

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕЙ САМОЗАЩИЩЕННОСТИ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С НАТРИЕВО-СВИНЦОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

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 сплавом натрий-свинец, полученные на установке типа БН-800 с нитридным смешанным топливом и анализ ситуации типа ATWS. Результаты могут быть полезны при создании нового поколения ядерных реакторов.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция натриево-свинцового охлаждения активной зоны реактора на быстрых нейтронах (БР), основанная на объединении преимуществ реакторов типа БН и БРС, не лишена недостатков и в то же время обладает рядом достоинств по сравнению с традиционными БР с натриевым охлаждением с точки зрения возможности достижения внутренней самозащищенности от аварий [1]. В работе [1] приведены результаты предварительного анализа потенциальной возможности охлаждения активной зоны быстрых бридеров бинарным сплавом NaPb с различным массовым содержанием свинца, представлены результаты расчетов пустотного эффекта реактивности (ПЭР) и отдельных составляющих температурного коэффициента реактивности в таких реакторных установках (РУ). Показано, что замена натрия в I контуре РУ типа БН-800 сплавом NaPb приводит к увеличению ПЭР. Причем основным сдерживающим фактором минимизации ПЭР является ограничение на радиус активной зоны. За счет увеличения радиуса, уплотнения активной зоны и уменьшения толщины экранов имеется возможность уменьшения ПЭР. Таким образом, эффект, проявляющийся при наиболее неблагоприятном развитии аварийной ситуации с потерей теплоносителя I контура (осушение центральной зоны), может быть снижен до значения, не превышающего эффективную долю запаздывающих нейтронов. При этом радиальные размеры активной зоны будут соответствовать проектным для БН-800. При снижении требований к бридинговым характеристикам имеется потенциальная возможность дальнейшего снижения ПЭР до отрицательных значений. Таким образом, в БР, охлаждаемых сплавом NaPb, может быть достигнута внутренняя самозащищенность от аварийных ситуаций типа LOCA (потеря теплоносителя I контура).

Целью настоящей работы является исследование возможностей обеспечения

© А.М. Кузьмин, В.С. Окунев, 2000

внутренней самозащищенности БР с натриево-свинцовым теплоносителем от аварий других типов. Рассматриваются наиболее опасные аварийные ситуации, сопровождающиеся отказом аварийной защиты [2]:

- LOF WS - нарушение принудительной циркуляции теплоносителя в I контуре;
- LOHS WS - нарушение теплоотвода от I контура;
- TOP WS - несанкционированное увеличение мощности (ввод положительной реактивности);
- OVC WS - захлаживание теплоносителя I контура.

Исследования проводились для традиционной компоновки БР типа БН-800 со смешанным нитридным топливом, в которой натриевый теплоноситель заменен сплавом NaPb с массовым содержанием свинца 10% [1].

СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

При анализе режима LOF WS постулируется полное прекращение принудительной циркуляции теплоносителя в I контуре и, как следствие этого, снижение расхода G до значения $G_{ЕЦ}$, соответствующего естественной циркуляции. Рассматривается гипотетический сценарий развития аварийного процесса LOHS WS - полное (100%) прекращение теплоотвода от I контура, что соответствует увеличению температуры $T_{вх}$ теплоносителя на входе в активную зону до температуры выхода $T_{вых}$ в номинальном режиме работы РУ. В аварийном режиме TOP WS постулировался одновременный вывод из активной зоны обеих стержней регулирования. При анализе процесса OVC WS предполагалось, что аварийная ситуация может быть инициирована двумя независимыми событиями - переводом главного циркуляционного насоса (ГЦН) на повышенную производительность, вследствие чего увеличивается расход теплоносителя через активную зону, и подключением резервной («холодной») петли, в результате которого на вход в активную зону реактора подается теплоноситель с температурой $T_{вх}^{(ovc)} = T_{вх} - \delta T_{вх}$, где $\delta T_{вх} > 0$.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Расчеты проводились с помощью программ DRACON-M. Расчетно-оптимизационный комплекс DRACON-M позволяет рассматривать многозонные БР в R-Z геометрии с топливными сборками, содержащими цилиндрические твэлы. Расчетная модель реактора включает в себя описание нейтронно-физических и теплогидравлических процессов, нахождение прочностных характеристик оболочек твэлов и стенок кассет с учетом распухания материалов, ПЭР, плотностного и доплеровского коэффициентов реактивности, оценку натуральных и экономических показателей реактора. Распределения нейтронов и ценностей нейтронов определяются на базе 26-групповой системы констант в диффузионном приближении с использованием методов итерационного синтеза. Теплогидравлический расчет проводится в условиях идеального дросселирования теплоносителя по радиусу реактора при отсутствии перетечек тепла вдоль оси твэла.

В этих приближениях при среднем стационарном состоянии топлива находятся максимальные и средние по зонам энерговыделения коэффициенты воспроизводства топлива, кампании зон, подогревы теплоносителя $\Delta T_{тн}^{(o)}(r,z)$ и перепады температур по оболочке $\Delta T_{об}^{(o)}(r,z)$ и топливу $\Delta T_{т}^{(o)}(r,z)$ на высоте z в точке r , напряжения в стенках кассет и другие характеристики.

Аварийные процессы описываются в приближении точечной нейтронной кинетики с учетом обратной связи по средним температурам. При этом зависимости от времени t средних температур топлива $T_t(t)$ и теплоносителя $T_{тн}(t)$ оцениваются в каждой зоне реактора исходя из предположения, что в любой момент вре-

мени имеются установившиеся температуры при характерных для каждой из рассматриваемых аварий и состояний реактора законах изменения входной температуры теплоносителя $T_{вх}(t)$, внешнего воздействия $dr(t)$ на реактивность и расхода теплоносителя $G(t)$. В результате находятся те моменты времени $t_w, t_{тн}, t_{об}, t_r$, в которые максимальны мощность и соответствующие средние температуры (теплоносителя, оболочек твэлов, топлива). Максимальные температуры оцениваются по формулам

$$T_{тн}^{max}(r,t_{тн})=T_{вх}(t_{тн})+w(t_{тн})/G(t_{тн}) \max_z[\Delta T_{тн}^{(o)}(r,z)],$$

$$T_{т,об}^{max}(r,t_{т,об})=T_{вх}(t_{т,об})+\max_z[\Delta T_{тн}^{(o)}(r,z)]w(t_{т,об})/G(t_{т,об})+\Delta t_{т,об}^{(o)}(r,z)w(t_{т,об})],$$

где w и G — относительные значения мощности и расхода соответственно.

Таблица 1

Параметры БР с натриево-свинцовым охлаждением активной зоны

Параметр	Значение
Тепловая (электрическая) мощность РУ, МВт	2100 (800)
Топливо	UN-PuN
Теплоноситель I контура (массовое содержание)	Na(90%)Pb(10%)
Средний подогрев теплоносителя по реактору, К	128
Массовый расход теплоносителя, кг/(м ² с)	8582
Обогащение топлива активной зоны, %	13,6/13,9
Диаметр топливной таблетки (активная зона), мм	6,69
Относительный шаг решетки твэлов активной зоны	1,15
Размеры активной зоны, см: радиус зоны малого обогащения толщина зоны большого обогащения высота активной зоны	 92,0 66,7 61,6
Объемные доли, %: топливо теплоноситель чехлы ТВС оболочки твэлов дистанционирующая проволока	 45,2/47,6 32,8/30,8 7,6/7,9 11,5/12,0 1,5/1,6
Максимальная температура ¹ , К: топлива оболочек твэлов теплоносителя	 1476/1467 822/819 781/779
Максимальная линейная нагрузка на твэлы ¹ , Вт/см	490/485
ПЭР, % $\Delta k/k$: осушение центральной зоны осушение всего реактора	 1,4421 -0,0955
Коэффициент воспроизводства в активной зоне	1,06
Доля естественной циркуляции ¹ , %	5,53/5,47

Примечание: через косую черту приведены значения, соответствующие зонам малого и большого обогащения; ¹ - соответствует режиму работы на номинальной мощности

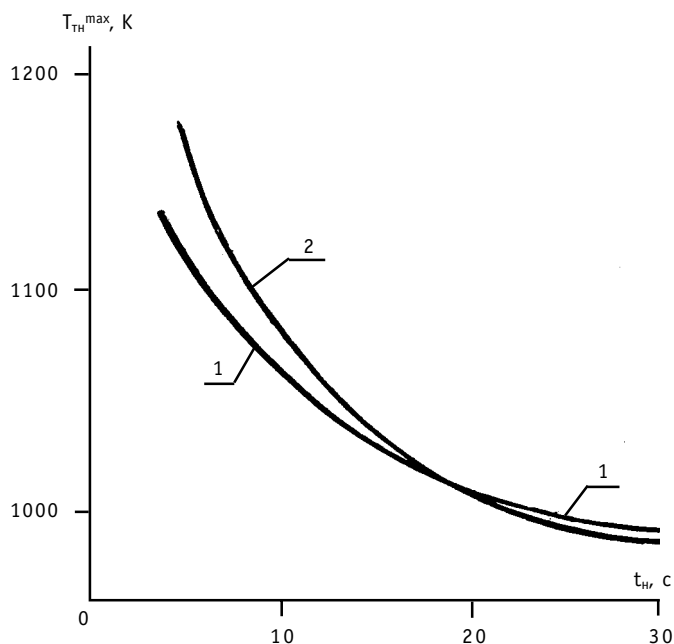


Рис.1. Зависимость $T_{тн}^{max}$ от времени выбега ГЦН в процессе LOF WS: 1 - в верхнем экране; 2 - в активной зоне

доля естественной циркуляции для полученной компоновки мала - 5,53 и 5,47% (для зон малого и большого обогащения соответственно). Для подобной РУ с натриевым теплоносителем [1] доля естественной циркуляции - 17 и 12%, относительный шаг решетки твэлов - 1,206 и 1,209 в зонах малого и большого обогащения соответственно).

БР, охлаждаемый бинарным сплавом, характеризуется более высоким массовым расходом теплоносителя (по сравнению с БН) и низкими значениями максимальной температуры теплоносителя (меньшим подогревом) и оболочек твэлов в номинальном режиме работы реактора. Максимальная температура топлива и линейные нагрузки на твэлы для БР с натриевым и натриево-свинцовым теплоносителем приблизительно равны [1].

Неопределенность в сценариях развития аварийных ситуаций требует рассмотрения широкого диапазона возмущений $\delta\rho$ (реактивности), δG (расхода), $\delta T_{вх}$ (входной температуры), инициирующих аварийные режимы, и различных значений времени (скорости) внесения возмущений.

Необходимо отметить, что основные тенденции поведения РУ и характер изменения функционалов, характеризующих уровень естественной безопасности БР с натриево-свинцовым теплоносителем в аварийных ситуациях, качественно не изменяются по сравнению с РУ типа БН. Так, при уменьшении значений времени $t_{нр}$ выбега ГЦН (снижения расхода теплоносителя до значения $G_{ЕЦ}$) максимум температуры теплоносителя смещается по высоте реактора из верхнего торцевого экрана в активную зону (рис.1), т.е. при $t_{нр} > 19$ с температура теплоносителя максимальна в верхнем экране, при $t_{нр} < 19$ с - в активной зоне. Последний случай соответствует охлаждению теплоносителя в верхнем экране («горячий» теплоноситель нагревает «холодное» топливо). Подобное явление наблюдается и в аварийном режиме LOHS WS, но выражено оно не так явно (рис.2).

В аварийной ситуации, инициируемой вводом ограниченной величины положительной реактивности при малых значениях времени t_p ввода ($t_p < 4$ с) темпера-

Оптимизационная задача решается итерационно с помощью метода последовательной линеаризации. Необходимые для этого коэффициенты чувствительности рассчитываются с помощью соотношений теории малых возмущений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ограничение радиуса активной зоны (для обеспечения соответствия компоновки проекту БН-800) потребовало снижения относительного шага решетки твэлов до минимально допустимого (1,15), вследствие чего

тура центра твэла ($T_{\text{ТН}}^{\text{max}}$) достигает своего максимального значения (во времени) в переходном режиме при $t=t_p$, а при больших значениях t_p ($t_p > 4$ с) - в новом стационарном состоянии, установившемся в результате срабатывания обратных реактивных связей при $t > t_p$ (рис.3).

Что касается процесса OVC WS, инициированного подключением «холодной» петли, то снижение $T_{\text{ВХ}}$ в аварийном процессе на 47 К не приводит к нарушению ограничения для максимальной температуры топлива, соответствующего номинальному режиму ($T_{\text{Т}}^{\text{max}} \leq 1800$ К). Даже при гипотетическом уменьшении $T_{\text{ВХ}}$ на 100 К сохраняется значительный запас до плавления топлива.

При двукратном увеличении расхода (производительности ГЦН) в I контуре за 5 с и более (аварийная ситуация OVC WS, инициированная переводом ГЦН на повышенную производительность) максимальная температура топлива также не достигает предельно допустимого значения.

Отметим, что ограничение для максимальной температуры теплоносителя $T_{\text{ТН}}^{\text{max}} \leq 1156$ К соответствует началу кипения чистого натрия. При использовании

сплава NaPb в качестве теплоносителя температура его кипения увеличивается. При малом массовом содержании свинца это увеличение незначительно и практически не оказывает заметного влияния на самозащитенность. Расчеты на основании закона Рауля [3] предсказывают увеличение температуры кипения сплава 90%Na-10%Pb по сравнению с чистым натрием на 1,4 К.

Значения основных функционалов, определяющих уровень внутренней самозащитенности РУ от тяжелых аварий, приведены в табл.2,3. В табл.2 приведены значения максимально допустимых возмущений (в т.ч. гипотетических), инициирующих ситуации

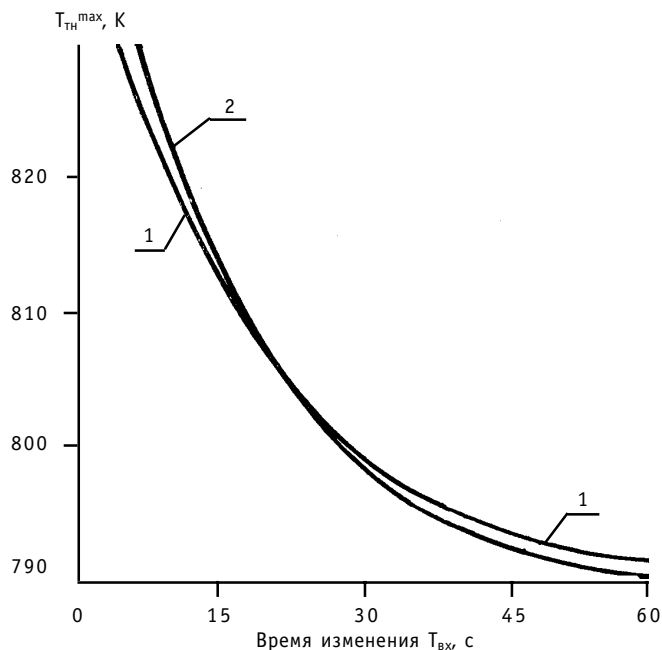


Рис.2. Зависимость $T_{\text{ТН}}^{\text{max}}$ от времени изменения $T_{\text{ВХ}}$ в процессе LOHS WS: 1 - в верхнем экране; 2 - в активной зоне

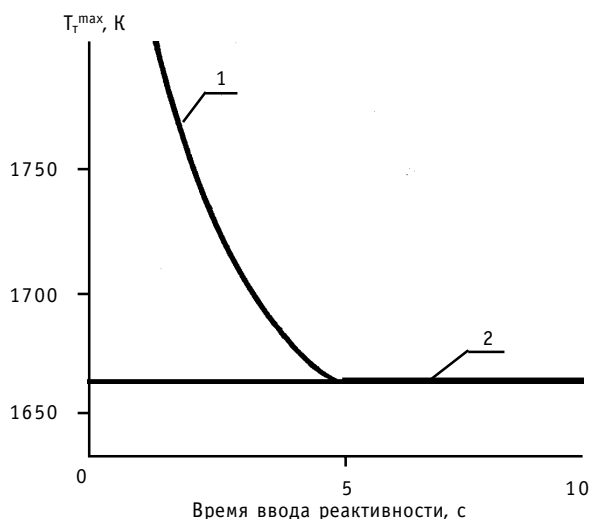


Рис.3. Зависимость $T_{\text{Т}}^{\text{max}}$ от времени ввода положительной реактивности: 1 - переходный режим; 2 - режим, установившийся в результате срабатывания обратных реактивных связей

Таблица 2

Максимально допустимые возмущения, инициирующие не приводящие к аварии ситуации типа ATWS,

Возмущение	Максимальная температура, К		Мощность РУ в новом стационарном состоянии, % номинальной
	теплоносителя	топлива	
Уменьшение расхода (гиперболический закон) при $t_n=6$ с	1156 ¹	Уменьшается со временем	12
Ввод положительной реактивности $0,9\beta^{2)}$ за 1,5 с (гипотетический случай)	807	1800 ¹	142
Уменьшение температуры $T_{вх}$ теплоносителя на входе в активную зону на 47К за 10 с	Не превышает максимально и минимально допустимые значения	1800 ¹	139/145
Увеличение $T_{вх}$ до значения, соответствующего температуре $T_{вых}$ на выходе, за 5 с	Не превышают максимально допустимые значения		Уменьшается практически до уровня остаточного тепловыделения
Увеличение расхода в два раза ³ за 10 с	Не превышает максимально и минимально допустимые значения	1661	131

Примечание: через косую черту приведены значения, соответствующие зонам малого и большого обогащения; ¹ - предельно допустимое значение; ² - соответствует суммарному реактивностному "весу" обоих стержней регулирования (β - эффективная доля запаздывающих нейтронов); ³ - может быть исключено детерминистически

Таблица 3

Значения основных функционалов в аварийных ситуациях типа ATWS

Аварийный режим	Максимальная температура, К	
	топлива	теплоносителя
LOF WS ($t_n=30$ с, $H_{эф}=8,9$ м)	Уменьшается со временем	978/969
TOP WS (ввод $0,9 \beta$ за 10 с)	1658/1648	807/804
LOHS WS ($T_{вх}$ увеличивается до $T_{вых}$ за 10 с)	Не превышает допустимое	818/812
(LOF+TOP+OVC) WS, OVC запаздывает на 40 с и инициирован снижением $T_{вх}$ на 30 К за 10 с	Не превышает значения, соответствующего номинальному режиму	1029/1023

типа ATWS, не приводящих к аварии, в табл.3 - максимальная температура теплоносителя и топлива (в центре твэла) в конкретных аварийных ситуациях.

Отметим, что ни одна из рассмотренных аварийных ситуаций в БР, охлаждаемом сплавом 90%Na-10%Pb, не приводит к аварии. Это замечание относится и к различным комбинациям аварийных режимов. Так, одна из наиболее опасных комбинаций для БР с жидкометаллическим охлаждением - одновременное наложение процессов (LOF+TOP+OVC) WS - в реакторе с натриево-свинцовым теплоносителем не приводит к нарушению ограничений для основных функционалов, характеризующих внутреннюю самозащищенность (табл.3).

В заключение отметим, что добавление небольшой части свинца (10% по массе) в натриевый теплоноситель позволяет повысить уровень внутренней самозащищенности РУ типа БН даже при самых неблагоприятных компоновочных решениях (малом шаге решетки твэлов, низкой доле естественной циркуляции).

Литература

1. Кузьмин А.М., Окунев В.С., Шмелев А.Н. О физических характеристиках быстрых реакторов, охлаждаемых сплавом Na-Pb // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - №2.
2. Wade D.C., Fujita E.K. Trends Versus Reactor Size of Passive Reactivity Shutdown and Control Performance // Nuclear Science and Engineering: 103, 122-195 (1989).
3. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьинский О.С. Жидкометаллические теплоносители. - М.: Атомиздат, 1976.

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.