

3. Поплавский В.М., Козлов Ф.А. Безопасность парогенераторов натрий—вода. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Основы пожарной теплофизики. М.: Стройиздат, 1978. 201 с.
5. Ivanenko V.N., Zybin V.A., Sergeyev V.F., Buksha Yu.K. Large-scale accidents with radioactive sodium burning at the BN-800 type NPP. — In: Proc. Intern. Fast Reactor Safety Meeting, v. 1. Snowbird, USA, 1990, p. 223—230.
6. Ivanenko V.N., Progonnova L.M., Bakuta N.N. The BOX computer code. — In: Proc. of an Intern. Topical Meeting on Sodium Cooled Fast Reactor Safety. Obninsk, Russia, Oct. 3—7, 1994, v. 3, p. 3-1—3-7.
7. Ivanenko V.N., Zybin V.A., Bakuta N.N. The AERO computer code. — Ibid., p. 3-8—3-12.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1. 758-96: Гигиенические нормативы. М., Центр сан.-эпидем. нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с.

УДК 621.039.526

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СМЕШАННОГО ОКСИДНОГО ТОПЛИВА В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ С НАТРИЕВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

*Казачковский О.Д., Елисеев В.А., Матвеев В.И., Цибуля А.М.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)*

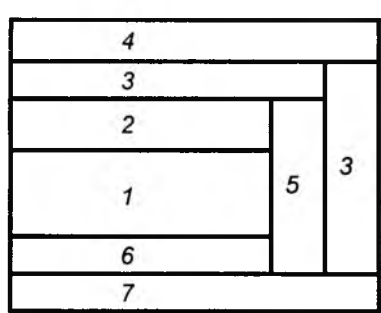
Быстрые реакторы на раннем этапе их создания оптимизировали на максимальный темп воспроизводства (минимальное время удвоения). Это, в частности, приводило к требованию высокой теплонапряженности активной зоны, создающей технические проблемы. Ныне ситуация существенно изменилась. Задача на скорейшую наработку ядерного топлива не является первоочередной. В этих условиях есть смысл пересмотреть подход к основным принципам проектирования быстрых реакторов и прежде всего отказаться от требования высокой теплонапряженности. Это позволяет улучшить важные характеристики, касающиеся экономики топливного цикла, ядерной безопасности, а также нераспространения плутония. Современный подход к проектированию быстрых реакторов состоит в отказе от внешних зон воспроизводства и обеспечении коэффициента воспроизводства активной зоны (КВА) на уровне, немного большем единицы. Такое воспроизводство позволит организовать замкнутый топливный цикл без подпитки внешним плутонием и химическую переработку отработавшего топлива без разделения плутония и урана. Последнее обстоятельство существенно снизит риск распространения плутония из такого топливного цикла, так как в нем плутоний в чистом виде не накапливается. Кроме того, целесообразно обеспечить минимальный (меньше $\beta_{эф}$) запас реактивности на выгорание при минимальном (также меньше $\beta_{эф}$) интегральном натриевом пустотном эффекте реактивности, что существенно повысит безопасность быстрого реактора в запроектных авариях. Превышение КВА над единицей зависит от выбранной микрокампании реактора. Для микрокампании 1—1,5 года, что рассматривается в настоящее время для перспективных быстрых реакторов, КВА должен быть на уровне 1,05—1,08. Поэтому интерес разработчиков сфокусировался на использовании более плотного, чем оксид, нитридного топлива.

В то же время заявленные условия могут быть обеспечены и при использовании оксидного топлива, но только при некотором увеличении его объемной доли в активной зоне. В существующих реакторах объемная доля топлива составляет около 40%, для обеспечения указанных параметров потребуется ее увеличение до 60%. Этого достаточно для достижения необходимого коэффициента воспроизводства. Кроме того, это приведет к уменьшению объемной доли натрия и, следовательно, снижению натриевого пустотного эффекта реактивности. Другим следствием уменьшения объемной доли натрия является необходимость снижения теплонапряженности активной зоны и, как следствие, увеличения ее размеров. Однако это допустимо, так как нет смысла проектировать современные быстрые реакторы, исходя из критерия минимального времени удвоения, а именно этот критерий и требовал создания быстрых реакторов с высокой теплонапряженностью.

В статье приводятся результаты расчетных исследований физических параметров БН-800 и -1800 с оксидным топливом. Эти результаты сравниваются с физическими характеристиками этих реакторов на нитридном топливе и показывается, что оксидное топливо при увеличении его объемной доли может обеспечивать все требуемые характеристики быстрых реакторов в соответствии с принятой концепцией.

Расчетные исследования физических характеристик БН-1800 при увеличенной объемной доле оксидного топлива. Реализация требований, предъявляемых к перспективному быстрому реактору (минимальный натриевый пустотный эффект реактивности, минимальный запас реактивности на выгорание и возможность организации внешнего топливного цикла без отделения плутония от урана при химической переработке облученного топлива), теоретически исследована применительно к нитриднему топливу (как на основе ^{15}N , так и природного азота). Для этого должны быть обеспечены доля топлива 0,45—0,47, высота активной зоны 75—80 см, над активной зоной должна располагаться натриевая полость высотой около 40 см. Вокруг активной зоны (снизу и сбоку) — стальные отражатели.

При рассмотрении активной зоны на оксидном топливе возникают следующие проблемы. Плотность оксидного топлива существенно ниже нитридного. Общепринятой считается плотность 8,6 г/см³, что в 1,43 раза меньше (по тяжелым ядрам) плотности нитридного топлива (11,5 г/см³). Для достижения требуемых свойств



Расчетная модель активной зоны БН-1800 (стержни СУЗ не показаны): 1 — активная зона; 2 — натриевая полость; 3 — борная защита; 4 — верхние конструкции; 5, 6 — боковой и нижний торцевой отражатель (сталь) соответственно; 7 — газосборники и другие конструкции

объемная доля оксидного топлива должна быть существенно увеличена. Желательно также увеличить и его плотность. До сих пор в проектах БН-800, -1800 закладывалась эффективная плотность оксидного топлива 8,6 г/см³. Представляется, что ее можно увеличить до 9,2—9,5 г/см³ в соответствии с опытом работы реактора «Суперфеникс» (Франция), где использовалось топливо плотностью ~9,2 г/см³. Предварительные оценки показали, что для достижения требуемого КВА 1,05—1,08 объемная доля топлива должна составлять 60%.

Расчетная модель реактора (см. рисунок) строилась с учетом детального распределения изотопного состава топлива и накопленных продуктов деления в пространстве (рассматривали 42 подзоны различного состава). Использовалась трехмерная

диффузионная программа ТРИГЕКС. Представленный на этой модели реактор не содержит никаких (внешних и внутренних) зон воспроизводства, в активной зоне используется топливо единого обогащения для высокой стабильности поля энерговыделения во времени. Последнее обстоятельство связано с выбором большой микрокампании реактора между перегрузками 500 эф. сут. Результаты относятся к установившемуся (равновесному) режиму равномерно частичных перегрузок реактора, переходный период от начальной загрузки до равновесного режима в данной статье не затрагивается. Исходные параметры такой активной зоны на смешанном оксидном топливе следующие:

Мощность, МВт:	
электрическая . . .	1800
тепловая . . .	4000
Высота активной зоны, см . . .	80
Высота натриевой полости, см . . .	40
Кампания топлива, эф. сут . . .	2000
Эффективная плотность топлива, г/см ³ . . .	9,5
Число ТВС в активной зоне . . .	648
Размер ТВС «под ключ», мм . . .	185
Число твэлов в ТВС . . .	331
Диаметр × толщина оболочки твэла, мм . . .	9,2×0,55
Объемная доля, %:	
топливо . . .	60
сталь . . .	23
натрий . . .	17
Число стержней СУЗ . . .	37
Максимальная глубина выгорания топлива, % тяж. ат. . . .	16
Максимальное тепловыделение, Вт/см . . .	480

Расчетные характеристики указанного варианта активной зоны БН-1800 в сравнении с вариантом на нитридном топливе таковы:

Топливо . . .	Оксид (UO ₂ —PuO ₂)	Нитрид (UN—PuN)
Эффективная плотность топлива, г/см ³ . . .	9,5	12
Высота активной зоны, см . . .	80	85
Диаметр × толщина оболочки твэла, мм . . .	9,2×0,55	8,6×0,55
Объемная доля, %:		
топливо . . .	60	48
сталь . . .	23	23
натрий . . .	17	29
Кампания топлива, сут. . . .	4×500	3×500
Обогащение топлива, % . . .	13,5	13,8
Натриевый пустотный эффект реактивности, % $\Delta k/k$. . .	−0,1	−0,03
Запас реактивности на выгорание (500 эф. сут), % $\Delta k/k$. . .	0,19	0,3
Коэффициент воспроизводства активной зоны (средний) . . .	1,077	1,06
Максимальное тепловыделение, Вт/см . . .	455	400
Средняя плотность тепловыделения, кВт/л . . .	250	370
Максимальная глубина выгорания, % тяж. ат. . . .	16,3	12,1
Средняя глубина выгорания, % тяж. ат. . . .	10,5	8,4

Приведенные результаты подтверждают возможность работы БН-1800 на смешанном оксидном топливе при его объемной доле 60% в замкнутом топливном цикле, обеспечивающем критичность реактора при химической переработке топлива без отделения плутония от урана, а также другие важные характеристики — почти нулевой натриевый пустотный эффект реактивности и минимальный запас реактивности на выгорание топлива. Следует отметить, что снятие требования минимального запаса реактивности на выгорание топлива, которое, вообще говоря, не следует из Правил ядерной безопасности, снизит объемную долю топлива при сохранении других характеристик реактора до 54%. Это позволит увеличить объемную долю натрия до 23% по сравнению с ранее рассмотренным вариантом, повысить плотность энерговыделения до 330 кВт/л и уменьшить радиальный размер активной зоны.

Расчетные исследования физических характеристик БН-800 на оксидном топливе при увеличенной объемной доле топлива. Проектный вариант БН-800, разработанный в 1992 г., не соответствует приведенной концепции. Реактор в этом варианте имеет коэффициент воспроизводства $K_B \sim 1,05$, который обеспечивается воспроизводством как в активной зоне ($K_{BA} \sim 0,73$), так и в нижней и боковой зонах воспроизводства.

Рассматривая различные варианты БН-800 с оксидным топливом, удовлетворяющие требованиям данной концепции, следует обратить внимание на один наиболее простой и эффективный вариант. В настоящее время разработан технический проект активной зоны БН-800 с нитридным топливом. В этом проекте принята расширенная активная зона по сравнению со старым проектом на оксидном топливе, и объемная доля топлива в нем увеличена до 46%. Если в такой активной зоне заменить нитридное топливо на оксидное, то можно получить приемлемые характеристики, удовлетворяющие основным требованиям концепции.

Расчетная модель расширенной активной зоны БН-800 на оксидном топливе аналогична модели, показанной на рисунке. Отличается она только наличием нижней торцевой зоны воспроизводства.

Результаты расчетных исследований усовершенствованного оксидного варианта БН-800 в сравнении с нитридным следующие:

Топливо . . .	Оксид (UO_2-PuO_2)	Нитрид ($UN-PuN$)
Эффективная плотность топлива, г/см ³ . . .	9,2	12,5
Высота активной зоны, см . . .	85	85
Высота нижней торцевой зоны воспроизводства, см . . .	35	—
Диаметр × толщина оболочки твэла, мм . . .	7,2×0,45	7,2×0,45
Число ТВС . . .	702	702
Максимальное тепловыделение, Вт/см . . .	414	426
Максимальная повреждающая доза, смещ./ат. . . .	112	105
Обогащение топлива, %:		
зона малого обогащения . . .	20,5	13,9
зона большого обогащения . . .	24,2	16,1
Максимальная глубина выгорания, % тяж. ат. . . .	11	8
Средняя глубина выгорания, % тяж. ат. . . .	7,6	5,4

КВ:		
активная зона . . .	0,933	1,045
нижний торцевой экран . . .	0,176	—
реактор . . .	1,109	1,045
Запас реактивности на выгорание, % $\Delta k/k$. . .	0,94	0,1
Натриевый пустотный эффект реактивности, % $\Delta k/k$. . .	0	0,34
Кампания топлива, эф. сут . . .	5×140	5×140

Из этих результатов можно заключить, что:

использование оксидного топлива в рамках конструкции активной зоны для нитридного топлива позволяет достичь необходимый КВ и замкнутый топливный цикл без подпитки плутонием извне;

в таком топливном цикле минимальный риск распространения плутония обеспечивается за счет использования технологии соосаждения плутония и урана из растворов для получения смешанного оксидного топлива;

запас реактивности на выгорание ($\sim 1\% \Delta k/k$) существенно снижен по сравнению с традиционным оксидным вариантом ($\sim 3\% \Delta k/k$).

Для отказа от нижнего воспроизводящего экрана и реализации топливного цикла с неразделением урана и плутония при переработке необходимо дальнейшее увеличение объемной доли оксидного топлива до 60%. Для обеспечения такой доли топлива в ТВС БН-800 число твэлов следует сократить со 127 до 91, соответственно увеличив их диаметр. Это потребует дополнительного расширения активной зоны с 702 до 920 ТВС. Такое возможно при отказе от внутриреакторного хранилища (т.е. при переходе на прямую выгрузку ТВС) и существенном уменьшении толщины внутриреакторной защиты. Каких-либо принципиальных ограничений по расширению активной зоны в этом реакторе нет. Высота активной зоны может быть повышена с 85 до 90 см. Исходные параметры активной зоны БН-800 с его максимально возможной объемной долей оксидного топлива следующие:

Число твэлов в ТВС . . .	91
Диаметр × толщина оболочки твэла, мм . . .	9,3×0,5
Эффективная плотность топлива, г/см ³ . . .	9,2
Размер ТВС «под ключ» × толщина стенок, мм . . .	98 × 2
Межпакетный зазор, мм . . .	2
Число ТВС . . .	925
Объемная доля, %:	
топливо . . .	0,57
сталь . . .	0,23
натрий . . .	0,2
Высота активной зоны, см . . .	90
Высота натриевой «полости», см . . .	35
Кампания топлива, эф. сут . . .	4×300
Максимальная глубина выгорания, % тяж. ат. . .	11

Наибольшие проблемы в оптимизации такой активной зоны связаны с распределением поля энерговыделения. В результате анализа вариантов была выбрана оптимальная картограмма расположения ТВС с несимметричными границами зон малого и большого обогащения. Но за счет этого удалось скомпенсировать нерав-

номерность поля тепловыделения вследствие как несимметричности внешней границы активной зоны (из-за элеватора выгружаемых ТВС), так и двух полупогруженных регулирующих стержней. Кроме того, в центре активной зоны и с противоположной стороны от элеватора исключительно из соображений выравнивания поля тепловыделения предусмотрены две гильзы под органы СУЗ (стальные сборки для этого слишком эффективны). В принципе, эти дополнительные гильзы можно использовать в качестве пассивных органов СУЗ. В результате удалось достичь приемлемого выравнивания тепловыделения. Основные характеристики такой активной зоны следующие:

Максимальное тепловыделение, Вт/см . . .	465
Максимальная мощность ТВС, МВт . . .	2,98
Обогащение топлива, %:	
зона малого обогащения . . .	14,3
зона большого обогащения . . .	17,7
Максимальная глубина выгорания, % тяж. ат. . . .	12
Средняя глубина выгорания, % тяж. ат. . . .	8
КВА, начало/конец микрокампании . . .	1,07/1,03
Запас реактивности на выгорание, % $\Delta k/k$. . .	0,1
Натриевый пустотный эффект реактивности, % $\Delta k/k$. . .	0,12
Баланс топлива (выгрузка/загрузка), кг . . .	5320/5490
Эффективность системы СУЗ, % $\Delta k/k$. . .	3,6

Можно видеть, что в этом случае необходимые требования выполняются — близкие к нулю натриевый пустотный эффект реактивности и запас реактивности на выгорание, а также положительный баланс топлива при работе реактора в замкнутом топливном цикле (при использовании переработки топлива без разделения урана, плутония и актиноидов).

Заключение. Результаты расчетно-теоретических исследований перспективных активных зон быстрых реакторов с натриевым теплоносителем на оксидном топливе на примере БН-1800, -800 показывают принципиальную возможность достижения высокого уровня воспроизводства в активной зоне, соответствующего нитриднему топливу. Для этого необходимо увеличить объемную долю оксидного топлива до 60%. Следствием этого является увеличение объема активной зоны и соответственно снижение ее объемной теплонапряженности приблизительно в 2 раза по сравнению с традиционными быстрыми реакторами. Это обстоятельство, однако, не является препятствием для проектирования перспективных быстрых натриевых реакторов, так как минимальное время удвоения в настоящее время не является критерием при выборе и оптимизации параметров таких реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казачковский О.Д., Елисеев В.А., Матвеев В.И., Цибуля А.М. Перспективы использования МОХ-топлива в быстрых реакторах с натриевым охлаждением. — В сб.: Научно-техн. форум «Ядерные реакторы на быстрых нейтронах». Обнинск, 8—12 декабря 2003 г., с. 66—67.
2. Багдасаров Ю.Е., Поплавский В.М., Матвеев В.И., Елисеев В.А. Естественная безопасность перспективной ядерной технологии на основе БН-800. — Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 6, с. 54—62.