



НИКИЭТ
РОСАТОМ

Исследование нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 с изотопно-модифицированным СНУП топливом

«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики», г. Обнинск

Докладчик

Фёдоров И.А.

Инженер

Авторы: Федоров И.А., Солдатов Е.О., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Баловнев А.В.

28.05.2024 – 31.05.2024

Цель работы



Цель работы: исследование нейтронно-физических характеристик активной зоны БР-1200 с обогащенным по ^{15}N топливом.

Для достижения цели выполнены следующие задачи:

- 1) Анализ нейтронно-физических характеристик БР-1200 при использовании СНУП топлива с повышенным содержанием ^{15}N
- 2) Разработка способов компенсации эффектов, связанных с использованием обогащенного по ^{15}N топлива
- 3) Оценка потребности в топливе, плутонии и ^{15}N для пуска БР-1200 и работы в режиме ЗЯТЦ

Описание ПК FACT-BR



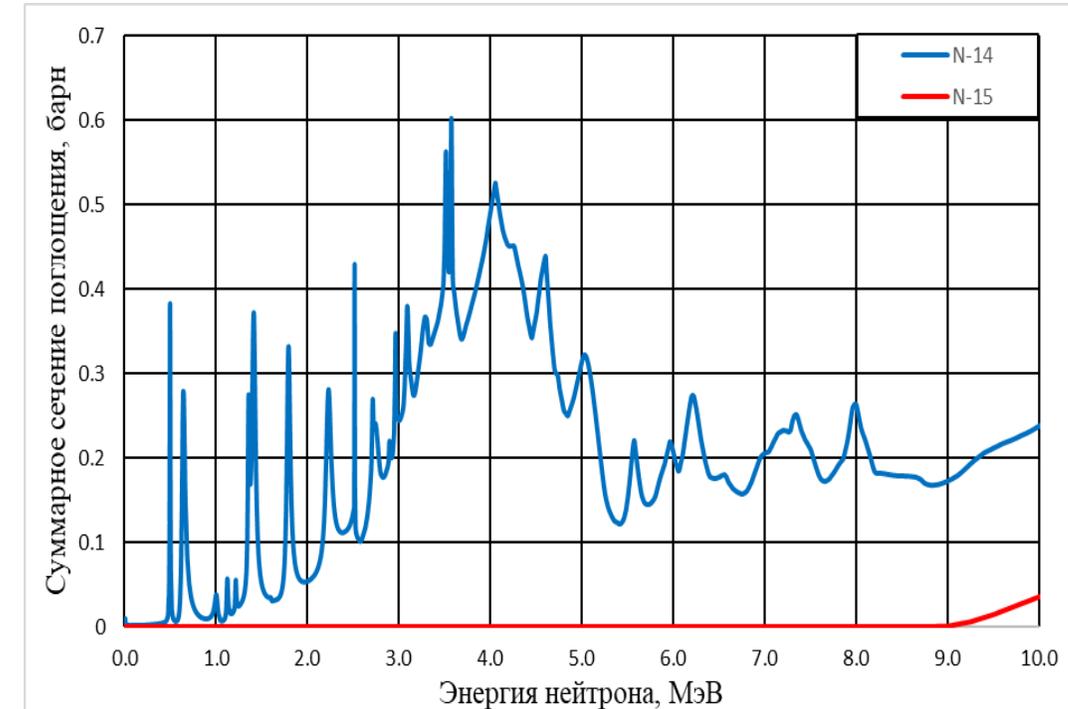
НИКИЭТ
РОСАТОМ

- Разработан специалистами АО «НИКИЭТ» и активно развивается;
- 26-групповое диффузионное приближение;
- Уравнения диффузии решаются нодальным методом с коррекцией токов нейтронов на границе расчетной ячейки;
- Система подготовки нейтронных сечений – CONSYST с библиотекой БНАБ-93;
- Корректирующие коэффициенты получены с использованием ПК MCU-BR;
- ПК верифицирован для расчетов быстрого реактора со свинцовым теплоносителем и СЧУП топливом на базе:
 - экспериментов на стендах БФС и ZPPR
 - экспериментов на реакторе БН-600
 - международных бенчмарках БН-600 и RBEC-M
 - кросс-верификации с MCU-BR, MCNP, TRIGEX



Нейтронно-физические оценки применения ^{15}N

- При расчете баланса нейтронов поглощение нейтронов на изотопе ^{14}N составляет ~ 3 % по всей а.з.
- Природный азот состоит из двух стабильных изотопов – ^{14}N (99,7 %) и ^{15}N (0,3 %).
- Изотоп ^{15}N практически не поглощает нейтроны, в результате чего часть нейтронов поглощается в топливе, увеличивая запас реактивности (ЗР) и коэффициент воспроизводства (КВ) в активной зоне реактора БР-1200.
- Эффект реактивности при использовании СНУП топлива с повышенным содержанием ^{15}N (99 %) составляет $6 \beta_{эф}$.
- Увеличение КВ при использовании СНУП топлива с повышенным содержанием ^{15}N приводит к изменению хода запаса реактивности по кампании.
- Избыток запаса реактивности в стартовой загрузке позволяет снизить массу СНУП топлива в первичной загрузке.
- Для снижения КВ необходимо увеличить массовую долю плутония в топливе.



Микроскопическое сечение поглощения на ^{14}N и ^{15}N

Компенсация эффектов при увеличении содержания ^{15}N



Рассмотрены два направления снижения массы топлива в реакторе БР-1200:

- 1) Компоновка активной зоны сохраняется, в ТВС варьируется высота топлива и диаметр твэл.
- 2) Компоновка а.з. и конструкция ТВС варьируется (изменяется количество ТВС в активной зоне и число твэлов в ТВС).

Подборка конфигураций осуществляется с учетом следующих ограничений:

- плотность топливного столба лежит в диапазоне (11,8 - 12,5) г/см³ ;
- температура на внутренней поверхности оболочки не более 640 градусов;
- запас реактивности лежит в пределах $1 \beta_{\text{эф}}$;
- КВ составляет приблизительно 1,11.

По итогам вариантных расчетов разработаны шесть расчетных моделей для анализа нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 с обогащенным по ^{15}N топливом. В данной работе рассмотрены следующие расчетные модели:

Базовая модель – расчетная модель БР-1200 со СНУП топливом природного содержания ^{15}N , содержащая 397 ТВС.

Расчетные модели № 1 – 5 – модели БР-1200 с обогащенным по ^{15}N топливом с сохранением компоновки а.з. и различными высотами топлива и диаметров твэл.

Расчетная модель № 6 – модель БР-1200 с обогащенным по ^{15}N топливом, содержащая 331 ТВС с увеличенным числом твэлов в ТВС.

Характеристики расчетных моделей № 1 – 5



НИКИЭТ
РОСАТОМ

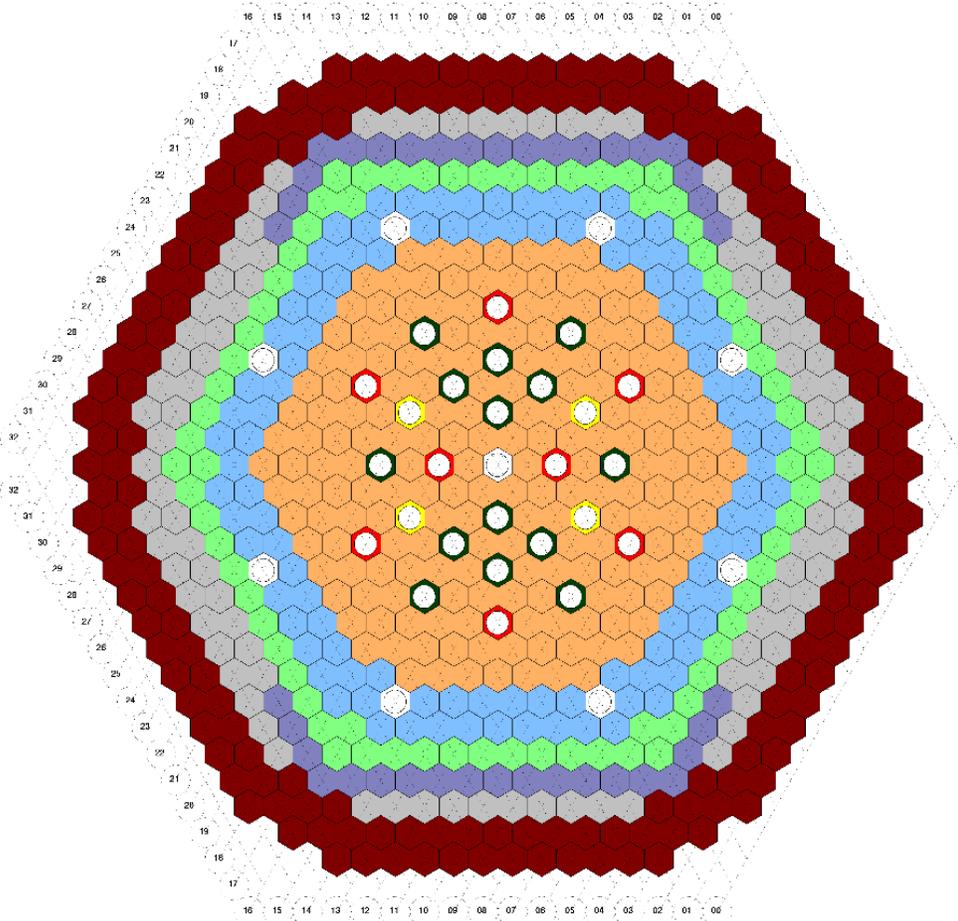
Параметр	Базовая модель	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5
Высота топливного столба, см	150	110	120	130	140	150
Диаметр таблетки ЦЗ/СЗ/ПЗ, мм	7,1 / 7,6 / 8,5	7,1 / 7,6 / 8,5	7,0 / 7,5 / 8,3	6,8 / 7,3 / 8,2	6,7 / 7,2 / 8,1	6,6 / 7,1 / 7,9
Плотность топлива, г/см ³	12,10	12,00	12,05	12,20	12,00	12,15
Доля плутония, % масс.	13,60	14,05	13,95	14,10	14,10	14,05
Запас реактивности, βэф	0,60	0,71	0,61	0,67	0,60	0,59
Коэффициент воспроизводства	1,11	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12
Максимальная мощность ТВС ЦЗ, Вт	9,16	8,74	8,95	8,86	8,93	9,08
T _{max} оболочки твэл, °С	604	624	619	614	610	607
Эффективность РО СУЗ, %δК/К	5,76	5,70	5,98	6,06	6,26	6,38
Масса топливной загрузки, кг	49644	36240	38432	40150	41364	43356

Расчетная модель № 6

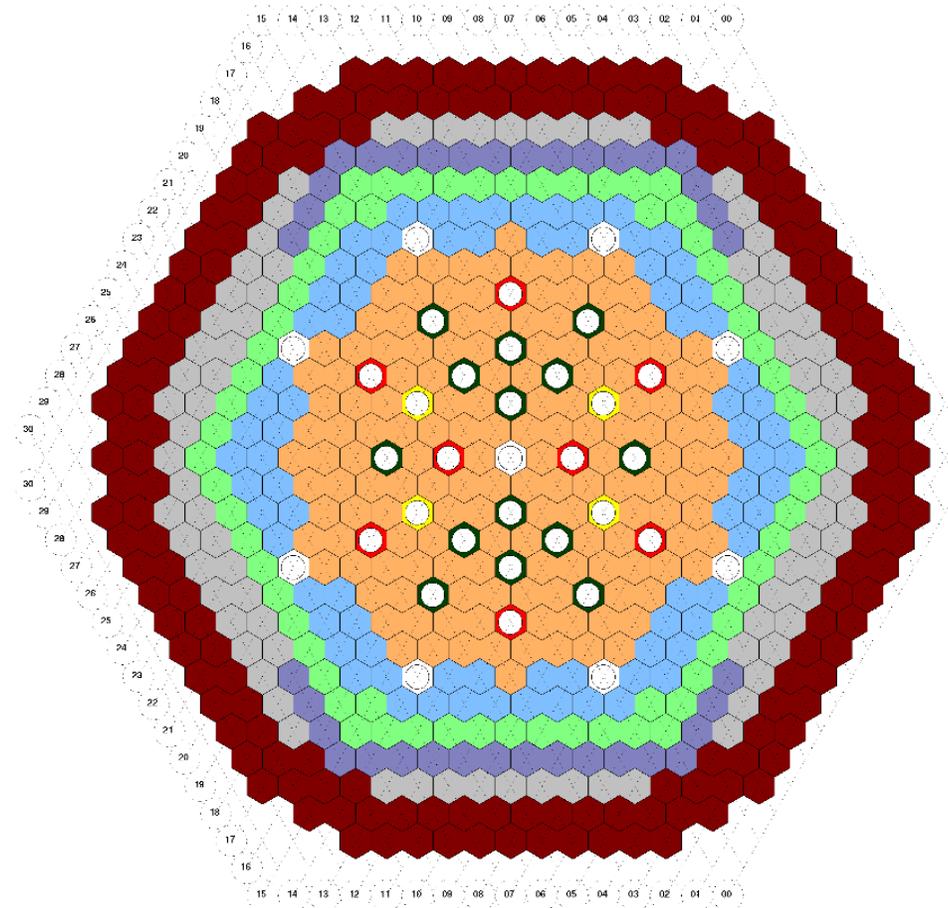


НИКИЭТ
РОСАТОМ

Компоновка с 397 ТВС



Компоновка с 331 ТВС



- При изменении компоновки а.з. шаг ТВС, площадь ТВС оставались неизменными
- Для снижения линейной нагрузки на твэл изменена конструкция ТВС (163 твэл) с увеличением количества твэлов до 253 в штатной ТВС и 132 в ТВС с РО .

Характеристики расчетной модели № 6

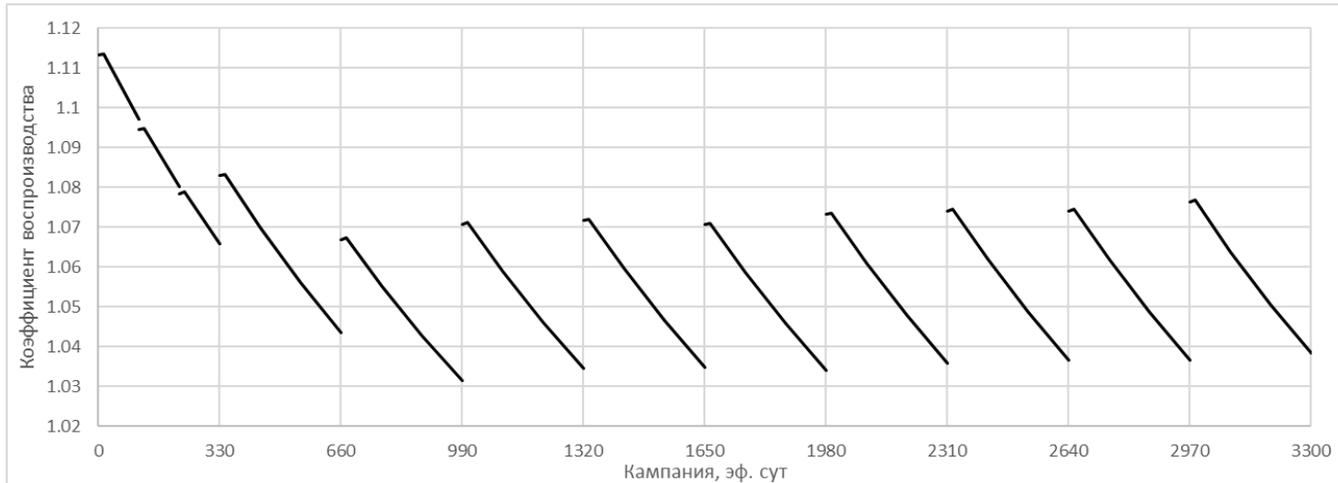
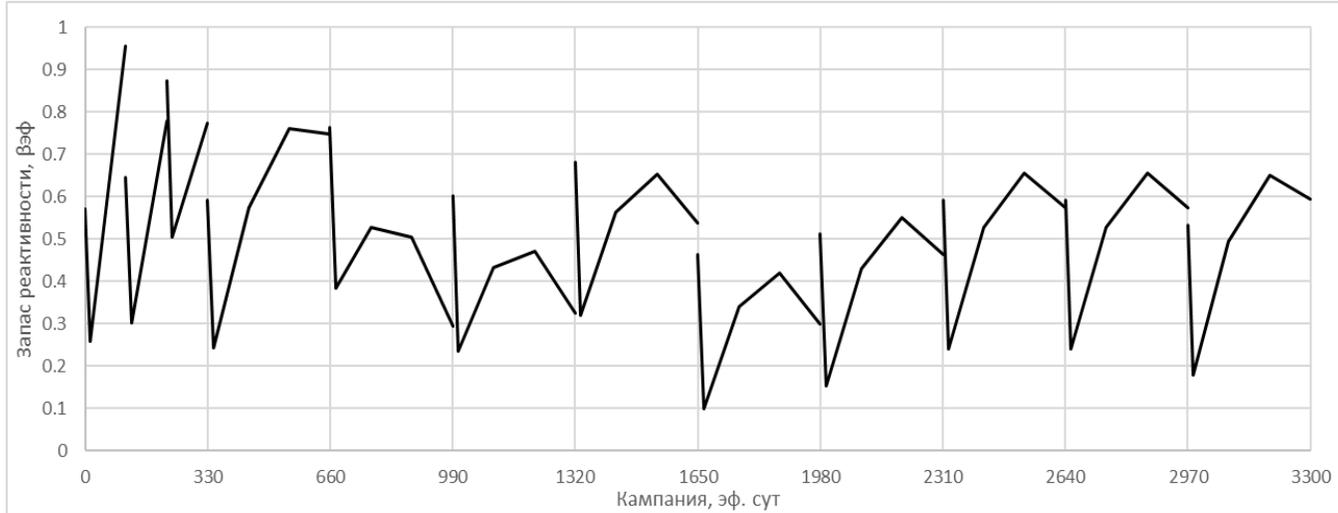


НИКИЭТ
РОСАТОМ

Параметр	Базовая модель	Модель 6
Высота топливного столба, см	150	150
Диаметр таблетки ЦЗ/СЗ/ПЗ, мм	7,1 / 7,6 / 8,5	5,6 / 6,1 / 6,8
Количество ТВС, шт	397	331
Количество твэл в ТВС ЦЗ/СЗ/ПЗ, шт	163	253
Количество твэл в ТВС с РО, шт	72	132
Плотность топлива, г/см ³	12,10	12,00
Доля плутония, % масс.	13,60	13,95
Запас реактивности, βэф	0,60	0,73
Коэффициент воспроизводства	1,11	1,12
Максимальная мощность ТВС ЦЗ, Вт	9,16	10,9
T _{max} оболочки твэл, °С	604	601
Эффективность РО СУЗ, %δК/К	5,76	7,23
Масса топливной загрузки, кг	49644	40488

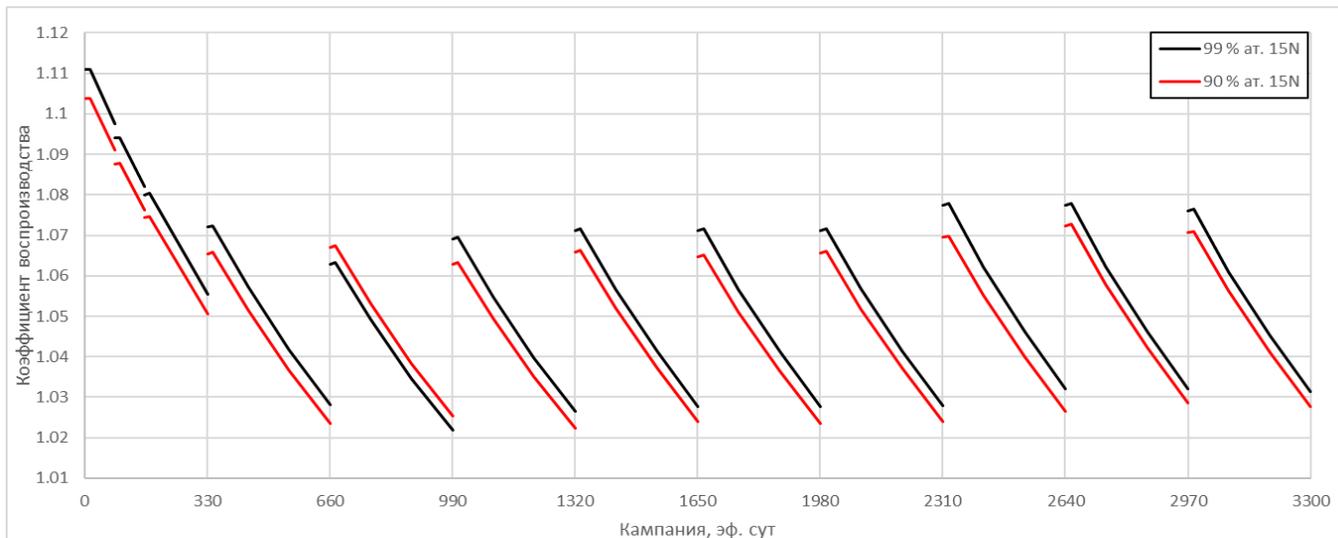
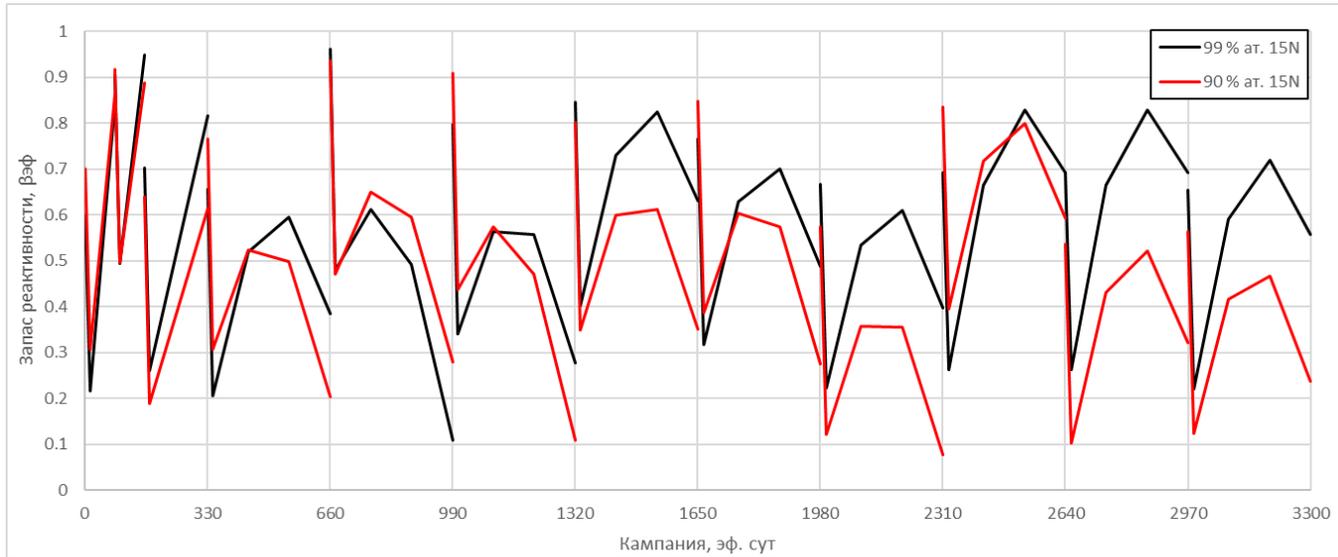
- Для расчетных моделей № 4, № 6 проведены расчеты 10 микрокампаний по 330 эф. сут. с остановками на 35 суток. Расчет кампании реактора при работе на номинальной мощности проводится с учетом ряда условий:
 - запас реактивности не превышает $1 \beta_{эф}$,
 - максимальная глубина выгорания топлива не более 12,5 % т.а. в точке,
 - продолжительность внешнего топливного цикла – 3 года,
 - весь ^{15}N возвращается в топливный цикл без потерь.
- Для расчетной модели № 4 проведено исследование влияния снижения обогащения по ^{15}N с 99 ат. % до 90 ат. % в СНУП топливе.

Результаты расчета кампании базовой модели (397 ТВС, 163 твэл, Наз = 150 см)



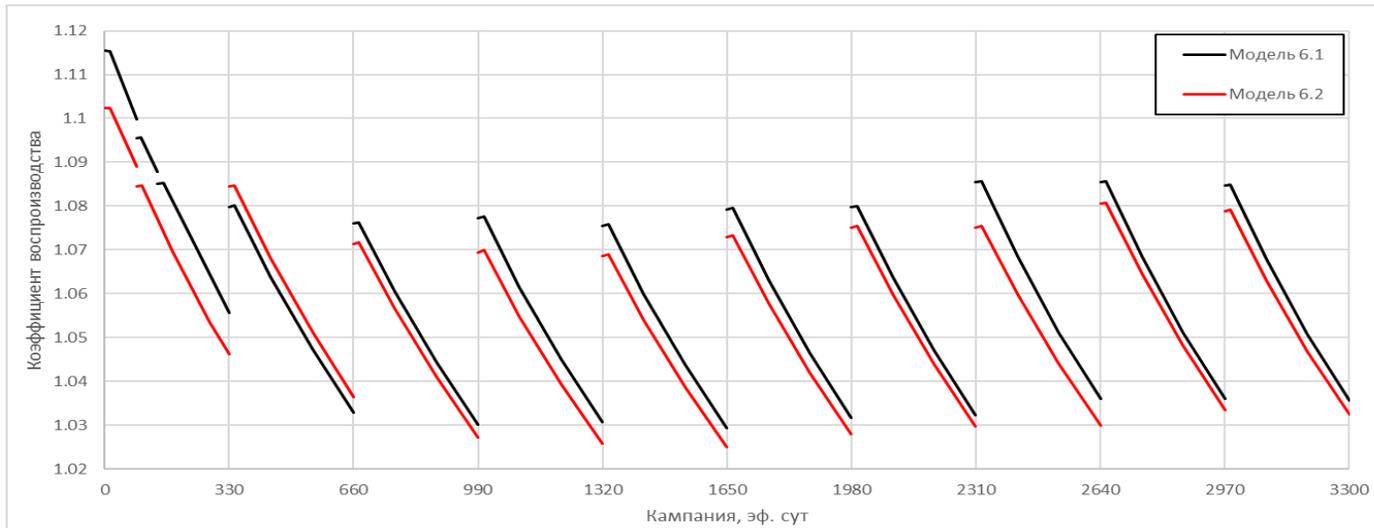
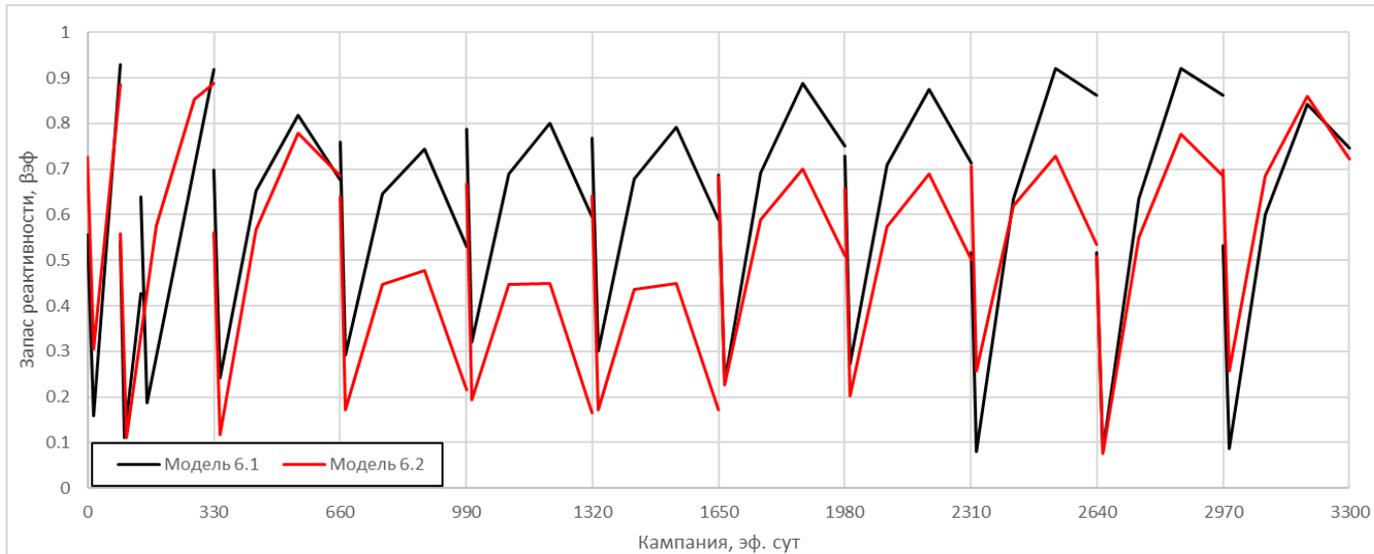
- Начиная с пятого года в перегрузках используется только собственное регенерированное топливо.
- На всем временном диапазоне запас реактивности не превышает $1 \beta_{эф}$.
- В ходе эксплуатации коэффициент воспроизводства лежит в диапазоне от 1,11 до 1,03.
- Средняя эффективность РО СУЗ составляет 5,25 % δК/К
- В среднем при перегрузках требуется 104 ТВС. Среднее выгорание выгружаемого топлива – 8,0 % т.а.

Результаты расчета кампании модели 4 (397 ТВС, 163 твэл, Наз = 140 см)



- Начиная с пятого года в перегрузках используется только собственное регенерированное топливо.
- На всем временном диапазоне запас реактивности не превышает $1 \beta_{эф}$.
- В ходе эксплуатации коэффициент воспроизводства лежит в диапазоне от 1,11 до 1,02.
- Средняя эффективность РО СУЗ составляет 5,25 % $\delta K/K$
- В среднем при перегрузках требуется 118 ТВС. Среднее выгорание выгружаемого топлива – 8,5 % т.а.
- Уменьшение содержания ^{15}N с 99 ат. % до 90 ат. % не оказывает существенного влияния на нейтронно-физические характеристики

Результаты расчета кампании модели 6 (331 ТВС, 253 твэл, Наз = 150 см)



➤ Для работы реактора с запасом реактивности до $1 \beta_{эф}$ составлено две расчетных модели с уменьшенной до $11,8 \text{ г/см}^3$ плотностью - № 6.1 и № 6.2 с дополнительно сниженным числом твэл в ТВС с РО с 132 шт до 90 шт.

➤ Начиная с пятого года в перегрузках используется только собственное регенерированное топливо.

➤ На всем временном диапазоне запас реактивности не превышает $1 \beta_{эф}$.

➤ В ходе эксплуатации коэффициент воспроизводства лежит в диапазоне от 1,12 до 1,02.

➤ Средняя эффективность РО СУЗ составляет 7,02 % $\delta\text{K/K}$ в модели 6.1 и 6,65 % $\delta\text{K/K}$ в модели 6.2

➤ В среднем при перегрузках требуется 100 ТВС. Среднее выгорание выгружаемого топлива – 8,7 % т.а.

Анализ результатов



НИКИЭТ
РОСАТОМ

Базовая модель - 397 ТВС, 163 твэл, Наз = 150 см

Расчетная модель № 4 - 397 ТВС, 163 твэл, Наз = 140 см

Расчетная модель № 6 - 331 ТВС, 253 твэл, Наз = 150 см

Характеристика	Модель				
	Базовая модель	№ 4 (99 ат. % ¹⁵ N)	№ 4 (90 ат. % ¹⁵ N)	№ 6.1	№ 6.2
Потребность в СНУП топливе до замыкания ЯТЦ, кг	88530	78813	79482	75810	74618
Потребность во внешнем плутонии для замыкания ЯТЦ, кг	11306	10411	10531	9927	9844
Потребность в ¹⁵ N для замыкания ЯТЦ, кг	-	4494	4131	4147	4081
Средняя эффективность РО СУЗ, % δК/К	5,25	5,60	5,60	7,02	6,65
Средняя потребность ТВС, шт	104	118	118	100	100
Среднее выгорание выгружаемого топлива, % т.а.	8,0	8,5	8,5	8,7	8,7

Заключение

- Проведен анализ основных нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 с обогащенным по ^{15}N СНУП топливом.
- Изотоп ^{15}N практически не поглощает нейтроны, что позволяет снизить массу топливной загрузки при использовании изотопно-модифицированного СНУП топлива.
- При использовании СНУП топлива с повышенным содержанием ^{15}N для пуска реактора БР-1200 требуется на 16 % меньше топлива, но при этом необходимо иметь 4,1 т ^{15}N .
- Для вариантов с изотопно-модифицированным СНУП топливом среднее выгорание выгружаемого топлива увеличивается с 8,0 % т.а. до 8,7 % т.а.
- Использование СНУП топлива с повышенным содержанием ^{15}N приводит к увеличению эффективности РО СУЗ.

**Спасибо за
внимание**

Федоров И.А

