

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ПРОЕКТА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-1200

Чуйкина А. В., Аникин М.С., Нуркин А. С.

Научный руководитель: Наймушин А. Г., к.ф.-м.н., ст. преподаватель
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: flipped2010@mail.ru

В последнее время тенденции развития атомной промышленности в России направлены в сторону развития быстрых реакторов. Россия является лидером в проектировании реакторов на быстрых нейтронах, благодаря богатому опыту использования реакторов БОР-60, БН-350 и БН-600. Развитие технологий реакторов на быстрых нейтронах привело к строительству энергоблока с реакторной установкой БН-800 и созданию других проектов: БН-1200, БН-1800, реакторов типа БРЕСТ и СВБР.

Поскольку реакторная установка БН-1200 находится в стадии проектирования, остается открытым вопрос выбора топливной композиции.

В настоящей статье рассмотрены следующие варианты материальных композиций:

- тепловыделяющие сборки с таблеточным МОКС-топливом (таблеточное топливо $(U+Pu)O_2$);

- тепловыделяющие сборки с виброуплотненным МОКС-топливом (виброуплотненное топливо 93 % масс. $(U+Pu)O_2 + 7$ % масс. $U_{мет. ест.}$);

- тепловыделяющие сборки с мононитридным топливом (регенерированное таблеточное топливо $(U+Pu)N$ с повышенным содержанием изотопов плутония).

Выбор первых двух топливных композиций обусловлен тем, что это основные варианты для реакторов БН-800 и БН-1200 [1,2].

Выбор нитридного топлива обусловлен тем, что его рассматривают как перспективное топливо для реактора БН-1200, поскольку такое топливо обладает рядом преимуществ относительно оксидного топлива.

Одним из этих преимуществ является низкая температура нитридного топлива, которая предотвращает перегрев и разрушение оболочек при аварийной потере охлаждения и вводе реактивности [3].

Также особенностью нитридного, топлива в отличие от оксидного является более высокая степень удержания газовых продуктов деления и химически активных элементов, таких, как цезий, йод, селен, теллур и т.д. Это уменьшает химическое взаимодействие агрессивных продуктов деления с оболочками твэл [4]. При прочих равных условиях, выход газообразных продуктов деления у нитридного топлива меньше, чем у оксидного.

Создание расчетной модели

Гетерогенная модель активной зоны реактора БН-1200 была создана с помощью прецизионной программы MSU. Тепловыделяющие сборки и

сборки зон воспроизводства рассматривались отдельными гомогенными структурами.

Поскольку в активной зоне имеются ячейки со стержнями регулирования, отдельно моделировались ячейки, в которых стержни системы управления и защиты находятся на различной глубине погружения.

Активная зона представляет собой зону деления, окруженную нижней торцевой и боковой зонами воспроизводства.

Поскольку тепловыделяющие сборки реакторов БН-800 и БН-1200 аналогичны, для верификации расчетные параметры сравнивались с эксплуатационными значениями сборок БН-800.

Отклонение от эксплуатационных значений не превышало в среднем 7 %, что позволяет говорить о том, что разработанная модель адекватно описывает сам реактор.

Коэффициент воспроизводства

Коэффициент воспроизводства для активной зоны с использованием различных топливных композиций, в двух конфигурациях активной зоны представлен в таблице 1.

Таблица 1 — Коэффициент воспроизводства

Наименование	Значение		
	МОКС	Вибро-МОКС	Мононитрид
Зона деления	0,92	0,93	1,039
Реактор в целом	1,22	1,23	1,339

Наибольшее значение коэффициента воспроизводства наблюдается для активной зоны с использованием топливных композиций с мононитридным топливом. Использование мононитридного топлива также позволяет достигать значения коэффициента воспроизводства больше единицы даже при отсутствии дополнительных зон воспроизводства.

Оценка коэффициента воспроизводства позволяет сделать вывод о том, что мононитридное топливо может служить наиболее удачным кандидатом для реактора-размножителя.

Энергетические характеристики

Важнейшими параметрами при эксплуатации любого ядерного реактора являются начальный запас реактивности и время работы между перегрузками топлива.

В таблице 2 представлены основные энергетические характеристики БН-1200 с использованием различных топливных композиций.

Таблица 2 — Энергетические характеристики

Наименование	Значение		
	МОКС	Вибро-МОКС	Мононитрид
Запас реактивности	3,87	3,50	3,19
Длина кампании	155	155	175
Глубина выгорания	6,5	7,1	8,4

Несмотря на относительно низкий запас реактивности при применении мононитридного топлива, длина кампании топлива увеличивается, поскольку достигаются значительные показатели глубины выгорания.

Увеличивается эффективность использования топлива, что позволяет прогнозировать положительный экономический эффект при использовании мононитридной топливной загрузки.

Эффекты реактивности

Одним из критериев выбора топливной композиции является наличие отрицательной обратной связи при повышении мощности или температуры реактора. Натриевый пустотный эффект реактивности получен исходя из расчётов $K_{\text{эф}}$ для двух состояний активной зоны: активная зона, заполненная натрием; активная зона с полным удалением натрия из соответствующей области.

Расчитанная совокупность эффектов реактивности представлена в таблице 3.

Таблица 3 — Эффекты реактивности

Наименование	Значение		
	МОКС	Вибро-МОКС	Мононитрид
Суммарный температурно-мощностной эффект реактивности, $\%(\Delta K/K)$	-1,09	-1,09	-1,12
Натриевый пустотный эффект	-0,124	-0,182	-0,160
Натриевый плотностной эффект	-0,009	-0,010	-0,012

Согласно полученным результатам, все топливные композиции обладают схожими значениями эффектов реактивности, однако, использование мононитридного топлива в условиях нормальной эксплуатации, позволяет повысить стабильность работы на номинальном уровне мощности за счет большего температурно-мощностного эффекта.

Эффективность органов регулирования

Для сравнения эффективности СУЗ активной зоны различным топливом, были определены интегральные веса стержней, которые определялись как изменение реактивности при подъеме стержня из нижнего положения в крайнее верхнее при различных комбинациях стержней,

погруженных в активную зону. Расчеты проводились на момент начала микрокампании.

В таблице 4 приведены веса стержней системы регулирования и защиты при различных топливных композициях.

Таблица 4 — Веса стержней системы регулирования и защиты

Параметр	Значение		
	МОКС	Вибро-МОКС	Мононитрид
Максимальный запас реактивности, %	3,87	3,50	3,19
Суммарная эффективность	7,40	7,21	7,56

Как следует из таблицы 4, требуемый правилами ядерной безопасности [5] уровень подкритичности при останове реактора — 2 % $\Delta K/K$ — надежно обеспечивается при использовании всех видов топливных композиций даже в самых неблагоприятных ситуациях.

Вывод

Рассмотрены три варианта топливных композиций для реакторной установки на быстрых нейтронах БН-1200. Результаты работы позволяют сделать вывод о том, что по совокупным нейтронно-физическим характеристикам мононитридное топливо может служить наиболее удачным кандидатом в проекте реактора БН-1200.

К неоспоримым преимуществам нитридного топлива относятся увеличенная на 12 % длина кампании, на 2 % большая глубина выгорания топлива и повышенный на 9 % коэффициент воспроизводства, что позволяет эффективнее использовать топливо.

Список использованных источников

1. Техническое задание на опытно-конструкторскую работу. Сборка тепловыделяющая БН-800 с таблеточным МОКС-топливом. // ОАО «ОКБМ им. Африкантова».
2. Техническое задание на опытно-конструкторскую работу. Сборка тепловыделяющая БН-800 с виброуплотненным МОКС-топливом. // ОАО «ОКБМ им. Африкантова».
3. Рогозкин Б. Д. И др. Послереакторные исследования мононитридного и оксидного плутониевого топлива с инертной матрицей выгоранием ~ 19% ТЯЖ. АТ. В БОР-60 // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – №. 6.
4. Рогозкин Б. Д. И др. Термохимическая стабильность, радиационные испытания, изготовление и регенерация моно-нитридного топлива // Атомная энергия. – 2003. – Т. 95. – №. 6. – С. 428-438.
5. НП-082-07. — Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. — Нормы и правила. — Введ. 2008-06-01.