

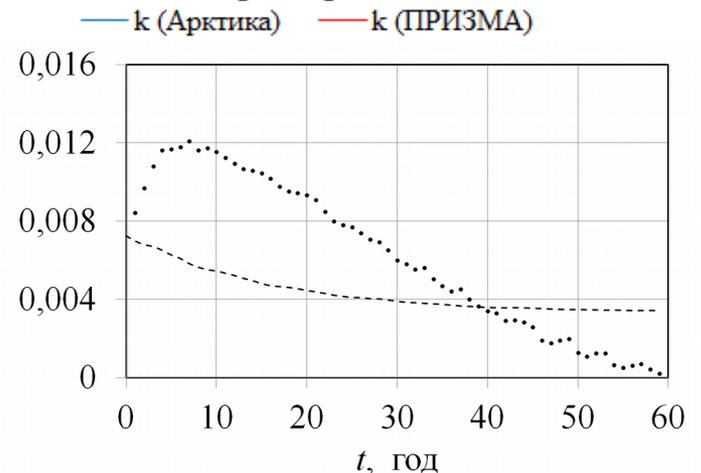
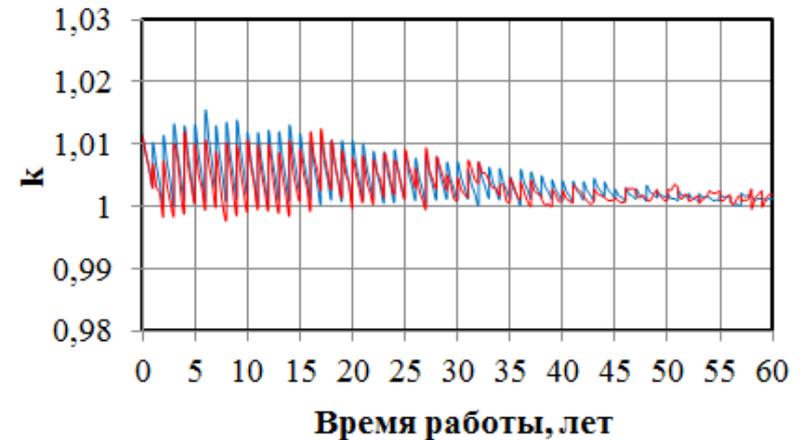
О РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Волков И.А., В.А. Симоненко, Бочкарева А.А., Шереметьева У.Ф.

Снежинск, 2017

Особенности работы реакторов типа БРЕСТ

- Для реакторных установок типа БРЕСТ выделяют два основных этапа их эксплуатации – переходный, при котором изотопный и элементный состав топлива может существенно изменяться, и равновесный.
- В зависимости от стартовой загрузки, выбег реактивности за микроампанию $\Delta\rho$ на переходном этапе работы может изменяться в широком диапазоне. Наибольший интерес представляет стартовая загрузка с обогащенным ураном.
- При старте с обогащённого урана и постоянстве геометрии активной зоны выбег реактивности за микроампанию будет превышать $\beta_{эфф}$ в течение ~ 38 лет [1].



- Выбег реактивности за микроампанию
- Эффективная доля запаздывающих нейтронов



1. 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.

Цели и задачи работы

Рассматривается подход, обсуждаемый разработчиками свинцовых реакторов, в соответствии с которым для уменьшения $\Delta\rho$ предлагается:

- увеличить высоту топливного столба в активной зоне
- использовать в стартовой загрузке нептуний и америций в качестве стабилизаторов реактивности на переходном этапе работы

Цель работы:

Исследование возможностей уменьшения выбегов реактивности при использовании в стартовой загрузке обогащённого урана.

Используемые программные средства

- Нейтронно-физические характеристики реакторной установки рассчитывались с помощью диффузионного кода «Арктика» [2].
- Расчёты эволюции изотопного состава выполнены с помощью кода РИСК [3], отслеживающего эволюцию ~1500 изотопов.

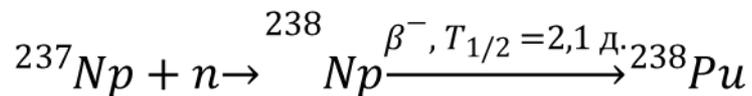
2. Трапезников М.А., Попов И.С., Шереметьева У.Ф. Программный комплекс ЯРУС для моделирования различных режимов работы ядерных реакторов. Модуль нейтронно-физического расчета программа «Арктика». Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ №246, Снежинск, 2015.

3. Модестов Д.Г. Программа решения задач ядерной кинетики РИСК-2014. Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ №243, Снежинск, 2014.

Нептуний в качестве стабилизатора реактивности

В спектре нейтронов реактора со свинцовым теплоносителем среднее сечение радиационного захвата ^{237}Np примерно в пять раз выше, чем у ^{238}U , сечение деления – в десять раз (таблица 1).

При радиационном захвате нейтрона ^{237}Np будет переходить в ^{238}Np , который распадается в ^{238}Pu



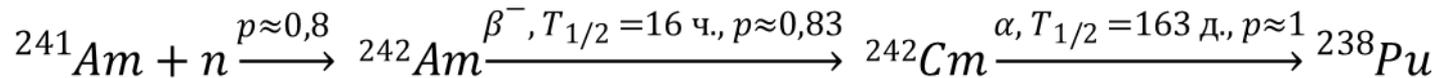
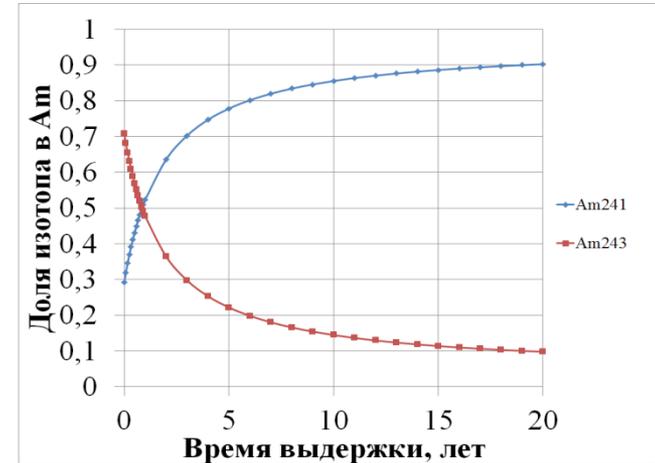
Изотоп ^{238}Pu в быстром спектре нейтронов является, фактически, делящимся изотопом и его интенсивная наработка способствует уменьшению выбега реактивности.

Таблица 1 – Однорупповые сечения деления и радиационного захвата, усредненные по спектру нейтронов реактора типа БРЕСТ-1200

Изотоп			
^{235}U			
^{238}U			
^{237}Np			
^{238}Pu			
^{239}Pu			
^{240}Pu			
^{241}Pu			

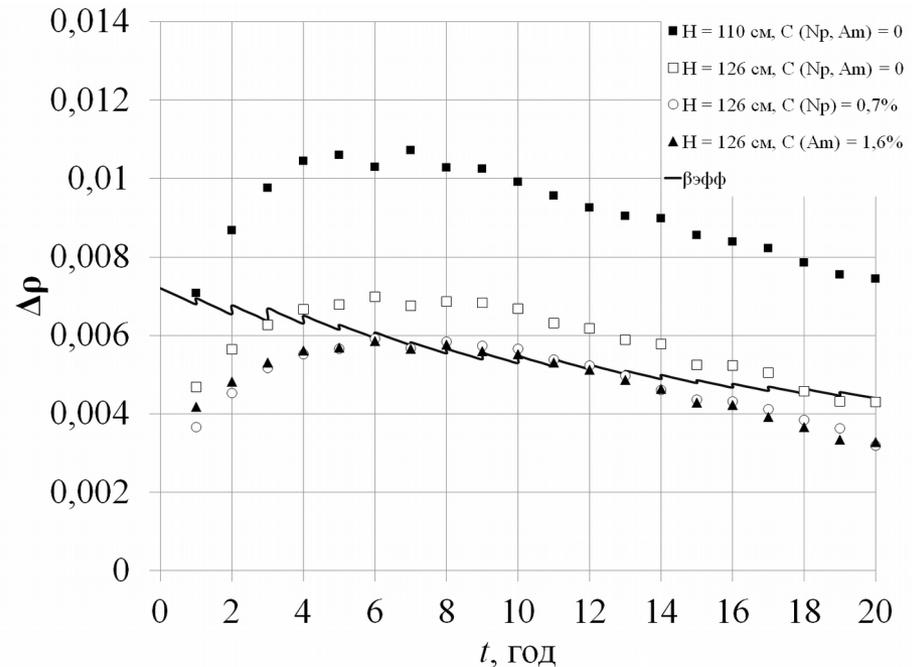
Америций в качестве стабилизатора реактивности

- ❑ Нарабатываемый в тепловых реакторах америций, в основном, представлен двумя изотопами – ^{241}Am и ^{243}Am .
- ❑ В зависимости от времени выдержки ОЯТ, изотопный состав америция может существенно различаться.
- ❑ В активной зоне реактора при захвате нейтрона ^{241}Am с вероятностью $p \approx 80\%$ переходит в ^{242}Am и с вероятностью $p \approx 20\%$ – в долгоживущий делящийся изотоп $^{242\text{m}}\text{Am}$ (с периодом полураспада $T_{1/2} = 141$ год).
- ❑ Основной процесс, способствующий уменьшению выбега реактивности:



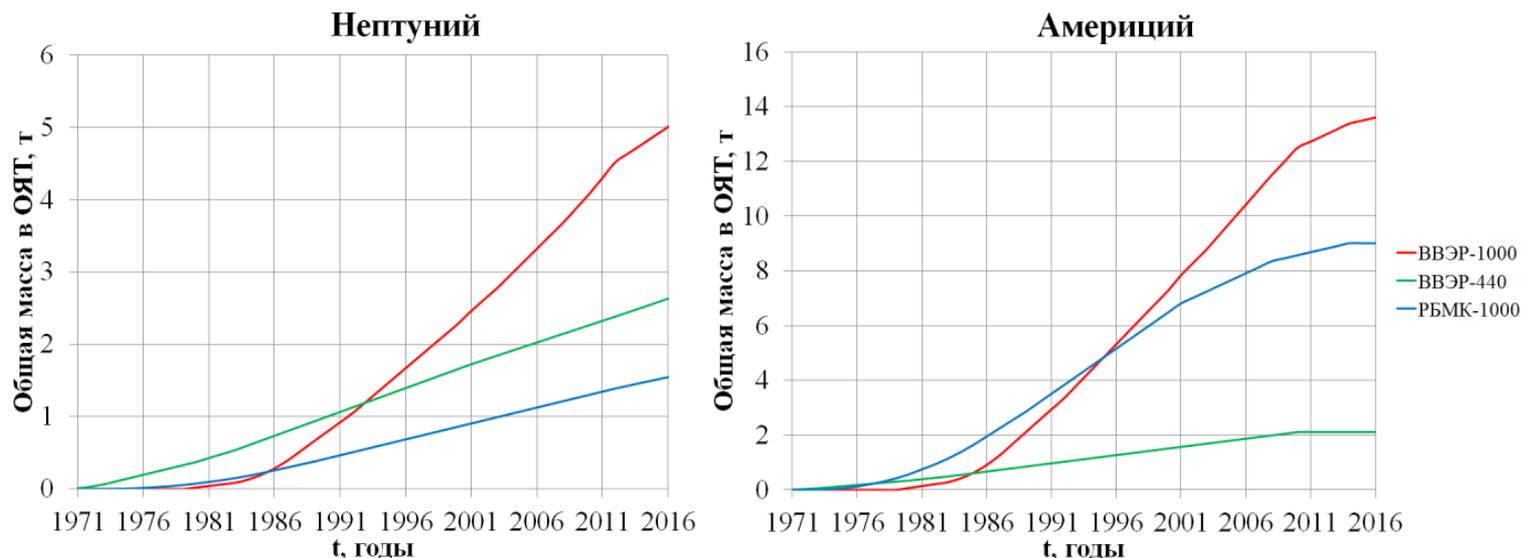
Эффективность использования нептуния и америция

- Для конфигурации активной зоны с высотой топливного столба 110 см максимальный выбег реактивности за первые 20 лет работы реактора составил $1,8\beta_{\text{эфф}}$.
- При увеличении высоты топливного столба до 126 см максимальный выбег реактивности за микрокампанию снизился до $1,2\beta_{\text{эфф}}$.
- Для частичной компенсации реактивности на $\sim 0,2\beta_{\text{эфф}}$ в стартовой загрузке должно содержаться примерно 0,7% т.а. Np (~ 750 кг) или 1,6% т.а. Am ($\sim 1,7$ т).



Оценка запасов нептуния и америция

- ❑ По оценкам, проведенным с помощью программного комплекса АТЭК [4], общие запасы накопленного ^{237}Np в России составляют $\sim 10,1$ т, америция – $24,8$ т. При расчетах были использованы данные из открытых источников [5].
- ❑ Накопленного нептуния и америция хватит для стабилизации реактивности примерно в $25 \div 30$ энергетических установках.
- ❑ Ежегодная наработка ^{237}Np в настоящее время составляет $\sim 0,36$ т, америция – примерно $0,8$ т с учётом распада ^{241}Pu в ОЯТ тепловых реакторов.
- ❑ Это может обеспечить темп ввода (через ~ 10 лет) примерно $0,5 \div 1$ реакторов в год.



4. Макеева И.Р., Симоненко В.А., Волков И.А., Дырда Н.Д. Вопросы эволюции изотопных составов при замыкании топливного цикла реакторов на быстрых нейтронах. – Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы». – 2013. – Вып. 2-(75) . – С. 116 –123

5. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. М., Минатом России, 2000.

Особенности использования нитрида америция в быстром реакторе

- ❑ Необходима разработка технологии фабрикации нитридного топлива с температурами, обеспечивающими минимальное содержание примесей углерода и кислорода в топливе и минимальные потери америция.
- ❑ В существующих экспериментальных работах (например, [6]) отмечается, что при облучении америция нейтронами образуется большое количество гелия из-за распада Cm^{242} , приводящее к повышенному распуханию и растрескиванию топлива.
- ❑ Для фабрикации нитридного топлива с Am необходимы технологии, позволяющие выделять эти минорные актиниды из ОЯТ в промышленных масштабах.
- ❑ Исходя из вышесказанного, в качестве стабилизатора реактивности предпочтительнее использовать нептуний.

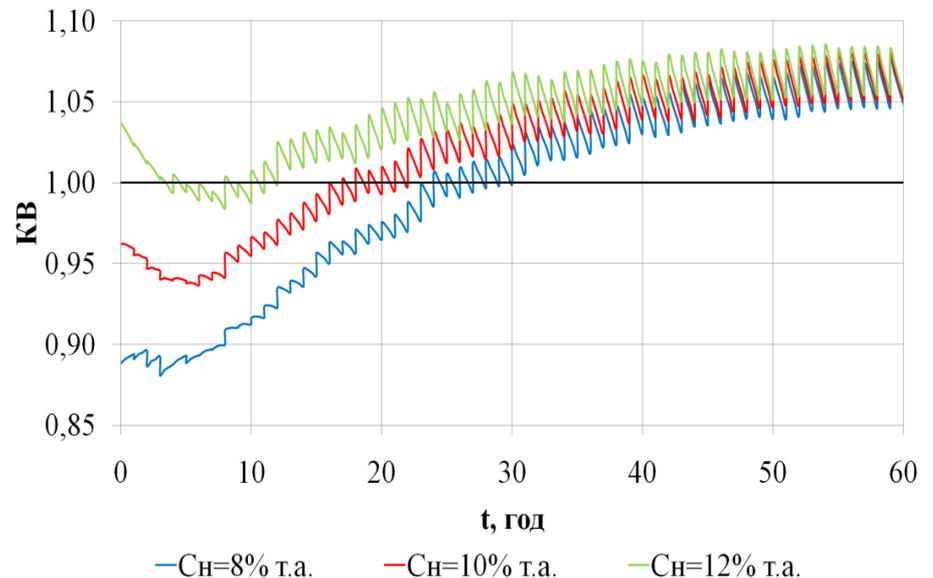
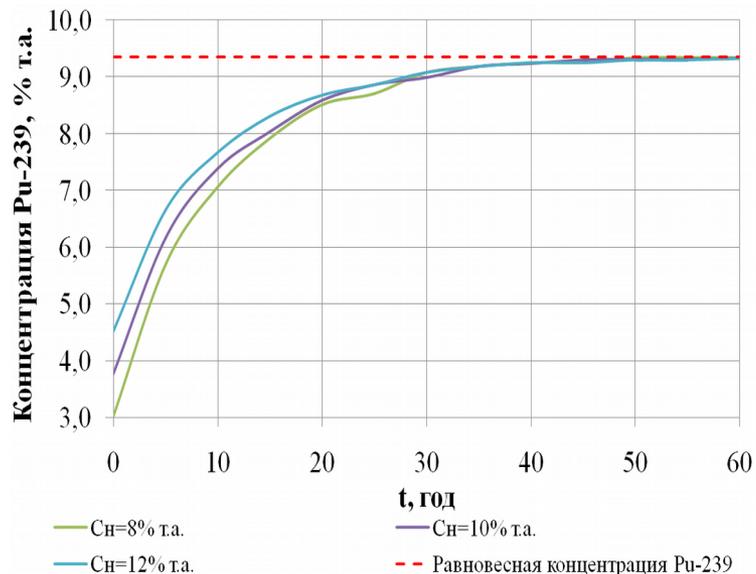
6. Pillon S., Wallenius J. Oxide and nitride TRU-fuels: lessons drawn from the CONFIRM and FUTURE projects of the 5th European framework programme, ATALANTE, Nîmes (France). June 21-25, 2004



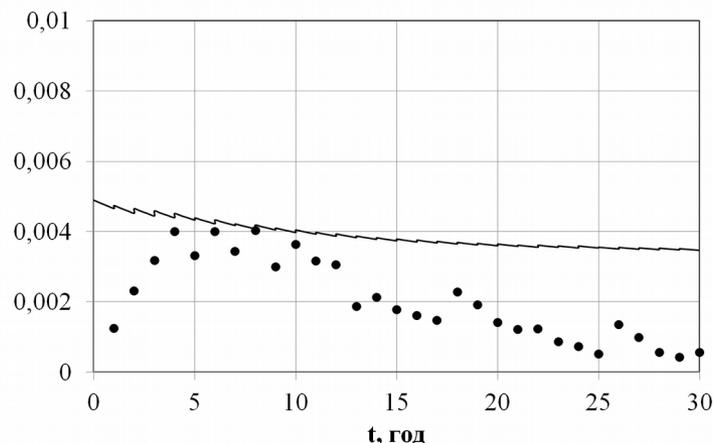
Использование стартовой загрузки из смеси нитридов обогащенного урана и плутония, полученного из ОЯТ РБМК

□ Расчёты проведены при начальных концентрациях плутония в топливе ($C_{\text{П}}$), равных 8%, 10% и 12% т.а.

□ Концентрация ^{235}U в топливе подбиралась, исходя из условия критичности, и составила 7,6%, 5,9% и 4,4% т.а., соответственно.



Использование стартовой загрузки из смеси нитридов обогащенного урана и плутония, полученного из ОЯТ РБМК (Сн=12%)



• Выбег реактивности за микрокампанию
— Эффективная доля запаздывающих нейтронов

- ❑ Высокое содержание изотопа ^{240}Pu позволяет создать активную зону с коэффициентом воспроизводства, близким к единице и с выбегами реактивности за микрокампанию, не превышающими эффективной доли запаздывающих нейтронов.
- ❑ Реактор в течение всего срока эксплуатации будет работать в режиме самообеспечения по делящимся изотопам.
- ❑ Суммарное потребление ^{235}U за весь срок эксплуатации составило $\sim 4,8$ т, плутония из отработавшего топлива реакторов РБМК — 11,3 т.
- ❑ По расчетным оценкам запасы плутония после вывода из эксплуатации последнего реактора РБМК составят примерно 140 т. Такого количества плутония хватит на запуск примерно 12-ти реакторов типа БРЕСТ-1200.

Заключение

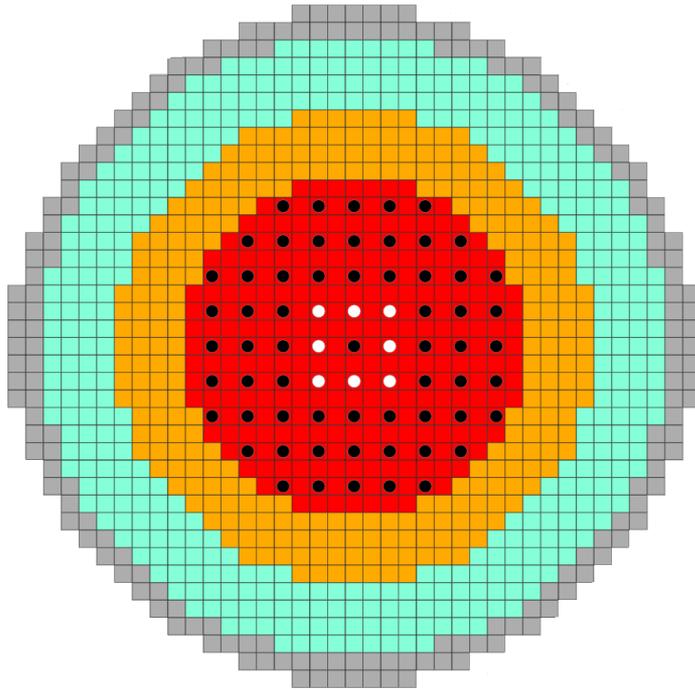
- ❑ Скомпенсировать выбеги реактивности корректировкой стартового состава топлива можно лишь для небольшого числа реакторов типа БРЕСТ-1200.
- ❑ Темп ввода новых реакторов будет ограничен темпом наработки нептуния и америция в реакторах на тепловых нейтронах и количеством плутония, содержащегося в ОЯТ реакторов РБМК.
- ❑ При использовании стартовой загрузки из смеси обогащенного урана и плутония из ОЯТ РБМК нет необходимости изменять геометрию активной зоны. Необходимое обогащение по ^{235}U составляет $\sim 4,4\%$ т.а.
- ❑ Для снятия ограничений по темпу ввода выбеги реактивности можно компенсировать только изменением высоты топливного столба. Такой подход требует дополнительных исследований, в частности, обеспечения отрицательного пустотного эффекта реактивности.

**Спасибо за
внимание!**

Постановка задачи

- ❑ Рассматривается модельная схема АЗ с четырёхгранными бесчехловыми тепловыделяющими сборками (ТВС), со свинцовым отражателем и высотой топливного столба, равной 1,1 м.
- ❑ Активная зона разделена на две подзоны – центральную (ЦЗ) и периферийную (ПЗ). Стартовая загрузка осуществляется нитридом обогащенного урана (с обогащением по ^{235}U , равным 13,9%).
- ❑ Плотность топлива, усреднённая по высоте топливного столба 11,8 г/см³.
- ❑ Тепловая мощность реакторной установки принята равной 2800 МВт.
- ❑ Расчеты проводились с использованием трехмерных моделей активных зон.

Схема активной зоны



- - штатная ТВС центральной зоны
- - аварийная защита, компенсатор реактивности
- ◻ - автоматический регулятор
- - штатная ТВС периферийной зоны
- - блок свинцового отражателя
- - блок стального отражателя

- Температура в теплоносителе ниже АЗ – 690 К
- Температура теплоносителя на уровне АЗ – 750 К
- Температура теплоносителя выше АЗ – 810 К
- Температура топлива – 1300 К
- Температура оболочки ТВЭЛ – 800 К

Схема расчетов

Общая схема расчета

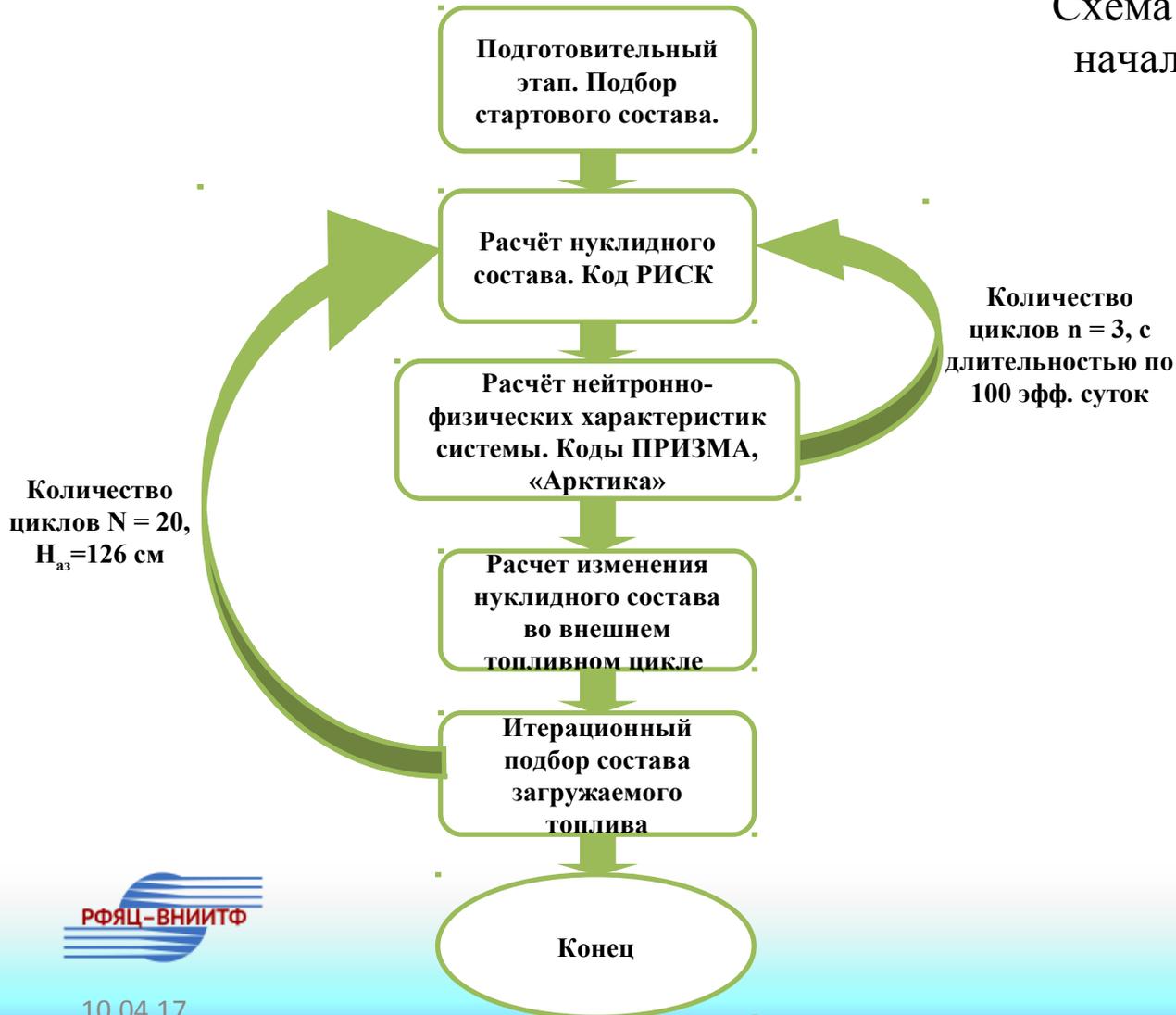


Схема подбора состава топлива в начале каждой микрокампании

