

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктор философии» (Ph.D)  
по специальности «6D060500 – Ядерная физика»

**САЙРАНБАЕВ ДАРХАН СЕРГАЗИЕВИЧ**

### **Исследование нейтронно-физических характеристик активной зоны исследовательского реактора ВВР-К с боковым бериллиевым отражателем**

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию нейтронно-физических характеристик исследовательского реактора ВВР-К с боковым бериллиевым отражателем. Показано изменение нейтронно-физических характеристик реактора ВВР-К при постепенной замене водяного отражателя нейтронов на бериллиевый.

**Актуальность темы.** Несомненно, роль исследовательских реакторов в современном мире велика, они широко применяются в науке и технике. Например, испытания конструкционных материалов и топлива для ядерных и термоядерных реакторов, производство медицинских и промышленных радиоизотопов, нейтронно-трансмутационное легирование кремния, радиационное окрашивание полудрагоценных камней, нейтронно-активационный анализ, ядерная медицина, обучение и подготовка кадров. Однако, исследовательский реактор является ядерной установкой с потенциальной ядерной и радиационной опасностью, поэтому перед научным сообществом стоит важная задача, не только по широкому применению, но и в первую очередь, по обеспечению его безопасной эксплуатации.

Согласно конкретным требованиям «Кодекса поведения по безопасности исследовательских реакторов» МАГАТЭ, организация, эксплуатирующая исследовательский реактор, должна обеспечить его безопасность на всех стадиях жизненного цикла. Постепенная замена водяного отражателя нейтронов на бериллиевый относится к этапу модернизация активной зоны. Такая модернизация приведет к уменьшению утечки нейтронов с боковой поверхности активной зоны и улучшению ее критических характеристик, что несомненно будет влиять на нейтронно-физические характеристики реактора. Кроме того, загрузка бериллия в активную зону реактора является ядерно-опасной операцией, что требует прогнозирования изменения нейтронно-физических характеристик реактора для обеспечения его безопасности. Современное развитие расчетных методик и программ позволяет проводить достаточно подробные и точные расчеты, что делает их одним из основных научных методов исследования. Особенно, можно отметить численные методы моделирования, основанные на методе Монте-Карло, которые позволяют проводить прецизионные расчеты.

Актуальностью настоящей работы является получение новых расчетных и экспериментальных данных об изменении нейтронно-физических

характеристик активной зоны реактора ВВР-К с низкообогащенным топливом при постепенной замене водяного отражателя нейтронов на бериллиевый, которые необходимы для анализа и обоснования безопасной эксплуатации реактора.

**Целью работы** является определение влияния постепенной достройки бокового бериллиевого отражателя на нейтронно-физические характеристики активной зоны исследовательского реактора ВВР-К.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать и верифицировать расчетную модель реактора ВВР-К;
- исследовать динамику изменения основных характеристик реактора ВВР-К таких как кинетические параметры активной зоны, эффективность рабочих органов системы управления и защиты, реактивность, температурные коэффициенты реактивности и плотность потока нейтронов при постепенной замене водяного отражателя нейтронов на бериллиевый;
- исследовать влияние выгорания урана в топливе и накопление ядер-отравителей в бериллиевом отражателе на плотность потока нейтронов в облучательных каналах реактора ВВР-К;
- провести экспериментальные исследования основных нейтронно-физических характеристик реактора ВВР-К и сопоставить полученные результаты с расчетными данными.

**Объектом исследования** является активная зона исследовательского реактора ВВР-К с низкообогащенным топливом и боковым бериллиевым отражателем.

**Предметом исследования** являются нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВР-К с низкообогащенным топливом и боковым бериллиевым отражателем.

**Методы исследования.** Нейтронно-физические характеристики исследовались с помощью следующих методов: численный метод Монте-Карло – для математического моделирования исследовательского реактора ВВР-К и определения его нейтронно-физических характеристик; метод активационных фольг – для экспериментального измерения плотности потока нейтронов в облучательных каналах реактора ВВР-К; вычисление реактивности реактора с использованием точечной модели. Экспериментальное моделирование активной зоны реактора ВВР-К на критическом стенде.

**Новизна исследования.**

1. Получена расчетно-экспериментальная зависимость влияния бериллиевого отражателя нейтронов на нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВР-К с низкообогащенным топливом.

2. Получены расчетные данные о накоплении ядер-отравителей в бериллиевом отражателе и их влиянии на нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВР-К.

3. Разработана расчетная модель реактора ВВР-К с гетерогенным описанием элементов активной зоны и боковым бериллиевым отражателем нейтронов, достоверность которой была подтверждена результатами бенчмарк-экспериментов и реальных экспериментальных работ на реакторе ВВР-К.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследования.**

Теоретическая значимость исследования заключается в установлении зависимости изменения нейтронно-физических характеристик легководного реактора при постепенной замене водяного отражателя нейтронов на бериллиевый.

Практическая значимость исследования состоит в следующем:

1. Расчетные данные по выгоранию топлива в ТВС и запасу реактивности активной зоны использовались для выбора оптимального алгоритма перегрузок ТВС с целью создания необходимого рабочего запаса реактивности.

2. Энергетическое распределение нейтронов в облучательных каналах реактора ВВР-К для каждой конфигурации активной зоны использовалось для планирования научных и прикладных работ на реакторе ВВР-К.

3. Полученные нейтронно-физические характеристики активной зоны использовались для обоснования эксплуатационных пределов и условий реактора ВВР-К при его анализе безопасности.

4. Результаты были применены для обоснования безопасности эксплуатации реактора ВВР-К. Акт о внедрении результатов диссертации № 34-02/11 от 27.01.2022.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Полный боковой бериллиевый отражатель нейтронов в реакторе ВВР-К улучшает критические характеристики и снижает утечку нейтронов с боковой поверхности активной зоны, в частности, уменьшается критическая масса урана-235 с 6258 г до 4335 г и повышается плотность потока тепловых нейтронов в периферийных облучательных каналах почти в два раза.

2. За 952 эффективных суток максимально наработанная атомная концентрация ядер-отравителей гелий-3 и литий-6 в бериллиевом отражателе реактора ВВР-К составила  $9,14 \cdot 10^{16}$  яд/см<sup>3</sup> и  $2,15 \cdot 10^{18}$  яд/см<sup>3</sup>, соответственно, что привело к снижению запаса реактивности на 0,4 %  $\Delta k/k$ .

3. Максимальное среднеквадратичное отклонение нейтронно-физических характеристик реактора ВВР-К с полным боковым бериллиевым отражателем нейтронов, полученное на основе решения методом Монте-Карло уравнения переноса нейтронов, от экспериментальных данных составляет 11%.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в разработке детальной компьютерной модели активной зоны реактора ВВР-К в среде MCNP6, позволяющей, от кампании к кампании, определять: (а) нуклидный состав топливной композиции (выгорание урана, наработка плутония, образование продуктов деления) для каждой ТВС активной зоны ИР ВВР-К, (б) эффективности рабочих органов СУЗ, (в) плотность потока

нейтронов в требуемых для исследователей энергетических интервалах, (г) энерговыделение в каждой ТВС. Автор непосредственно участвовал в экспериментальных работах на реакторе ВВР-К и занимался обработкой полученных данных. Им обобщена полученная информация и выполнен системный анализ результатов исследования.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждаются, прежде всего, текущей практикой эксплуатации ИР ВВР-К с использованием полученных соискателем результатов и публикациями в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан и индексируемых международными базами данных SCOPUS и Web of Science, а также в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья. Также достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается тем, что исследования проводились с использованием широко признанных теоретических и экспериментальных методов и методик, а также с применением современного оборудования, прошедшего метрологическую аттестацию. Используемая в диссертации математическая модель реактора ВВР-К была подтверждена по многочисленным экспериментам и многолетним безаварийным опытом эксплуатации реактора ВВР-К. Полученные результаты не противоречат общепринятым понятиям и принципам.

**Апробация работы.** Результаты исследований, приведенные в данной работе, докладывались и обсуждались на:

- Международной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ЭЛЕМИ» (9-12 апреля 2018, Алматы, Казахстан).
- 14-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике "Безопасность, эффективность, ресурс", (1-6 октября 2018, Севастополь, Россия).
- II Международном научном форуме «Ядерная наука и технологии» (24-27 Июня 2019, Алматы, Казахстан).
- IX международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы урановой промышленности» (7-9 Ноября, 2019 года, Алматы, Казахстан).

**Публикации** Основные результаты работы представлены в 10 научных публикациях (6 статей, 4 тезисов), в том числе 3 в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science с ненулевым импакт-фактором, и 3 в изданиях, рекомендуемых КОКСОН МОН РК.

**Связь темы диссертации с планами научных работ.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» по теме 01.04 «Конверсия активной зоны реактора ВВР-К на топливо пониженного обогащения» (2015-2017) и научно-технической программы МОН РК №BR05236400 «Прикладные научно-технические исследования в области радиационного материаловедения, аналитической химии и обеспечения ядерной безопасности на базе исследовательского реактора ВВР-К» по теме № 2.1 «Исследование

экспериментальных возможностей и условий обеспечения ядерной безопасности исследовательского реактора ВВР-К с низкообогащенным топливом и бериллиевым отражателем» (2018-2020).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация написана на 113 страницах машинописного текста и состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников, содержит 44 рисунка и 23 таблицы. Список использованных источников включает 87 наименований.