

# Работа реактора БН-1200 в системе двухкомпонентной ядерной энергетики

**Н.Д. Дырда, У.Ф. Шереметьева, И.Р. Макеева**

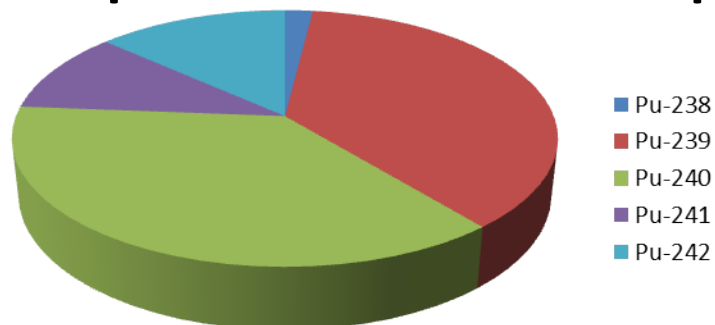
# Введение

- Суммарная мощность работающих АЭС в России - 26,6 ГВт. Доля АЭС в энерговыработке за 2015 год - 18,6 % [1].
- Российский парк ТР представлен РУ ВВЭР (19 РУ) и РБМК (11 РУ). ДМ в топливе ТР является оксида урана, с обогащением по U-235 4,5 % (ВВЭР-1000) и 2,5% (РБМК-1000) [2].
- Действующие БР представлены двумя РУ: БН-600 и БН-800.
- Оценки, выполненные по ПК АТЭК [3], показывают, что на конец 2016 года накоплено 5787 т ОЯТ ВВЭР-1000 и 17800 т ОЯТ РБМК-1000.

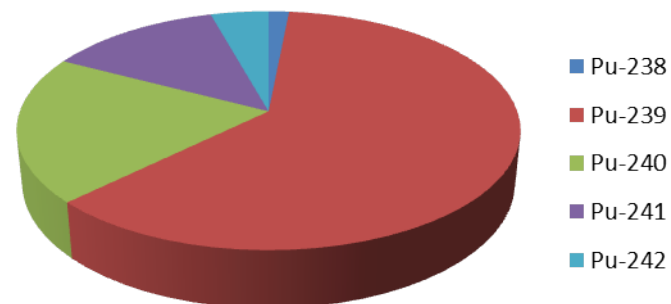
# Введение

- Плутоний из ОЯТ ВВЭР, предполагается использовать в качестве ДМ для МОХ–топлива БН-1200 и БР-1200 [4,5]. Плутоний из ОЯТ РБМК существенно отличается по изотопному составу от плутония из ОЯТ ВВЭР.
- Для эффективного вовлечения всего нарабатываемого плутония в производство энергии рассматривается работа системы из ТР и БР (двухкомпонентная ЯЭ система). Эффективность топливоиспользования определяется предельным соотношением ТР и БР (при полном самообеспечении ДМ в стационарном режиме).
- БН-1200 в такой системе выполняет функции наработчика ДМ для изготовления топлива ТР. Кроме этого, БР позволяет сжигать в своей АЗ МА из ТЦ ТР.

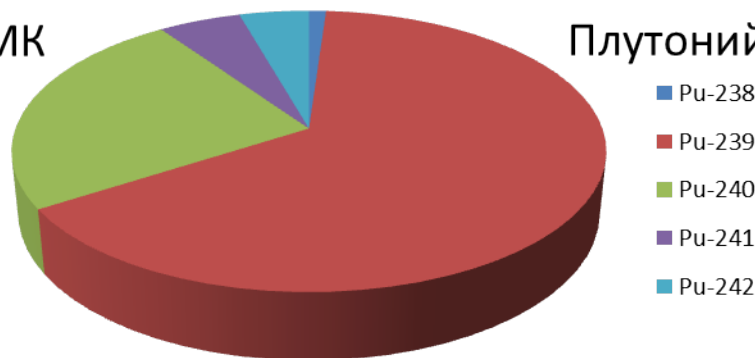
# Массовые доли изотопов плутония для различных стартовых загрузок ТР и БР



Плутоний из ОЯТ РБМК



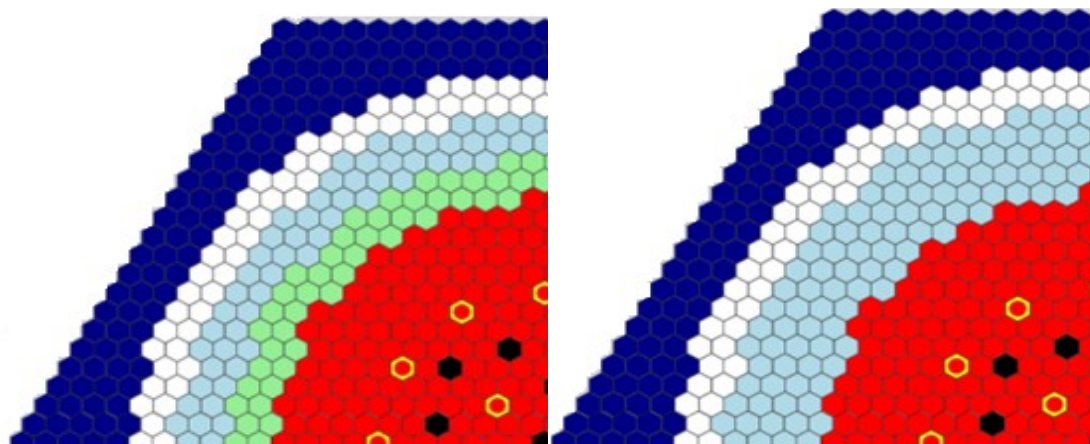
Плутоний из ОЯТ ВВЭР



Плутоний из ОЯТ БН-1200

Изотопный состав плутония из ОЯТ АЗ БН-1200 при работе в равновесном режиме близок к плутонию из ОЯТ ВВЭР, работающих на обогащенном уране, это делает привлекательным использование такого плутония в качестве ДМ для изготовления свежего топлива быстрых реакторов типа БН-1200.

# Фрагменты АЗ БН-1200 с различными компоновками



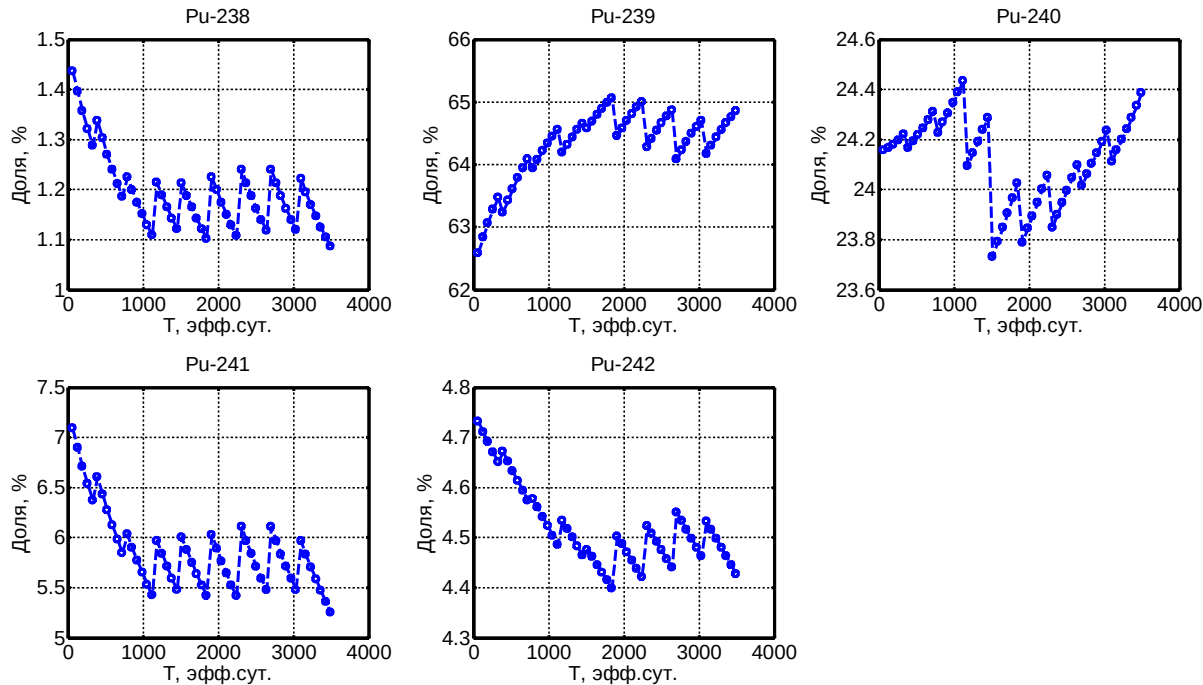
Фрагменты картограмм реактора БН-1200

Слева изображен фрагмент картограммы [6] с боковым бланкетом (стартовая загрузка МОХ-топливом, нитридным топливом из энергетического плутония и пористым металлическим плутониевым топливом).

Фрагмент картограммы справа используется при расчете варианта с нитридным топливом из энергетического плутония и топливом из обогащенного урана. Длительность микрокампании 330 эффективных суток.

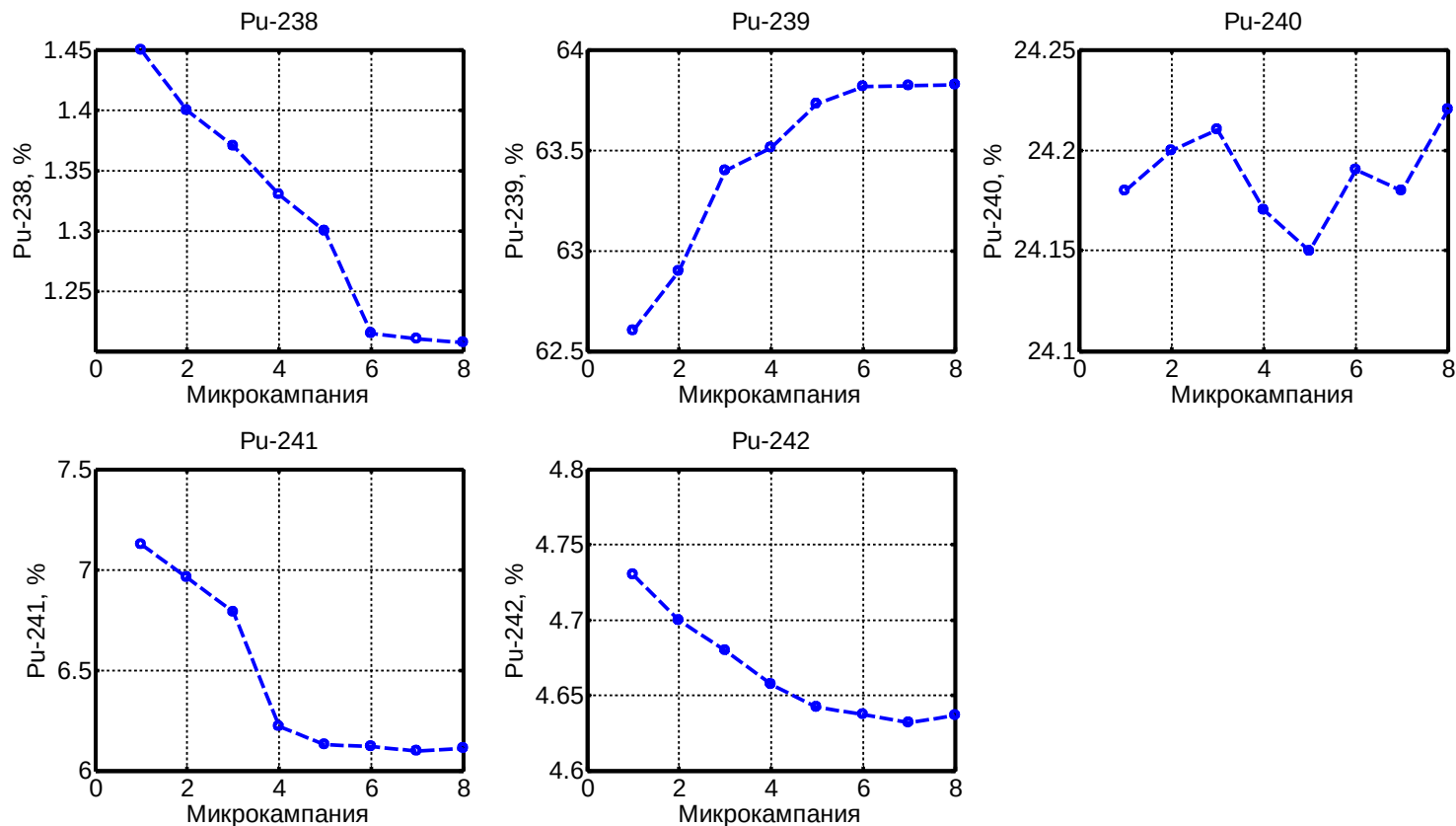
Нейтронно-физические расчеты РУ выполнены с помощью ПК ПРИЗМА [7], расчеты эволюции нуклидных составов выполнены с помощью ПК РИСК [8,9].

# Переход от стартового состава к равновесному (МОХ-топливо)



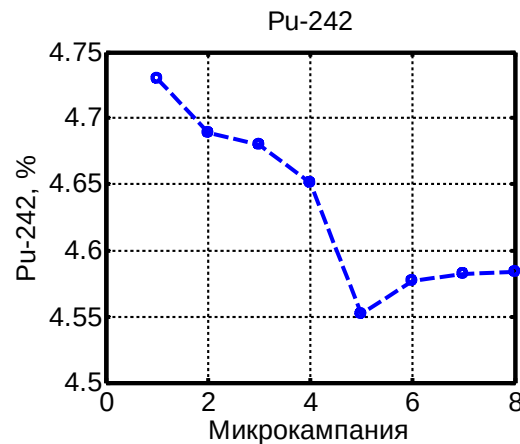
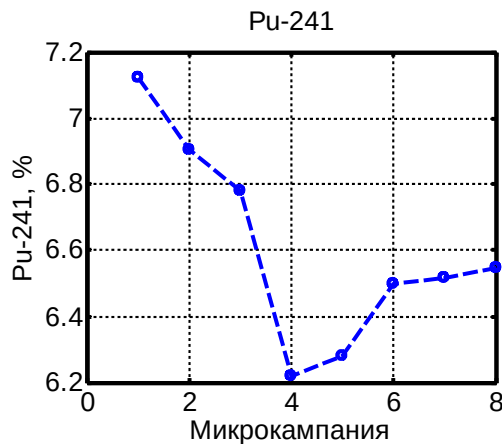
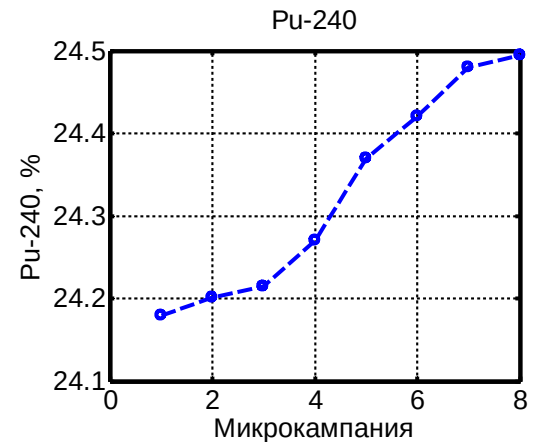
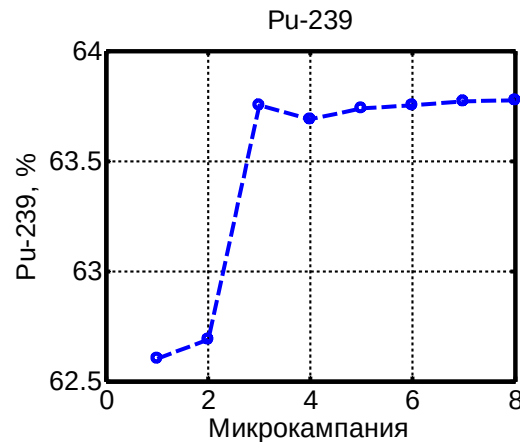
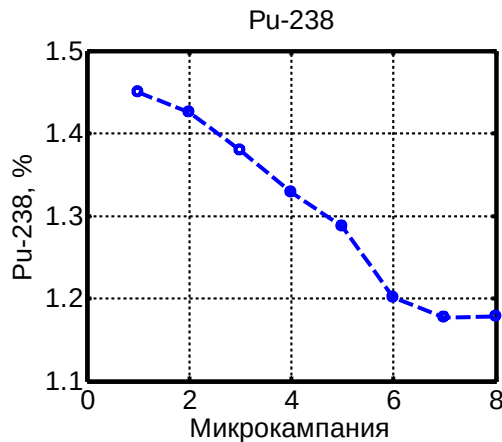
Изменение изотопного состава плутония по микрокампаниям. Стартовая загрузка МОХ-топливом с плутонием из ОЯТ ВВЭР. Активная зона работает в режиме частичных перегрузок. Равновесие по основным делящимся изотопам достигается к концу 5 микрокампании.

# Переход от стартового состава к равновесному (нитридное топливо)



Изменение изотопного состава плутония по микрокампаниям. Стартовая загрузка нитридным топливом с плутонием из ОЯТ ВВЭР. Активная зона работает в режиме частичных перегрузок. Равновесие по основным делящимся изотопам достигается к концу 6 микрокампании.

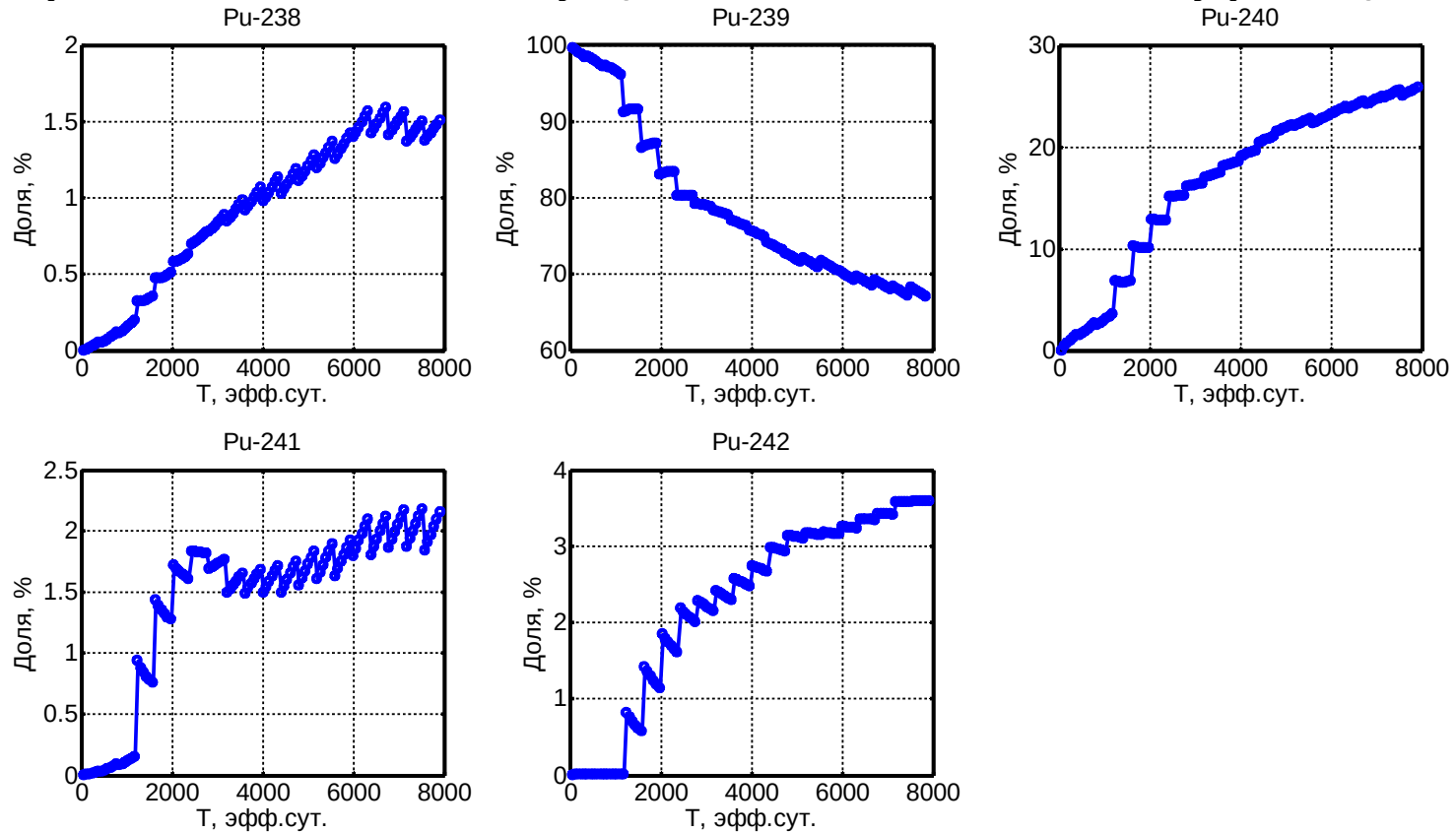
# Переход от стартового состава к равновесному (металлическое топливо)



Изменение изотопного состава плутония по микрокампаниям. Стартовая загрузка металлическим топливом с плутонием из ОЯТ ВВЭР. Активная зона работает в режиме частичных перегрузок. Равновесие по основным делящимся изотопам (Pu-239, Pu-241) достигается к концу 6 микрокампании.



# Переход от стартового состава к равновесному (обогащенный уран)



Изменение изотопного состава плутония по микрокампаниям. Стартовая загрузка металлическим топливом с плутонием из ОЯТ ВВЭР. Активная зона работает в режиме частичных перегрузок. Равновесие по основным делящимся изотопам (Pu-239, Pu-241) достигается к концу 23 микрокампании.

# Коэффициент воспроизводства

КВ сильно зависит от стартовой загрузки и конфигурации активной зоны.

«Плутониевые» загрузки:

- МОХ – 1,16
- Нитрид – 1,294
- Нитрид (без зон воспроизводства) – 1,047
- Металлическое топливо – 1,584

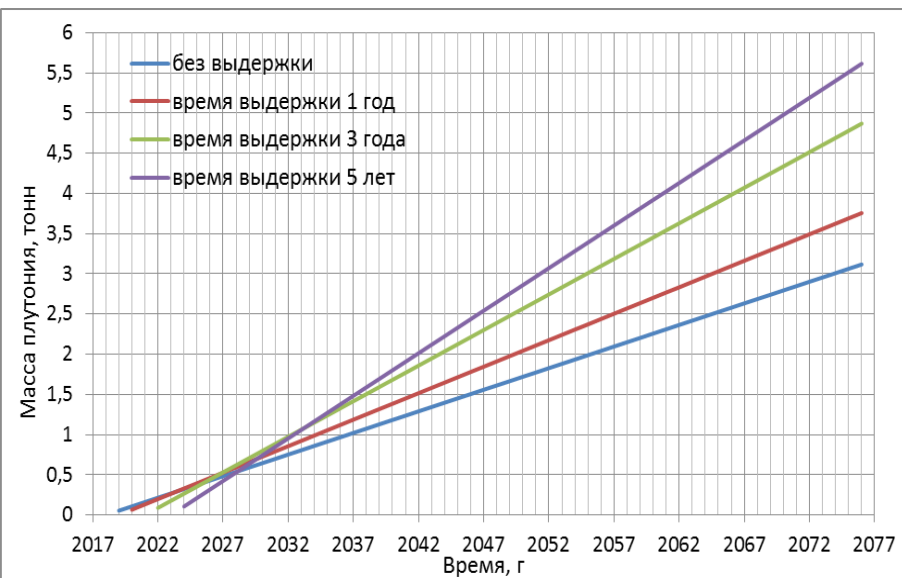
Обогащенный уран – 1,031

# Расчеты баланса ДМ

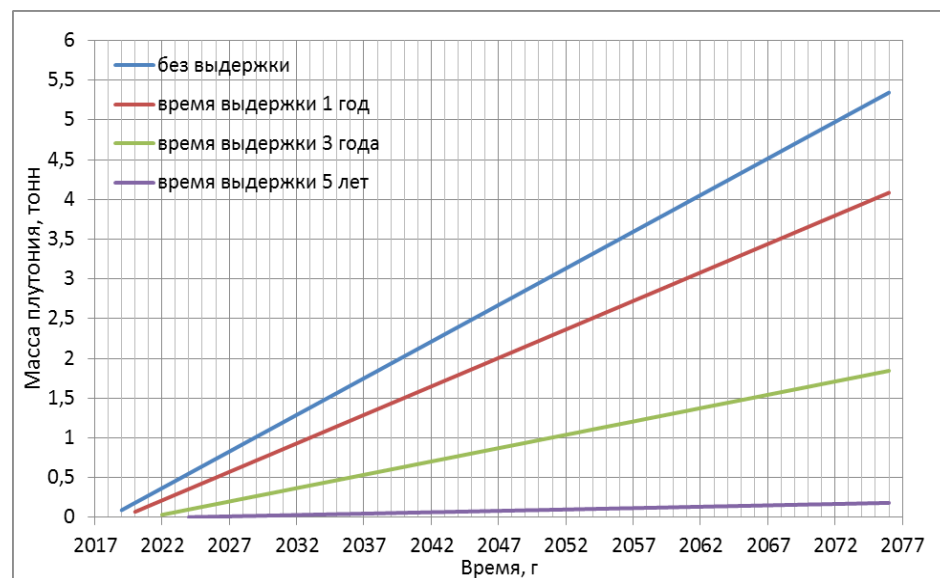
Для топливных загрузок БН-1200, при которых  $K_B > 1,1$ , с помощью ПК АТЭК [3], проведены расчеты баланса делящихся материалов в двухкомпонентных ядерно-энергетических системах с различным соотношением тепловых и быстрых реакторов.

В расчетах принято, что новые топливные загрузки для БН-1200 в равновесном режиме изготавливаются с использованием собственных рециклированных ДМ, а новые топливные загрузки ТР изготавливаются из смеси собственных регенерированных ДМ и ДМ, наработанных в зонах воспроизводства БН-1200, и избыточных для собственных нужд.

# МОХ-топливо

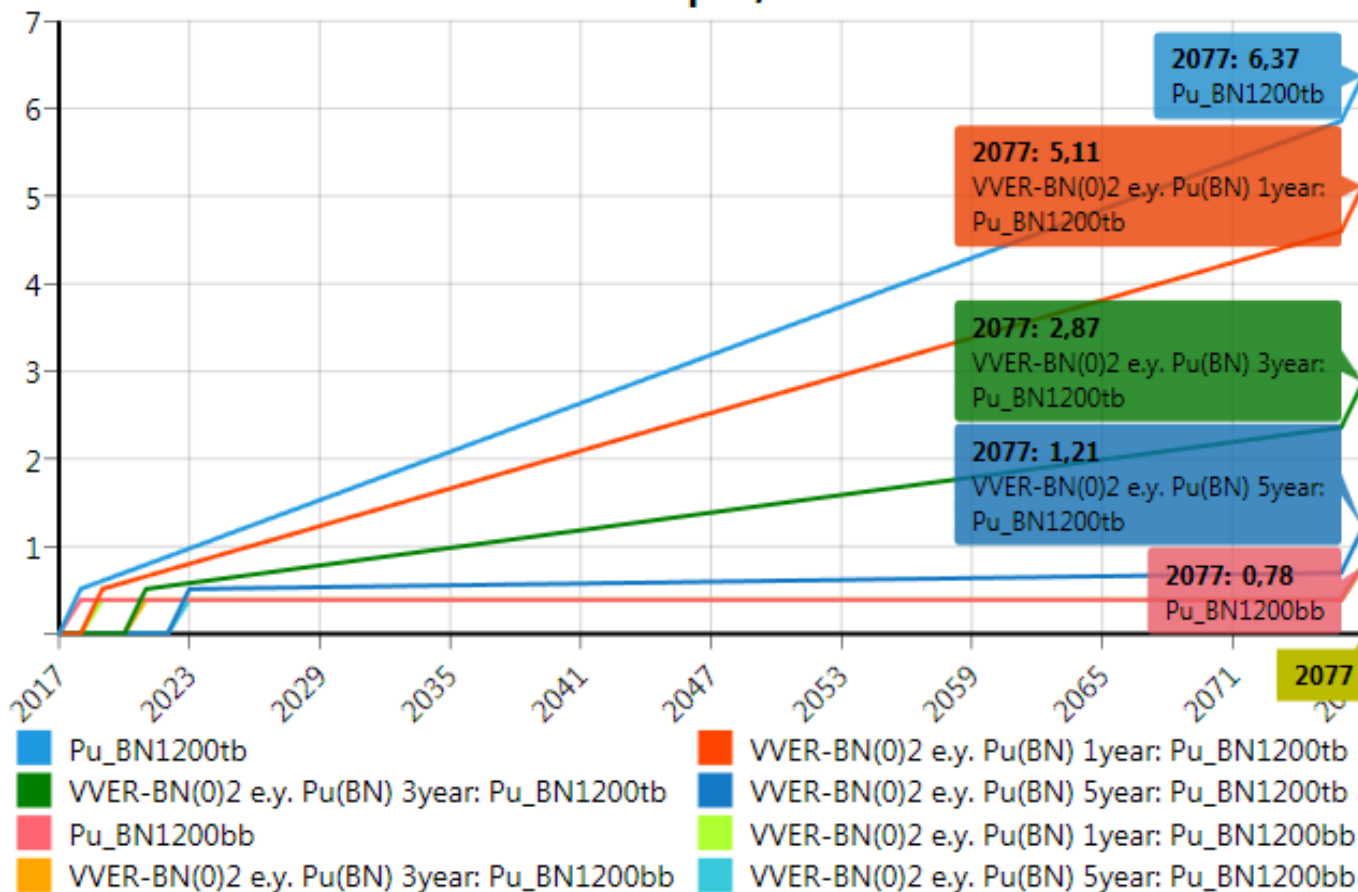


Интегральный недостаток ДМ в двухкомпонентной системе из одного реактора БН-1200 и одного реактора ВВЭР-1000



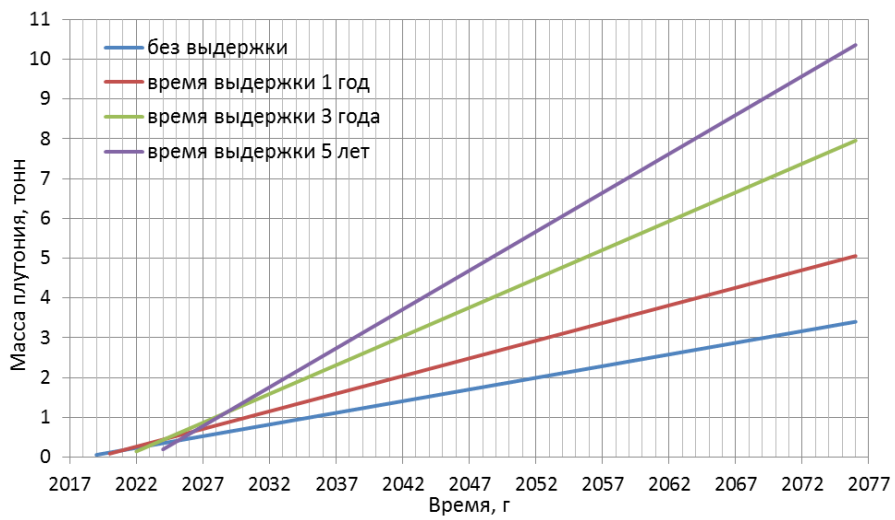
Интегральный избыток ДМ в двухкомпонентной системе из трех реакторов БН-1200 и двух реакторов ВВЭР-1000

## Запас сырья, т

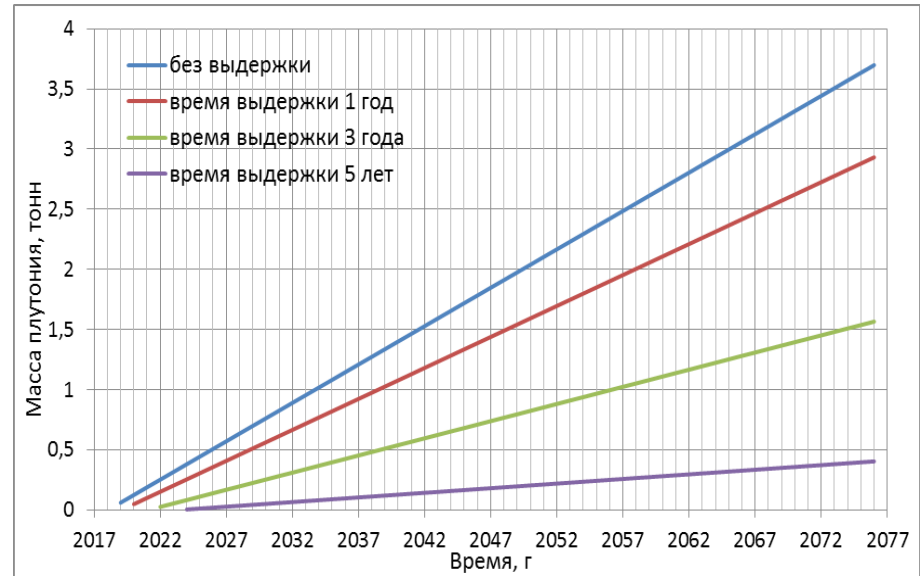


Запас ДМ в системе из трех реакторов БН-1200 и двух реакторов ВВЭР-1000 для различных времен выдержки топлива

# Нитридное топливо

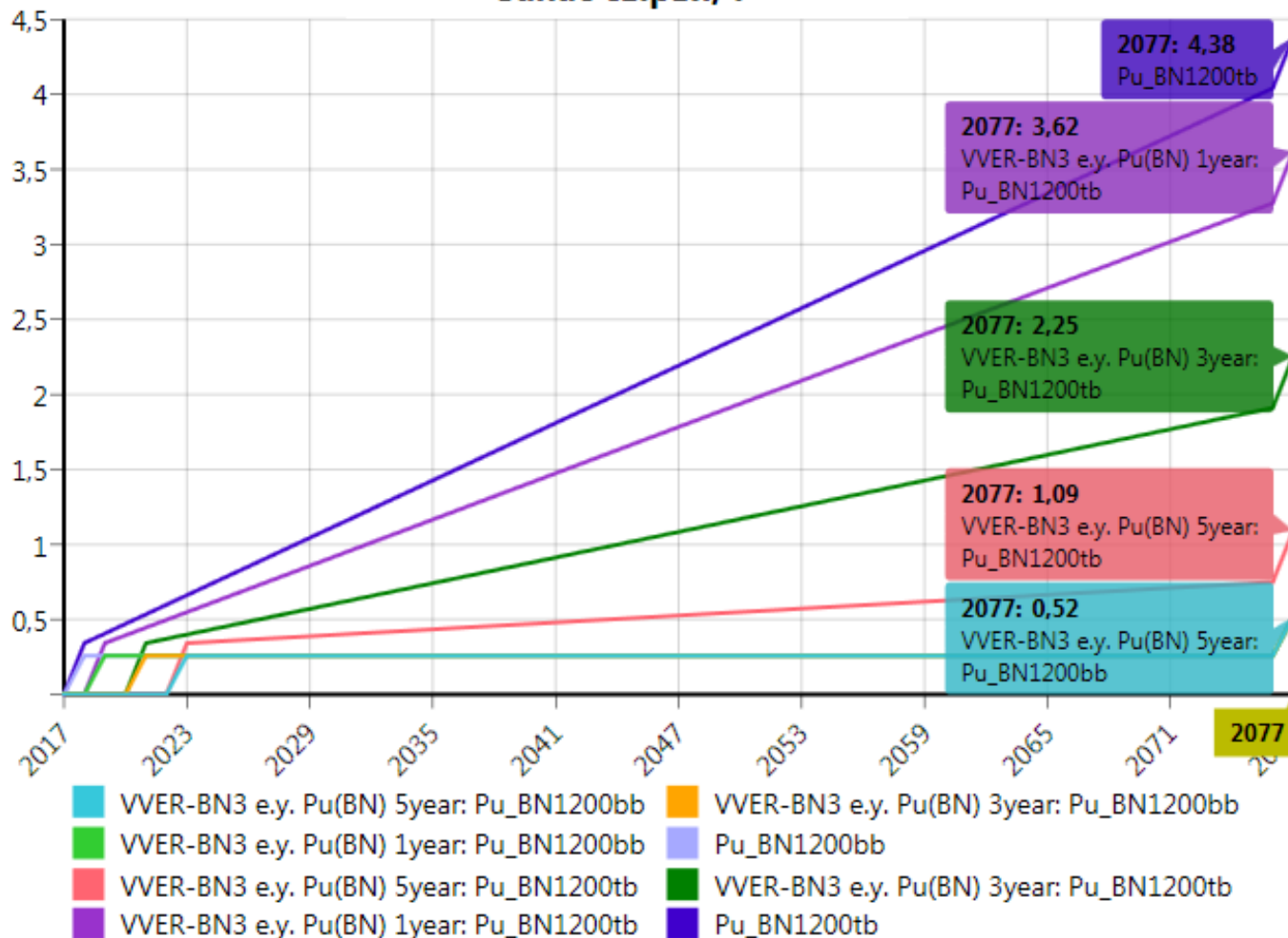


Интегральный недостаток ДМ в двухкомпонентной системе из двух реакторов ВВЭР-1000 и одного БН-1200 для различных времен выдержки



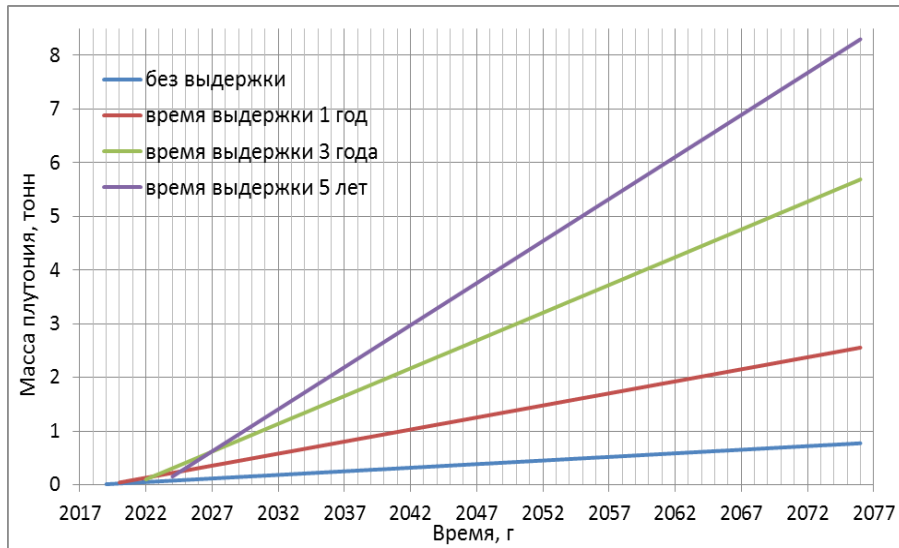
Интегральный избыток ДМ в двухкомпонентной системе из одного реактора БН-1200 и одного ВВЭР-1000 для различных времен выдержки

## Запас сырья, т

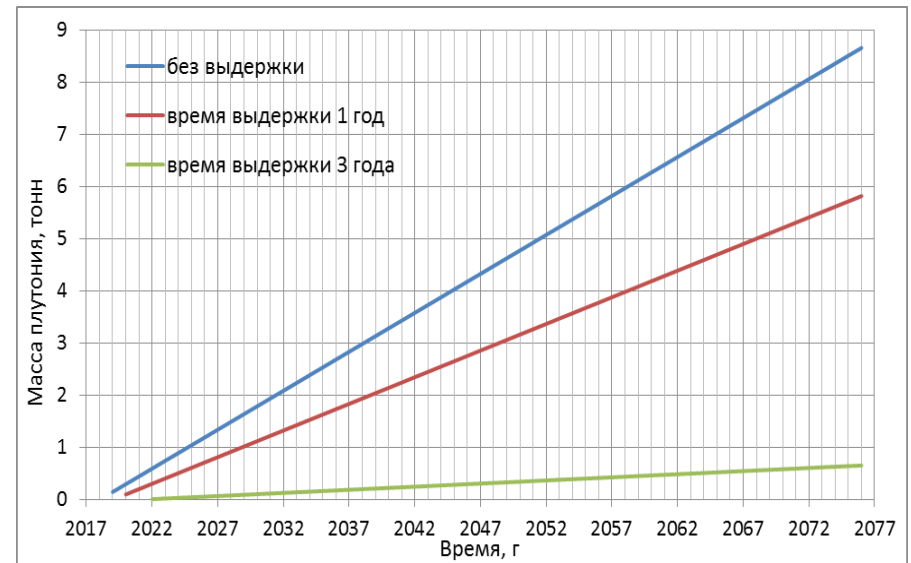


Запас ДМ в системе из трех реакторов БН-1200 и двух ВВЭР-1000 для различных времен выдержки топлива

# Металлическое топливо

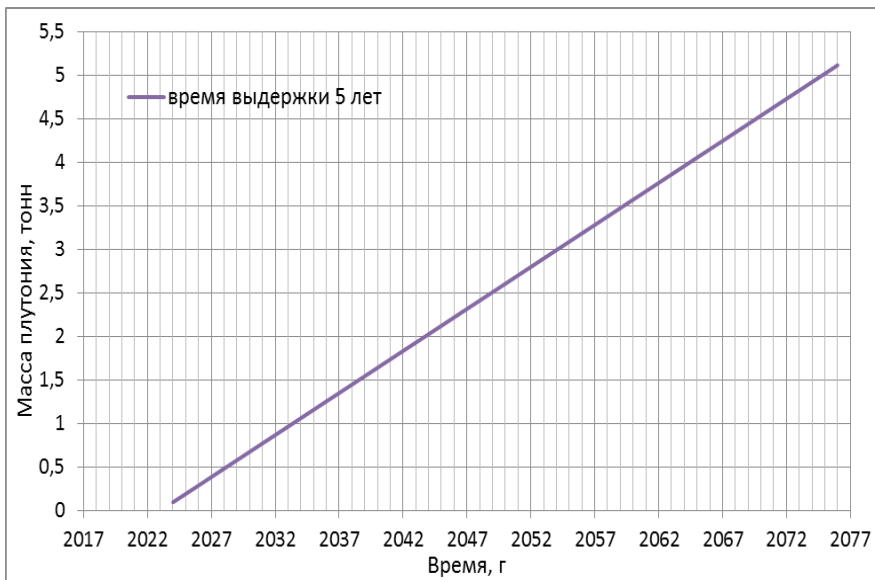


Интегральный недостаток ДМ в двухкомпонентной системе из трех реакторов ВВЭР-1000 и одного реактора БН-1200 для различных времен выдержки

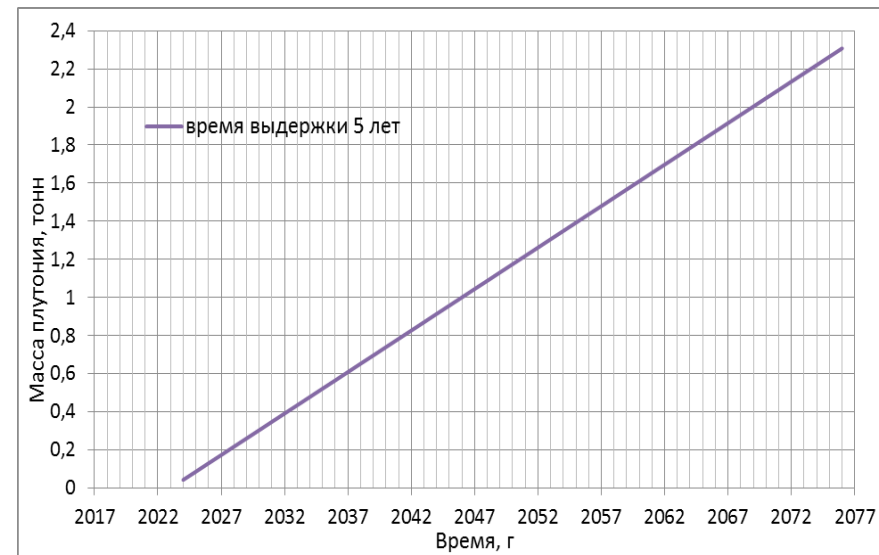


Интегральный избыток Pu в двухкомпонентной системе из двух реакторов ВВЭР-1000 и одного реактора БН-1200 для различных времен выдержки

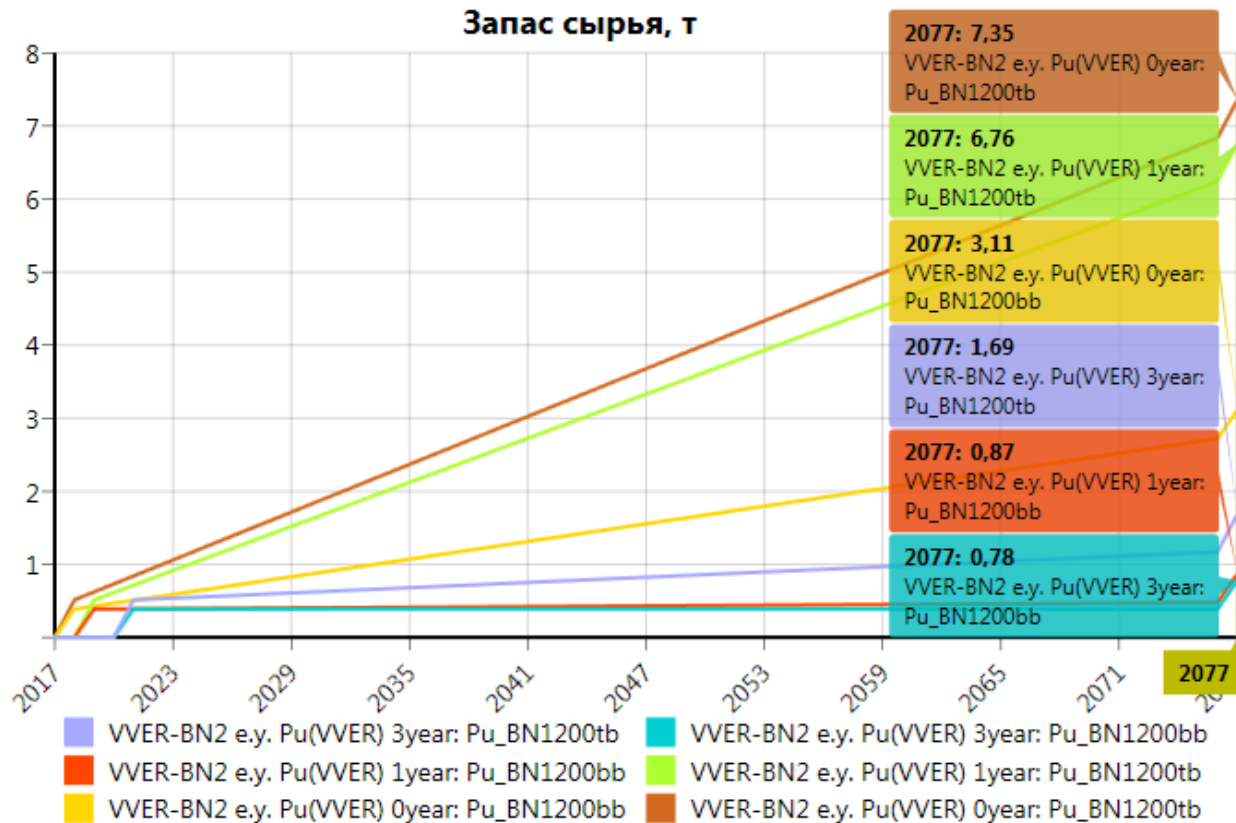




**Интегральный недостаток ДМ в двухкомпонентной системе из двух реакторов ВВЭР-100 и одного реактора БН-1200 для 5 лет выдержки ОЯТ перед переработкой**



**Интегральный избыток ДМ в двухкомпонентной системе из одного реакторов БН-1200 и одного реактора ВВЭР-1000 для 5 лет выдержки**



Запас ДМ в системе из двух реакторов ВВЭР-1000 и  
одного реактора БН-1200 для различных времен  
выдержки ОЯТ

# Выводы

Представлен анализ некоторых вариантов двухкомпонентных ядерно-энергетических систем, с позиций топливоиспользования. Рассмотрены сценарии с замыканием топливного цикла ЯЭ системы с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах типа ВВЭР-1000 и БН-1200.

Выполнены расчеты перехода к равновесному составу топлива при различных стартовых загрузках и компоновках активной зоны реактора БН-1200 для:

- МОХ-топлива
- Нитридного топлива
- Металлического топлива
- Топлива из обогащенного урана

# Выводы

Для топливных загрузок, в которых КВ превысил 1,1 с помощью ПК АТЭК выполнены расчеты баланса делящихся материалов в двухкомпонентной ядерно энергетической системе с тепловыми и быстрыми реакторами.

В случае работы активной зоны БН-1200 на МОХ-топливе с боковой и торцевой зоной воспроизводства, удастся обеспечить делящимися материалами два реактора ВВЭР-1000, при трех работающих РУ БН-1200. При этом время выдержки ОЯТ БН-1200 до переработки не должно превышать 5 лет.

# Выводы

При работе активной зоны БН-1200 на нитридном топливе, в котором ДМ является энергетический плутоний, а боковая и торцевая зоны воспроизводства содержат нитрид обедненного урана, существенно повышается коэффициент воспроизводства топлива (КВ 1,294). При этом, для системы с двумя работающими реакторами ВВЭР-1000 и одним БН-1200, даже при минимальном времени выдержки ОЯТ до переработки, интегральный дефицит ДМ к концу времени работы системы составит около 3т. Если в системе работают ТР и БР с соотношением 1:1, то в такой системе не будет дефицита ДМ при времени выдержки ОЯТ до переработки не более 5 лет.

# Выводы

При работе активной зоны БН-1200 металлическом топливе, в котором ДМ является энергетический плутоний, а боковая и торцевая зоны воспроизводства содержат металлический обедненный уран, коэффициент воспроизводства топлива возрастает до 1,584. Такое значение КВ позволяет обеспечивать делящимися материалами систему из тепловых и быстрых реакторов с соотношением 2:1. Дефицит делящихся материалов не возникает при времени выдержки ОЯТ до переработки не более трех лет.

Для системы с тремя работающими реакторами ВВЭР-1000 и одним БН-1200, даже при минимальном времени выдержки ОЯТ до переработки, интегральный дефицит ДМ к концу времени работы системы составит около 1т.

# СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. [http://www.rosenergoatom.ru/stations\\_projects/russian\\_nuclear/](http://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/russian_nuclear/)
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%92%D0%AD%D0%A0-1000>
3. Комплекс АТЭК для моделирования технологий ядерного энергетического комплекса / И. Р. Макеева, В.А. Симоненко, В. П. Соколов // Радиохимические технологии: тезисы 7-ой Российской конференции по радиохимии «Радиохимия 2012»-М.: 2012. С.160.

# СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

4. Белая книга ядерной энергетики /Под ред. проф. Е.О.Адамова/. М.:Изд. ГУП НИКИЭТ. 2001
5. Волков И.А., Симоненко В.А., Макеева И.Р. и др. Использование обогащенного урана в быстром реакторе со свинцовым теплоносителем. – Атомная энергия, 2016, т.121, вып.1, с.20-24.
6. Матвеев В.И., Хомяков Ю.С. Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, под ред. чл.-корр. РАН В.И. Рачкова, М.: Издательский дом МЭИ, 2012, 356с.



# СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

7. Зацепин О.В. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 /О.В. Зацепин, Я.З. Кандиев, Е.А. Кашаева и др. // ВАНТ, сер. «Физика ядерных реакторов». – 2011. – Вып.4.- С.64 -74.
8. Модестов Д.Г., Программа решения задач ядерной кинетики РИСК-2014, препринт ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ», № 243, 2014.
9. Модестов Д.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Программный комплекс «Расчёт изменения состава в приближении ядерной кинетики» (ПК «РИСК») – № 2016610142 от 11.01.2016.