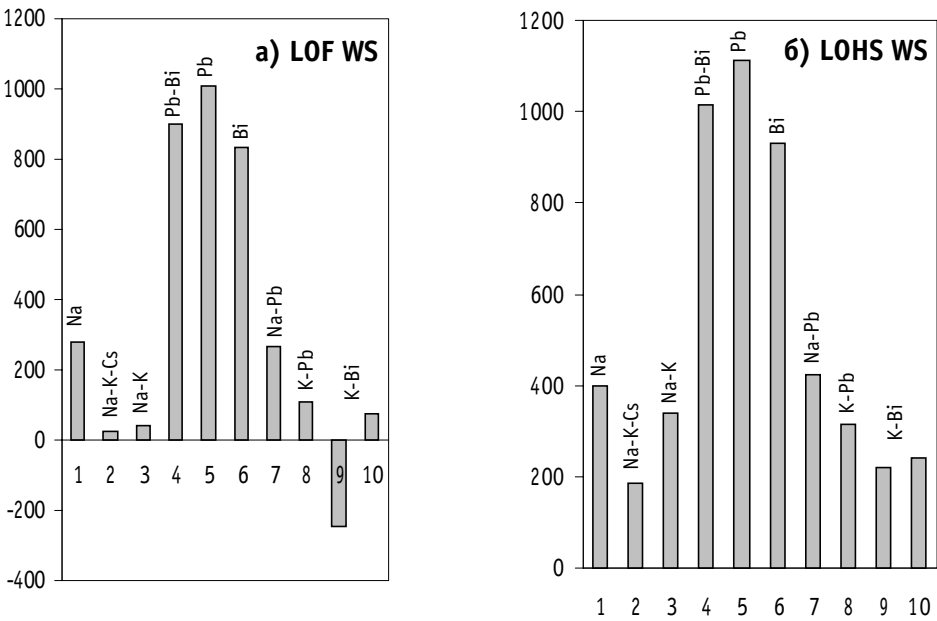


Рис. 2. Температурный запас до кипения (К) теплоносителя (ось ординат) в аварийных режимах с нарушением условий теплоотвода

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ С УХУДШЕНИЕМ УСЛОВИЙ ТЕПЛОТВОДА

Кроме аварийной ситуации LOCA WS, которую так или иначе характеризуют значения функционалов ПЭР_ц и ПЭР_р, к аварийным режимам с ухудшением условий теплоотвода относятся также ситуации LOF WS и LOHS WS. При этом для большинства полученных компоновок максимальная температура топлива уменьшается в переходном режиме, а если и увеличивается, то не достигает предельно допустимого значения. Максимальная температура теплоносителя и оболочек твэлов значительно увеличивается по сравнению с номинальным режимом и может превысить максимально допустимую. Таким образом, основными ограничениями, характеризующими самозащищенность от таких аварий, являются максимальная температура теплоносителя и оболочек твэлов при охлаждении активной зоны реактора щелочными металлами с относительно низкой температурой кипения, и максимальная температура оболочек твэлов, если в качестве теплоносителя первого контура используется свинец, висмут или сплавы на их основе, для которых характерна высокая температура кипения. Т.е. в последнем случае ограничение для максимальной температуры теплоносителя не влияет на результаты оптимизации и может не рассматриваться при решении задачи проектирования. Для сплавов щелочных и тяжелых металлов при небольшом содержании последнего необходимо следить за выполнением ограничений и для максимальной температуры теплоносителя, и для максимальной температуры оболочек твэлов.

На рис. 2 в виде гистограмм представлены температурные запасы до кипения (отложены по оси ординат) теплоносителя в аварийных режимах с ухудшением условий теплоотвода для компоновок, охлаждаемых жидкими металлами и их сплавами (поз. «а» соответствует режиму LOF WS, «б» — LOHS WS). Отрицательный запас соответствует кипению.

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ С УВЕЛИЧЕНИЕМ МОЩНОСТИ

К аварийным режимам с увеличением мощности реактора относятся процессы TOP WS и, в определенной мере, OVC WS. Ситуации TOP WS, инициированные несанкционированным вводом ограниченной величины положительной реактивности, приводят к увеличению мощности и максимальных температур в реакторе. На рис. 3 (поз. «а») приведены температурные запасы до начала температурного разложения нитридного топлива (отложены по оси ординат) в процессе TOP WS (для получения консервативных оценок нижняя граница разложения нитрида принималась равной 2000 K). Для всех полученных компоновок за счет оптимального выбора температуры теплоносителя на входе в активную зону и обратных реактивностных связей исключено замерзание теплоносителя в аварийных ситуациях OVC WS, инициированных подключением «холодной» петли или переводом главных циркуляционных насосов на повышенную производительность. При этом значения мощности и температуры топлива максимальны в новом стационарном состоянии, установившемся в результате действия отрицательных обратных связей. Рис. 3 (поз. «б») иллюстрирует температурный запас до начала разложения топлива в ситуации OVC WS, инициированной подключением «холодной» резервной петли. Идентичность позиций «а» и «б» на рис. 3 говорит об эквивалентности процессов TOP WS и OVC WS с точки зрения изменения максимальной температуры топлива - одного из основных функционалов безопасности.

ВНУТРЕННЯЯ САМОЗАЩИЩЕННОСТЬ ОТ ОДНОЙ ИЗ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫХ КОМБИНАЦИЙ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Одной из наиболее опасных комбинаций аварийных ситуаций является одновременное наложение процессов LOF WS, TOP WS и OVC WS. На рис. 4 приведены температурные запасы до кипения теплоносителя в БР. Максимум температуры теплоносителя

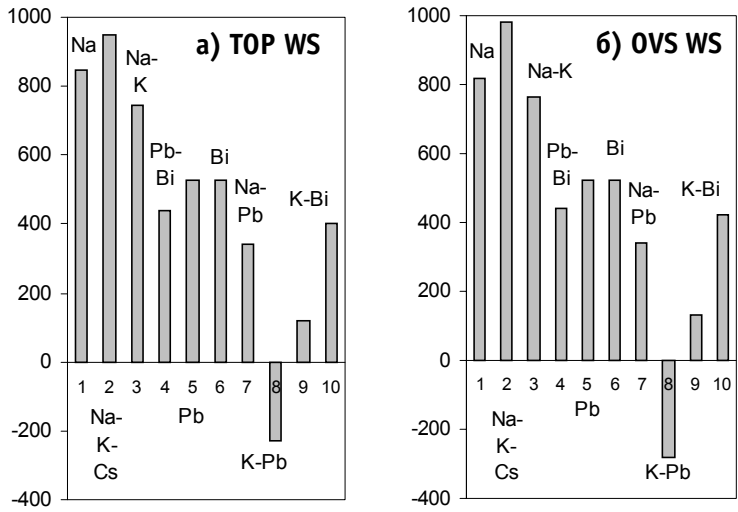


Рис. 3. Температурный запас (К) до начала разложения топлива (ось ординат) в аварийных режимах с увеличением мощности

и оболочек твэлов в этой ситуации для большинства компоновок достигается в новом квазистационарном состоянии, установившемся в результате действия обратных реактивных связей. При этом имеется существенный температурный запас до плавления топлива, а в большинстве случаев — и до начала разложения (до 2000 К).

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Наилучшей самозащищенностью от тяжелых аварий обладают компоновки, охлаждаемые свинцом, висмутом и их сплавами. Применение эвтектики Pb-Bi позволяет не только обеспечить безопасную работу реактора, но и существенно повысить мощность РУ при фиксированных размерах активной зоны, что немаловажно и для энергетических БР, и для выжигателей радиоактивных отходов [2].

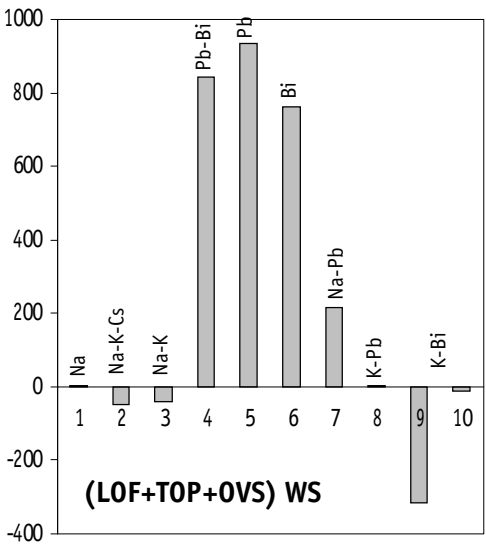


Рис. 4. Температурный запас (К) до кипения теплоносителя (ось ординат) при наложении режимов LOF WS, TOP WS и OVS WS

ких БР, и для выжигателей радиоактивных отходов [2].

2. Использование сплавов щелочных металлов с тяжелыми и, в первую очередь, Na-Pb [3], несмотря на серьезные препятствия к их применению (образование тугоплавких интерметаллидов, повышение температуры замерзания теплоносителя, плохая совместимость и др.) позволит обеспечить безопасность на достаточно высоком уровне, по крайней мере, превышающем достижимый для реакторов с натриевым охлаждением активной зоны при одинаковой тепловой мощности и размерах реактора.

3. Ограничения для размеров активной зоны (при фиксированной тепловой мощности реактора), требующие совместимости полученных вариантов компоновок с РУ «Суперфеникс» или БН-800, в большин-

стве случаев препятствуют наиболее полной реализации преимуществ использования в качестве теплоносителя БР сплавов жидких металлов (и, особенно, на основе тяжелых металлов и щелочных металлов с тяжелыми), т.е. преимущества таких теплоносителей более очевидны при отсутствии ограничений, характерных для реакторов типа БН.

4. По уровню внутренней самозащищенности БР, охлаждаемые щелочными металлами и их сплавами, уступают реакторам с теплоносителем на основе тяжелых металлов и их сплавов, а также сплавов щелочных металлов с тяжелыми (даже при небольшом - 10% содержании тяжелого металла) при одинаковых размерах активной зоны и мощности. Трудности в обеспечении безопасности БР, охлаждаемых щелочными металлами и сплавами на их основе, связаны, в основном, с относительно низкой температурой кипения, что сказывается, в первую очередь, на проблеме обеспечения самозащищенности от аварий с ухудшением условий теплоотвода и, во вторую, на возможности оптимизации (улучшения) прочих характеристик (в т.ч. безопасности, ПЭР и др.) из-за более узкой области, ограниченной меньшим максимально допустимым значением температуры теплоносителя, в которой может проводиться такая оптимизация. Особенно это проявляется при использовании эвтектического сплава Na-K-Cs в качестве теплоносителя первого контура. Как показывают исследования, даже при снижении мощности реактора, охлаждаемого таким сплавом, в два раза по сравнению с «Суперфеником» при совместимости с ним по размерам активной зоны не удастся одновременно достичь приемлемого ПЭР при осушении центральной зоны и самозащищенности от одной из наиболее опасных аварийных ситуаций - наложения процессов LOF WS, TOP WS и OVC WS. Таким образом, концепция охлаждения БР невоспламеняющимся сплавом Na-K-Cs [4], может быть приемлемой по требованиям безопасности только при существенном снижении энергонапряженности активной зоны по сравнению с РУ типа БН [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, с точки зрения возможности обеспечения внутренней самозащищенности от тяжелых аварий оптимальные компоновки БР, охлаждаемые жидкими металлами и их сплавами, можно ранжировать следующим образом.

Наиболее предпочтительные варианты соответствуют БР с теплоносителем на основе тяжелых металлов (Pb, Bi, Pb-Bi). Для таких РУ в принципе достижима внутренняя самозащищенность и, более того, возможно существенное повышение мощности практически без ущерба для безопасности.

Достаточно привлекательны по характеристикам безопасности БР, охлаждаемые сплавами щелочных металлов с тяжелыми. При номинальной мощности и размерах компоновки, соответствующих традиционным РУ с натриевым охлаждением активной зоны, полученные компоновки обладают преимуществами по сравнению с традиционными реакторами типа БН. При этом небольшой запас по температуре топлива до 2000 К или отсутствие такого запаса практически не отражается на самозащищенности, т.к. принятое максимально допустимое значение соответствует нижней границе начала разложения нитрида урана и повышается при переходе на смешанное уран-плутониевое топливо. Таким образом, сплавы щелочных металлов с тяжелыми обладают потенциальными возможностями повышения внутренней самозащищенности. Иначе говоря, принципиальная возможность использования таких экзотических на первый взгляд сплавов не лишена перспектив.

И, наконец, для БР с теплоносителями на основе щелочных металлов и их сплавов температурный запас до кипения теплоносителя в аварийных ситуациях с ухудшением условий теплоотвода минимален даже при существенном снижении мощности реактора. И тем не менее, потенциал БР, охлаждаемых щелочными металлами и сплавами на

их основе, достаточно велик. При снижении энергонапряженности активной зоны таких БР можно добиться внутренней самозащищенности, даже оставаясь в рамках традиционной компоновки, а невоспламеняемость сплава Na-K-Cs [4] - существенное преимущество при его использовании.

Литература

1. Kuzmin A.M., Okunev V.S., Morin D.V., Novikov A.E. DRACON-M Modernized Computer Code for Investigation with Account of Safety Functionals: Сб. «Проблемы безопасности ядерно-энергетических установок»: Тез. докл. IX семинара по проблемам физики реакторов (Москва, 4 - 8 сентября 1995 г.) - М.: МИФИ, 1995. - Т.1. - С. 208-209.
2. Окунев В.С. Расчетно-оптимизационные исследования характеристик безопасности быстрых реакторов большой мощности, охлаждаемых тяжелыми металлами и их сплавами//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - №3. - С.50-57.
3. Кузьмин А.М., Окунев В.С., Шмелев А.Н. О физических характеристиках быстрых реакторов, охлаждаемых сплавом Na-Pb//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - №2. - С. 84-93.
4. Казачковский О.Д., Старков А.В., Кочеткова Е.А. и др. Некоторые особенности сплавов системы натрий-калий-цезий//Атомная энергия -1992. - Т.73. - Вып.6. - С. 500-502.
5. Окунев В.С. Основы возможной концепции и оптимизация характеристик безопасности реакторов на быстрых нейтронах с различными видами топлива, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - №2. - С.111-120.

Поступила в редакцию 19.01.2001

The prognosis model and the algorithm of the lifetime evaluation and the residual lifetime prognosis of the Nuclear power plant constructional elements determined its strength reliability is considered. The algorithm based on the methods of the damaged environment mechanics.

УДК 621.039.53

Application of Two Types of Non-Destructive Analysis Instruments for Spot Check of Nuclear Materials \ O.V. Krivosheina; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001.- 7 pages, 2 illustrations. – References, 6 titles.

Methodology of spot check of nuclear materials with two types (qualitative and quantitative nuclear materials (NM) assay) of non-destructive analysis (NDA) instruments is considered in the article. Combined application of the instruments significantly decreases cost of checks, and allow to resolve the detection problem of different NM quantity theft from accounting item. New method of sampling size calculation by means of diagrams is proposed.

УДК 51-72:621.039.534

Transient Model of Main Condenser for NPP Simulator \ A. A. Kazantsev, V.A. Levchenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001. - 11 pages, 2 illustrations. – References, 11 titles.

In the paper the description of a mathematical model of the two-phase non-equilibrium heat exchanger – main condenser, designed for NPP simulator is briefly considered.

УДК 621.039.526

Comparative Safety Analysis of Fast Reactors, Cooled by Alloys of Liquid Metals \ V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001.- 8 pages, 4 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

The results of the comparative safety analysis of LMFRs cooled by the liquid metals and their alloys are presented. The traditional type layouts with minimal (optimal) void reactivity effect are compared. Three groups of the coolant are considered: alkaline metals and their alloys, heavy metals and their alloys, and alloys of the alkaline with heavy metals.

The most preferable the LMFR cooled by Pb, Bi and Pb-Bi-alloy. The less preferable the layout, cooled by alkaline metals and their alloys. The LMFR, cooled by alloys of the alkaline with heavy metals, are takes the intermediate position by the self-protection level.

УДК 621.039.56

Scattering of Slow Neutrons by Water in Critical States \ Yu.V. Lisichkin, A.G. Novikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001.- 9 pages, 4 illustrations. – References, 36 titles.

The analysis of experimental and calculation investigations of slow neutron double-differential scattering cross sections for water, being in the sub- and supercritical states, is presented. Experimental part of this work has been performed with the double time-of flight neutron spectrometers DIN-1M and DIN-2PI, operating on the pulsed reactors IBR-30 and IBR-2 (Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna). It has been shown, the experimental results can be described in assumption that water in the nearly critical state is a mixture of two components: gas-like one with the properties, being similar to ideal gas of monomeric water molecules and liquid-like one with the properties not far from low temperature water. From the experimental data dependence of relative concentrations on these two components has been extracted as function of the water common molecular density. Physical interpretation of the results obtained is given on the basis of Ya. I. Frenkel theory of heterophase fluctuations and using thermodynamics of supercritical state and phase transitions elaborated by V. K. Semenchenko. The results obtained are compared with the experimental data of other authors as well.