

# ОСНОВЫ ВОЗМОЖНОЙ КОНЦЕПЦИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТОПЛИВА, ОХЛАЖДАЕМЫХ СПЛАВОМ Na-K-Cs

**В.С. Окунев**

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



Рассматриваются компоновки быстрых реакторов с различными видами топлива, охлаждаемых эвтектическим сплавом Na-K-Cs. Представлены результаты решения оптимизационных задач с ограничениями для функционалов безопасности, характеризующих аварийные ситуации типа ATWS.

## ВВЕДЕНИЕ

Предпосылки создания концепции реакторов на быстрых нейтронах (БР), охлаждаемых сплавом Na-K-Cs, сложились в ГНЦ РФ-ФЭИ. Авторами работы [1] было показано, что при определенных соотношениях концентраций компонентов такого сплава, в т.ч. соответствующих эвтектике 4,16%Na-22,08%K-73,75%Cs (в процентах указано массовое содержание компонентов), он не воспламеняется при температурах 300-1000 К. Однако низкая температура кипения такого сплава (по сравнению с температурой кипения чистого натрия 994 К) затрудняет его использование в качестве теплоносителя БР. Вызывает опасение безопасность такого реактора с точки зрения возможности обеспечения внутренней самозащищенности от тяжелых аварий (в т.ч. типа ATWS - аварийных ситуаций с отказом аварийной защиты). С другой стороны, цезий достаточно редок и масштаб его производства мал, что препятствует крупномасштабному строительству реакторных установок (РУ) с теплоносителем на его основе. Авторы настоящей работы не находят существенных факторов, препятствующих увеличению масштабов производства цезия. Кроме того, следует заметить, что цезий - продукт деления - может быть извлечен из отработанного ядерного топлива. Данная работа является логическим продолжением исследований, представленных в [2].

Использование эвтектического сплава Na-K-Cs для охлаждения БР - один из возможных вариантов на пути к достижению естественной безопасности. Сегодня такая концепция БР представляет собой чисто теоретический интерес - о строительстве подобных реакторных блоков речь не идет.

## ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ

При проектировании РУ нового поколения вовсе не обязательно ориентироваться на традиционные теплоносители, технические решения и тем более привязываться к геометрическим размерам активных зон или корпусов действующих, строящихся или разрабатываемых проектов ЯЭУ.

### Безопасность

В основу концепции положена ориентация на достижение естественной безопасности без отказа от использования щелочных металлов в качестве теплоносителя БР. Естественная безопасность достижима при отказе от приоритета технических средств, максимальном использовании пассивных средств обеспечения безопасности, а также при минимизации внутренне присущих РУ (естественных) факторов опасности.

Развитие концепции БР, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs, возможно лишь при условии детерминистического исключения тяжелых аварий в таких РУ. Только БР, обладающие свойством внутренней самозащищенности от тяжелых аварий, смогут составить серьезную конкуренцию действующим или проектируемым РУ (типа БН или БРС).

### Теплоноситель

В отличие от чистого натрия теплоноситель на основе эвтектического сплава Na-K-Cs не горит, в отличие от тяжелых металлов (Pb, Bi) детерминистически исключено его замерзание (такой сплав остается жидким при любых условиях: температура замерзания 195 К минимальна для всех жидких металлов [3]), а при оптимальном выборе параметров компоновки так же, как и в реакторах с натриевым охлаждением, можно исключить и кипение теплоносителя Na-K-Cs в наиболее опасных аварийных ситуациях (из числа ATWS). Поскольку калий и особенно цезий тяжелее натрия, можно надеяться на снижение пустотного эффекта реактивности (ПЭР) в БР, охлаждаемых эвтектическим сплавом Na-K-Cs.

С точки зрения возможности обеспечения эффективного теплоотвода от активной зоны БР сплав Na-K-Cs незначительно уступает натрию и обладает преимуществом по сравнению со свинцом и висмутом.

### Топливо

В основу концепции положено использование нитридного топлива как разумного компромисса между тугоплавким оксидным (существенным недостатком которого является его низкая теплопроводность, приводящая к большим температурным градиентам, и низкая плотность, ухудшающая характеристики воспроизводства) и теплопроводным и плотным металлическим топливом (недостатками которого являются низкая температура плавления и плохая радиационная стойкость).

По сравнению с оксидным топливом нитрид обладает высокой теплопроводностью (незначительно уступая пористому металлическому топливу), лучшей совместимостью с теплоносителем, более высокой температурой плавления, лучшей способностью удерживать продукты деления, большим содержанием делящегося материала - на один атом тяжелого металла приходится один атом замедлителя; при использовании нитридного топлива достигим  $K_{BA} \approx 1$  ( $K_{BA}$  - коэффициент воспроизводства активной зоны). В то же время при высоких температурах (2000°C и выше для UN, 2600°C и выше для PuN) происходит разложение нитридного топлива. Исследования показывают (табл. 1, 2), что при оптимальном выборе параметров компоновки БР, охлаждаемого сплавом Na-K-Cs, такая температура не достигается даже в наиболее опасных аварийных ситуациях, сопровождающихся отказом аварийной защиты.

Таблица 1

**Компоновки БР, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs**

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Топливо	UN-PuN	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	UN-PuN
Теплоноситель	4,16%Na-22,08%K-73,75%Cs			Na
Управления:				
обогащение топлива, %	11,05/ 15,46	13,4/ 20,6	11,8/ 21,4	6,9/ 15,8
диаметр топливной таблетки, мм	5,00	5,21	5,00	5,00
относительный шаг решетки твэлов	1,15/1,24	1,12/1,23	1,14/1,25	1,25/1,28
радиальные размеры зон, см	144,5/70,5		137,0/78,1	144,5/70,5
полувысота активной зоны, см	51,0			
расход теплоносителя, кг/(м <sup>2</sup> с)	4609/4609	4785/4521	4854/4633	4422/4422
T <sub>вх</sub> , К	471,1			639,1
объемная доля, %				
межкассетного теплоносителя	5,0/5,0	5,0/5,0	5,0/5,0	5,4/5,4
чехлов ТВС	6,1/6,1	5,4/5,4	5,0/5,0	6,5/6,5
Функционалы:				
средний подогрев теплоносителя, К	288	287	274	90
максимальная температура, К				
топлива	860/914	1036/1211	918/1239	765/977
теплоносителя	789/787	796/784	717/788	685/751
оболочки твэлов	793/797	800/796	720/800	689/762
КВА	1,06	0,81	0,80	1,06
ПЭР, % Δk <sub>эф</sub> / k <sub>эф</sub>				
осушение всего реактора	-0,608	0,094	0,026	0,372
осушение ЗМО	6,133	8,104	8,424	0,157
максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см	73/108	69/107	56/111	51/142
доля естественной циркуляции, %	13,3/16,4	12,1/16,8	10,7/16,8	3,8/6,7

Примечание: расчеты, представленные в табл.1-3, проведены по программе DRACON-M; через косую черту приведены значения, соответствующие ЗМО и ЗБО

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ****Постановка задачи**

Авторами рассматривалась традиционная компоновка БР средней мощности со смешанным нитридным топливом, содержащая две активные зоны разного обогащения - малого (ЗМО) и большого (ЗБО), - окруженные экранами.

В табл. 1 (Вариант 1) представлены результаты решения задачи минимизации ПЭР (реализующегося при осушении всего реактора). В качестве управляющих параметров рассматривались обогащение топлива, диаметр топливного сердечника, шаг решетки твэлов, размеры зон, расход теплоносителя в номинальном режиме работы реактора, температура теплоносителя на входе в активную зону, объемные доли компонентов активной зоны и др. Толщина бокового и торцевых экранов (45 см) не изменялась в процессе оптимизации.

В задачу оптимального проектирования включены ограничения для функционалов, характеризующих надежную работу РУ на номинальной мощности. Кроме

Таблица 2

**Значения некоторых функционалов оптимизационной задачи, определяющих уровень внутренней самозащищенности БР, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs**

Функционалы	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
LOF WS (одновременное обесточивание всех ГЦН)				
Максимальная температура теплоносителя в переходном режиме, К				
• $t_{\text{н}} = 30$ с	967/891	Кипит	973/931	780/875
• $t_{\text{н}} = 40$ с	948/872	Кипит	955/904	775/856
Максимальная температура топлива в переходном режиме <sup>(1)</sup> , К				
• $t_{\text{н}} = 30$ с	987/947	—	1007/ —	785/ —
• $t_{\text{н}} = 40$ с	966/941	—	984/ —	780/ —
Максимальная температура теплоносителя в установившемся режиме естественной циркуляции, К	899/817	Кипит	906/830	758/773
Мощность РУ в установившемся режиме естественной циркуляции теплоносителя, % номинальной	18,6	—	19,7	8,5
TOP WS (одновременный вывод обеих стержней регулирования)				
Максимальная температура топлива, К	966/1050 <sup>(2)</sup>	1201/1430 <sup>(2)</sup>	1068/1507	829/1151 <sup>(2)</sup>
Максимальная температура теплоносителя <sup>(2)</sup> , К	850/849	855/841	772/859	704/797
Мощность РУ, % номинальной				
• установившийся режим	123,5	122,2	126,9	146,9
• переходный режим	126,7	126,9	131,8	146,9 <sup>(2)</sup>
OVC WS (перевод ГЦН на повышенную производительность)				
Максимальная температура топлива <sup>(2)</sup> , К	897/1006	1129/1387	983/1404	802/1083
Мощность РУ <sup>(2)</sup> , % номинальной	158,3	141,8	138,0	145,5
OVC WS (подключение “холодной” резервной петли)				
Максимальная температура топлива <sup>(2)</sup> , К	936/1019	1149/1362	1016/1427	821/1180
Мощность РУ <sup>(2)</sup> , % номинальной	123,1	119,9	123,4	164,1
LOHS WS (прекращение теплоотвода от I контура)				
Максимальная температура теплоносителя, К	792/808	797/819	766/812	735/757
Неодновременное наложение LOF WS, TOP WS, OVC WS (при запаздывании OVC)				
Максимальная температура, К				
• теплоносителя		Кипит		825/868
• топлива		—		830/995

Примечание: <sup>(1)</sup> — температура топлива в 350 максимальна в номинальном и уменьшается в переходном режиме работы реактора; <sup>(2)</sup> — максимум достигается в установившемся режиме; через косую черту приведены значения, соответствующие 3М0 и 350

того, учитывалось ограничение для коэффициента воспроизводства активной зоны ( $k_{\text{ВА}} \approx 1$ ). Суммарный радиус активной зоны и бокового экрана ограничен значением 2,6 м.

Поскольку для БР, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs, наибольшую опасность представляют аварии с нарушением теплоотвода от активной зоны (что объясняется более низкой по сравнению с натрием температурой кипения теплоносителя - 994 K), рассматривались ограничения для функционалов, определяющих поведение реактора в аварийной ситуации LOF WS при полном прекращении принудительной циркуляции теплоносителя.

### **Оптимальная компоновка**

В результате решения задачи поиска оптимального управления получена компоновка БР [2], охлаждаемого сплавом Na-K-Cs, обладающего отрицательным ПЭР (по реактору) и свойством внутренней самозащищенности практически от всех наиболее опасных для БР с жидкометаллическим теплоносителем аварий (типа ATWS: LOF WS, TOP WS, LOHS WS, OVC WS, инициированным подключением "холодной" резервной петли и переводом ГЦН на повышенную производительность), хотя наиболее опасная комбинация аварийных процессов - одновременное наложение процессов LOF WS, TOP WS и OVC WS (характеризуется частотой событий  $\omega < 10^{-8}$  (реактор год) $^{-1}$ ) - приводит к кипению теплоносителя.

Таким образом, опасность аварий (в т.ч. с нарушением теплоотвода от активной зоны) даже при отказе аварийной защиты может быть сведена к минимуму за счет оптимального выбора параметров компоновки реактора.

Выполнение ограничений для максимальной температуры  $T_{об}^{max}$  оболочек твэлов в номинальном режиме ( $T_{об}^{max} \leq 800$  K) потребовало снижения температуры теплоносителя на входе в активную зону и уменьшения энергонапряженности (увеличения размеров) активной зоны. При этом подогрев теплоносителя в реакторе приблизительно в полтора раза превышает соответствующее значение для РУ типа БН. Оптимальная компоновка приблизительно соответствует реактору "Суперфеникс" половинной мощности.

### **Сравнительный анализ безопасности**

Для сравнения в последней колонке табл. 1 и 2 представлены характеристики БР с натриевым теплоносителем и нитридным топливом. Компоновка получена из "варианта1" (табл.1) заменой сплава Na-K-Cs чистым натрием при постоянных размерах зон реактора. При тех же размерах активной зоны, что и для БР, охлаждаемой сплавом, РУ с натриевым теплоносителем обладает лучшей самозащищенностью от аварий типа ATWS, но худшим ПЭР при осушении всего реактора. Однако при увеличении размеров активной зоны появляются большие возможности для минимизации ПЭР при ограничениях для функционалов, характеризующих самозащищенность РУ от аварий с нарушением теплоотвода [2]. Множество компоновок, полученное в результате решения бескритериальной задачи на выполнение ограничений для функционалов безопасности, характеризующих аварийные режимы типа ATWS (область безопасных компоновок в пространстве управляющих параметров), для БР, охлаждаемых чистым натрием, значительно больше, чем для РУ, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs. Таким образом, появляются дополнительные возможности минимизации ПЭР. При переходе от натриевого теплоносителя к сплаву Na-K-Cs при условии сохранения самозащищенности от аварий типа ATWS значение ПЭР, вообще говоря, может и ухудшаться. Так происходит с локальным ПЭР, реализующимся при осушении центральной зоны РУ (см. табл.1).

Таким образом, существенные преимущества эвтектического сплава Na-K-Cs по сравнению с чистым натрием очевидны лишь с точки зрения возможности детерминистического исключения горения и замерзания теплоносителя, но никак не с точки зрения снижения ПЭР. При этом БР, охлаждаемые сплавом Na-K-Cs, уступают РУ типа БН по мощности при тех же геометрических размерах активной зоны.

## ДРУГИЕ ВИДЫ ТОПЛИВА

### Компоновка с МОХ-топливом

Для примера в табл.1 приведены характеристики БР, охлаждаемого эвтектическим сплавом Na-K-Cs, со смешанным оксидным (МОХ) топливом. Компоновка получена из “варианта 1” заменой нитридного топлива менее плотным, с меньшей долей делящегося материала - оксидным. При этом эффективный коэффициент размножения нейтронов  $k_{эф}=0,85$ , а меньшая теплопроводность МОХ-топлива по сравнению с нитридным приводит к увеличению максимальной температуры топлива  $T_{г}^{max}$  в номинальном режиме. Для повышения  $k_{эф}$  до единицы при сохранении геометрических размеров зон реактора потребовалось увеличить долю делящегося материала (за счет снижения объемной доли конструкционной стали - чехлов ТВС, оболочек твэлов и теплоносителя - в пользу увеличения доли топлива; увеличения диаметра топливных таблеток, обогащения топлива, значительного уменьшения шага решетки твэлов в центральной активной зоне — ЗМО), что привело к увеличению температуры компонентов активной зоны и превышению максимальными температурами теплоносителя  $T_{тн}^{max}$  и оболочек твэлов  $T_{об}^{max}$  в режиме работы РУ на номинальной мощности своих предельно допустимых значений ( $T_{тн}^{доп}$  и  $T_{об}^{доп}$  соответственно). Для снижения  $T_{тн}^{max}$  и  $T_{об}^{max}$  потребовалось увеличить массовый расход теплоносителя через ЗМО в номинальном режиме работы реактора.

Полученный вариант (табл.1, вариант 2) характеризуется положительным ПЭР (при осушении всего реактора значительно меньшим  $\beta$ , где  $\beta$  - эффективная доля запаздывающих нейтронов) и не обладает свойством внутренней самозащитенности от аварии типа LOF WS (нарушение принудительной циркуляции теплоносителя в первом контуре с одновременным отказом аварийной защиты). Несмотря на высокую долю естественной циркуляции в номинальном режиме (табл.1) для полученной компоновки режим естественной конвекции не существует - теплоноситель кипит в ЗМО и торцевом экране (ТЭ) над ней (табл. 2, вариант 2). Внутренняя самозащитенность от аварии типа TOP WS (несанкционированное увеличение мощности - ввод ограниченной положительной реактивности без срабатывания аварийной защиты), OVC WS (захолаживание теплоносителя без срабатывания аварийной защиты) и LOHS WS (нарушение теплоотвода от I контура без срабатывания аварийной защиты) достаточно высока (табл.2).

Обеспечение самозащитенности от аварии LOF WS (при одновременном обеспечивании всех ГЦН) потребовало изменения вектора управления с целью выполнения ограничений для соответствующих функционалов безопасности (в первую очередь, максимальных температур в аварийном режиме LOF WS). Снижение  $T_{тн}^{max}$  (в аварийном и номинальном режимах работы РУ) в ЗМО произошло вследствие повышения эффективности охлаждения (увеличения расхода в номинальном режиме, объемной доли теплоносителя в ЗМО за счет снижения доли топлива и стали) и уменьшения обогащения топлива в ЗМО и диаметра топливных таблеток. Однако уменьшение доли делящегося материала в ЗМО привело к снижению  $k_{эф}$ . Для компенсации этого эффекта (выполнения ограничения  $k_{эф}=1$ ) потребовалось увеличить обогащение в соседней зоне (ЗБО), уменьшить радиус  $\Delta R_{ЗМО}$  ЗМО за счет увеличения толщины  $\Delta R_{ЗБО}$  ЗБО (при сохранении внешних размеров активной зоны:  $\Delta R_{ЗМО} + \Delta R_{ЗБО} = \text{const}$ ), уменьшить объемную долю стали (чехлов ТВС). Ограничение  $T_{тн}^{max} \leq T_{тн}^{доп}$  выполнено при смещении границы зон ЗМО/ЗБО в сторону бокового экрана на 4,35 см. При этом режим LOF WS при времени выбега ГЦН  $t_{г} \geq 40$  с не приводит к аварии. При дальнейшем смещении границы зон ЗМО/ЗБО до 7,55 см (по сравнению с исходным вариантом) может быть обеспечена внутренняя само-

защищенность от аварии LOF WS при  $t_n \geq 30$  с (табл.1, вариант 3). В обоих случаях выполнено ограничение  $\Delta R_{3M0} + \Delta R_{350} = \text{const}$ .

Итак, в БР с MOX-топливом и Na-K-Cs-теплоносителем достижима внутренняя самозащищенность от наиболее опасных аварий из числа ATWS. При этом и в номинальном режиме, и в аварийном с увеличением мощности (TOP WS, OVC WS) максимальная температура топлива  $T_T^{\text{max}}$  превышает значение, соответствующее компоновке с нитридным топливом, но не превышает предельно допустимое.

### **О роли коэффициентов реактивности (или некоторые проблемы, затрудняющие прогнозирование поведения БР с MOX-топливом в аварийных ситуациях)**

Известно, что в зависимости от конструкции реактора и типа постулируемой аварии роль отдельных коэффициентов реактивности различна [4]. В БР с натриевым охлаждением большой и средней мощности при использовании оксидного топлива относительно высокое значение  $T_T^{\text{max}}$  и большая разница температур ( $T_T^{\text{max}} - T_{\text{TH}}^{\text{max}}$ ) в номинальном режиме работы приводят к тому, что в аварийной ситуации LOF WS максимальная температура топлива уменьшается со временем, и для благоприятного завершения этого процесса необходимо уменьшать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности (ДКР)  $\xi_d$ . Это затрудняет одновременное обеспечение внутренней самозащищенности от аварий, вызванных нарушением теплоотвода от активной зоны реактора и несанкционированным увеличением мощности (вводом положительной реактивности), т.к. в первом случае необходимо уменьшать  $|\xi_d|$ , а во втором - увеличивать. Поэтому большинство компоновок, полученных в результате решения задачи проектирования с ограничениями для функционалов, характеризующих безаварийное завершение процесса LOF WS, не обладает свойством внутренней самозащищенности от аварий TOP WS и наоборот.

Такая закономерность может нарушаться при уменьшении разности температур  $T_T^{\text{max}}$  и  $T_{\text{TH}}^{\text{max}}$ , что характерно, например, для БР, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs. При использовании нитридного или металлического (в т.ч. легированного цирконием) топлива разность  $T_T^{\text{max}} - T_{\text{TH}}^{\text{max}}$  мала, и для безаварийного завершения аварийных процессов с увеличением мощности и ухудшением теплоотвода от активной зоны необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный ДКР. БР с оксидным (в т.ч. MOX) топливом и Na-K-Cs-теплоносителем занимают промежуточное положение - в различных зонах реактора  $T_T^{\text{max}}$  в процессе LOF WS может увеличиваться или уменьшаться со временем. Такая ситуация рассматривается ниже.

О роли отдельных составляющих температурного коэффициента реактивности (доплеровского  $\xi_d$  и плотностного  $\xi_{\text{пл}}$ ) в БР с MOX-топливом и Na-K-Cs-теплоносителем можно судить по данным табл. 3.

Рассматривались три варианта компоновки БР с Na-K-Cs-теплоносителем и смешанным оксидным топливом. Вариант "А" получен при решении задачи проектирования без ограничений для функционалов, характеризующих безаварийное завершение процесса LOS WS (см. табл. 1, вариант 1). Вариант "В" соответствует задаче с ограничениями для максимальной температуры теплоносителя в переходном процессе LOF WS при времени выбега ГЦН  $t_n = 40$  с и при установившемся режиме естественной циркуляции теплоносителя. Вариант "С" обладает свойством внутренней самозащищенности от аварий типа LOF WS при  $t_n = 30$  с. Таким образом, последний вариант ("С") компоновки наиболее предпочтителен с точки зрения достижения внутренней самозащищенности от аварии LOF WS.

Таблица 3

**Доплеровский и плотностной коэффициенты реактивности в БР с Na-K-Cs-теплоносителем и МОХ-топливом (абсолютные значения приведены в единицах  $10^6 \Delta k_{эф}/K_{эф}/^\circ\text{C}$ )**

Коэффициент реактивности	Вариант компоновки		
	«А»	«В»	«С»
Доплеровский в ЗМО	-1,789	-1,294	-1,058
Доплеровский в ЗБО	-2,806	-3,012	-3,052
Доплеровский по реактору	-4,993	-4,656	-4,454
Плотностной в ЗМО	5,312	3,617	2,848
Плотностной в ЗБО	15,79	18,15	19,19
$\xi_d / \xi_{пл}$ в ЗМО	-0,337	-0,358	-0,372
$\xi_d / \xi_{пл}$ в ЗБО	-0,178	-0,166	-0,159
$\xi_d / \xi_{пл}$ по реактору	-0,235	-0,212	-0,201

Центральная радиальная зона реактора (ЗМО и ТЭ над ней) является наиболее опасной с точки зрения возможности кипения теплоносителя и повреждения оболочек твэлов в аварийной ситуации LOF WS. Для повышения самозащищенности потребовалось уменьшить по абсолютному значению отрицательный ДКР в этой зоне. При этом увеличение  $|\xi_d|$  в соседней зоне (ЗБО и ТЭ над ней) - всего лишь компенсация первого эффекта (снижения  $|\xi_d|$  в центральной зоне). Поскольку вторая зона с точки зрения самозащищенности от аварий LOF WS неопасна, в ней можно ухудшать локальный  $\xi_d$  - большой запас до кипения позволяет это делать. Таким образом, улучшение самозащищенности за счет снижения  $T_{тн}^{max}$  в центральной радиальной зоне реактора компенсируется увеличением  $T_{тн}^{max}$  (ухудшением самозащищенности) во второй зоне по сравнению с исходным вариантом "А". Относительно большой температурный запас до кипения во второй зоне позволяет идти на повышение  $T_{тн}^{max}$  в ней. В результате максимальная температура топлива в аварийной ситуации LOF WS увеличивается в ЗМО и уменьшается в ЗБО.

Ситуация проясняется, если рассматривать не только отдельные составляющие коэффициентов реактивности, но и их отношение, например,  $\xi_d/\xi_{пл}$  или отношение коэффициента реактивности, связанного с изменением температуры топлива ( $\xi_t$ ), к коэффициенту по теплоносителю ( $\xi_{тн}$ ). Так, если в процессе LOF WS максимальная температура топлива увеличивается со временем в ЗМО и уменьшается в ЗБО, то для обеспечения самозащищенности от такой аварии необходимо увеличивать  $|\xi_t| / |\xi_{тн}|$  (или  $|\xi_d| / |\xi_{пл}|$ ) в ЗМО и уменьшать это отношение в ЗБО.

Итак, для обеспечения внутренней самозащищенности от аварии типа LOF WS в БР средней мощности (типа БН-600) при относительно небольшой разности  $T_t^{max} - T_{тн}^{max}$  необходимо увеличивать отношение абсолютных значений локальных коэффициентов реактивности  $|\xi_t| / |\xi_{тн}|$  (или  $|\xi_d| / |\xi_{пл}|$ ) в той зоне, где увеличивается  $T_t^{max}$ , и увеличивать это соотношение в целом по реактору. При этом  $|\xi_d|$  может уменьшаться как в наиболее опасной с точки зрения аварийного завершения LOF WS зоне, так и по реактору в целом.

Таким образом, если в БР средней мощности с натриевым охлаждением и оксидным топливом роль коэффициентов реактивности в аварийной ситуации LOF WS определяется однозначно (требуется уменьшать  $|\xi_t|/|\xi_{тн}|$  или  $|\xi_d|/|\xi_{пл}|$ ), то в реакторах, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs, роль коэффициентов реактивности в некоторых зонах может изменяться на противоположную. Это касается, в первую очередь, компоновок с умеренными температурными перепадами  $T_t^{max} - T_{тн}^{max}$ , т.е.



возможны случаи, когда  $T_r^{\max}$  в процессе LOF WS увеличивается в одной зоне (в рассмотренном случае в ЗБО) и уменьшается в другой (в данном случае в ЗМО). Тогда трудно однозначно выработать требования к ДКР и отношению  $|\xi_r|/|\xi_{\text{тн}}|$  (или  $|\xi_d|/|\xi_{\text{пл}}|$ ). В реакторах типа БН с оксидным топливом вследствие больших температурных перепадов между топливом и теплоносителем такие случаи практически не встречаются.

В БР, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs, при использовании нитридного или металлического (в т.ч. легированного цирконием) топлива для безаварийного завершения этого процесса LOF WS необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный ДКР (максимальная температура топлива увеличивается со временем). В реакторах с оксидным топливом требования к отдельным коэффициентам реактивности должны вырабатываться с учетом поведения функционалов безопасности (максимальных температур и др.) в наиболее опасных зонах.

Что касается аварий с несанкционированным увеличением мощности вследствие ввода ограниченной положительной реактивности, то, в общем случае, самозащищенность от них ухудшается с уменьшением по абсолютному значению отрицательного  $\xi_d$  (суммарного по реактору). В процессе OVC WS, как и ожидалось, с увеличением  $|\xi_d|$  в центральной активной зоне уменьшается  $T_r^{\max}$  (улучшается внутренняя самозащищенность).

## ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Концепция БР, охлаждаемого эвтектическим сплавом Na-K-Cs, основывается на потенциальной возможности достижения естественной безопасности, определяющейся детерминистическим исключением горения и замерзания такого теплоносителя, а также возможностью оптимального выбора параметров компоновки, исключающего кипение теплоносителя в аварийных режимах типа ATWS.

Исследования показывают, что для таких БР достижима внутренняя самозащищенность от тяжелых аварий (инициированных, в первую очередь, событиями типа ATWS). Причем с точки зрения максимальной возможности приближения к идеалу естественной безопасности наиболее приемлемым является вариант компоновки с нитридным топливом.

Вследствие низкой максимальной температуры  $T_r^{\max}$  топлива в номинальном и аварийных режимах БР, охлаждаемые сплавом Na-K-Cs, обладают большими возможностями по использованию теплопроводного (например, нитридного) топлива. При использовании нитридного или металлического топлива поведение реактора в аварийных ситуациях типа ATWS наиболее предсказуемо (по сравнению с оксидным), а роль доплеровского коэффициента реактивности в аварийных процессах с увеличением мощности и ухудшением теплоотвода одинакова, т.е. повышение самозащищенности от аварии одного типа одновременно способствует улучшению самозащищенности от аварии другого типа.

Использование оксидного (в т.ч. MOX) топлива нецелесообразно по следующим причинам:

- нет необходимости использования тугоплавкого топлива;
- при большой разнице температур топлива и теплоносителя в номинальном режиме роль ДКР в аварийных процессах типа LOF и TOP противоположна, что затрудняет одновременное обеспечение самозащищенности от аварий того и другого типов;
- по сравнению с БР с нитридным или металлическим топливом поведение РУ в аварийной ситуации типа LOF WS менее предсказуемо;
- не достижимо  $KBA \approx 1$ .

По характеристикам безопасности БР с Na-K-Cs-охлаждением обладают рядом

преимуществ по сравнению с БР других перспективных типов (БН, БРС) и, возможно, в будущем смогут составить им достойную конкуренцию.

### **Литература**

1. *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.
2. *Кузьмин А.М., Окунев В.С.* К вопросу о достижении естественной безопасности в рамках концепции быстрого реактора, охлаждаемого эвтектическим сплавом Na-K-Cs // Атомная энергия. - 2000.
3. *Быстров П.И., Каган Д.Н., Кречетова Г.А., Шпильрайн Э.Э.* Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок. - М.: Наука, 1988.
4. *Хаммел Г., Окрент Д.* Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах. Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1975.
5. *Кузьмин А.М., Окунев В.С.* Программно-методическое обеспечение для решения задач оптимизации компоновки ядерных реакторов нового поколения // Известия РАН. Энергетика. - 1996. - №5. - С.66-74.

Поступила в редакцию 02.02.2000.

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.