

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

УДК 621.039

**КИЕВИЦКАЯ**

**Анна Ивановна**

**НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПОДКРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: СТЕНД «ЯЛНА»**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.16

физика атомного ядра и элементарных частиц

Минск –2017

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси

Официальные оппоненты: **Панков Александр Альбертович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого  
**Лопаткин Александр Викторович**, доктор технических наук, заместитель директора НИКИЭТ имени Н.А.Доллежала, г. Москва  
**Андреев Виктор Васильевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Оппонирующая организация - Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

Защита состоится «\_1\_» декабря 2017 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси» по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68; тел.: 8 (017) 284-15-59.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Якуба Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан «\_» 2017 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
кандидат физико-математических наук

Ю.П. Выблый

## ВВЕДЕНИЕ

В промышленно развитых странах доля электричества, производимого на атомных энергетических станциях (АЭС), составляет около 30% и неуклонно увеличивается. Сейчас в мире работают 437 блоков общей мощностью более 373 ГВт, из них большинство эксплуатируемых реакторов (269) относится к реакторам на тепловых нейтронах. Республика Беларусь приступила к строительству АЭС с двумя энергоблоками ВВЭР по 1200 МВт каждый [28, 61].

Существующая технология производства электроэнергии на АЭС основана, главным образом, на тепловых ядерных реакторах с водяным или графитовым замедлителем нейтронов и не может обеспечить дальнейшее развитие атомной энергетики. Во-первых, потому, что в них используется обогащенный по изотопу U-235 уран, содержание которого в природном уране составляет всего лишь 0,72%. Во-вторых, выгруженное отработавшее ядерное топливо с действующих АЭС приходится размещать в дорогостоящих временных хранилищах из-за отсутствия надежных и эффективных технологий его переработки.

Для реализации потенциала атомной энергетики как основного источника энергии будущего необходимо, чтобы она была безопасной и имела эффективные технологии для переработки отходов. Проблема обращения с отработавшим топливом может быть решена принципиально иным образом при осуществлении переработки топлива и фракционирования радиоактивных нуклидов.

Таким новым направлением, быстро развивающимся в последние годы, является создание новых технологий ядерной переработки, в частности ядерной трансмутации – преобразовании долгоживущих радионуклидов в стабильные или короткоживущие нуклиды под действием нейтронов, протонов, ионов, электронов и других частиц.

Предполагается, что нейтронная трансмутация долгоживущих радиоактивных материалов с использованием синергических систем станет наиболее перспективным направлением ядерной трансмутации. Синергические системы предполагают объединение различных технологий, в том числе и ядерных (технологии деления, синтеза и расщепления ядер высокоэнергетическими пучками частиц), для разработки целостной системы производства энергии и создания энергопроизводящих систем.

В направлении «синергические системы» можно выделить две ветви: разработка термоядерных источников нейтронов с подкритическим бланкетом и

создание подкритических реакторов, управляемых ускорителем заряженных частиц (протонов, ионов или электронов).

В 90-х годах XX-го века начала интенсивно разрабатываться концепция применения ускорителей высоких энергий для крупномасштабного использования реакций расщепления в тяжелых протяженных мишенях с целью генерации нейтронов, которые, размножаясь в подкритическом ( $k_{эфф} \sim 0,9-0,98$ ) blankets, вызывают реакции деления ядер урана (Accelerator Driven Systems — ADS). Такая система позволяет получать достаточно высокие потоки нейтронов ( $\Phi \sim 10^{15-17}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ), которые могут быть использованы для выработки энергии, трансмутации радиотоксичных изотопов или наработки трития для термоядерных источников.

Основная идея, на которой основаны все ADS-системы, состоит в использовании ускорителей заряженных частиц высоких энергий для производства нейтронов в мишенях из тяжелых элементов (Pb, Bi, W, U, Pb-Bi эвтектика) с последующим их размножением в подкритических ( $k_{эфф} \sim 0,9-0,98$ ) blankets. ADS-система состоит из ускорителя высокоэнергетических протонов, мишени, подкритического blankets с коэффициентом умножения  $M = 1/(1 - k_{эфф}) \sim 50$ , парогенератора, турбины и электрогенератора (рисунок 1). Прекращение работы ускорителя приводит к прекращению ввода нейтронов из мишени в подкритический blankets, что приводит к практически мгновенному затуханию цепной ядерной реакции.

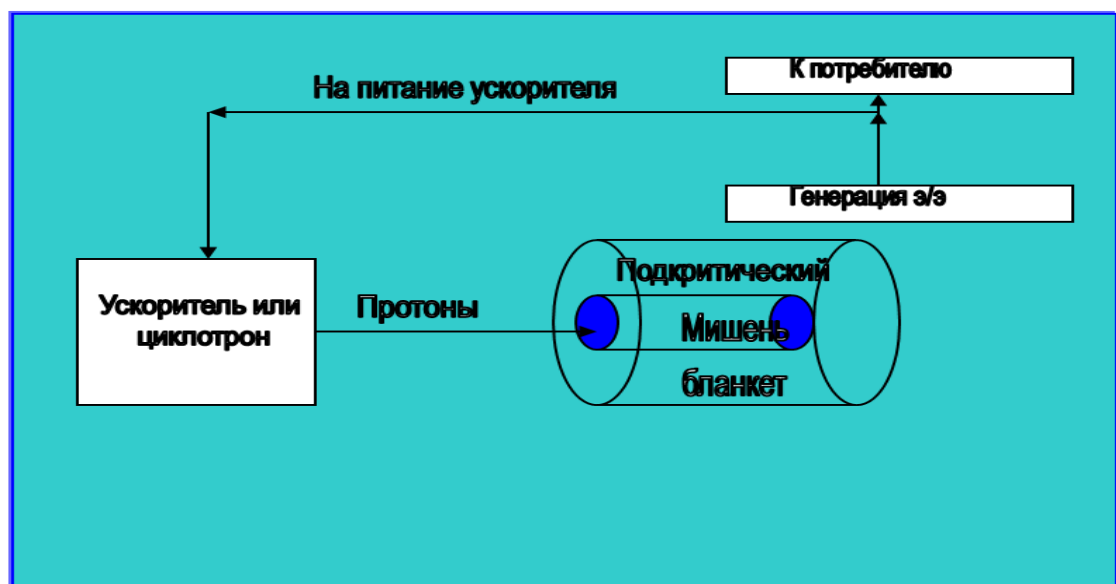


Рисунок 1. – Приципиальная схема ADS

Для реализации ADS-систем необходимо решить ряд физических и технических задач:

- 1) выбрать энергию и ток протонного пучка и создать ускоритель с требуемыми параметрами;
- 2) выбрать материал мишени и создать оптимальную конструкцию мишени для получения нейтронов расщепления;
- 3) разработать схему съема тепла в мишенном блоке;
- 4) разработать схему и конструкцию подкритического blankets и обеспечить ядерную безопасность;
- 5) разработать схему съема тепла в подкритическом blankets;
- б) определить скорости реакций трансмутации долгоживущих нуклидов и скорости их наработки.

К настоящему времени, несмотря на достаточно большое количество теоретических работ, проблема получения наиболее оптимального энергетического спектра нейтронов для трансмутации долгоживущих осколков деления (йод, цезий, стронций, цирконий) и минор-актинидов (нептуний, плутоний, америций, кюрий) остается одной из наиболее актуальных. Это связано, в первую очередь, с недостаточно точными данными по сечениям взаимодействия нейтронов с радиоактивными ядрами в широком диапазоне энергий от эВ – до 10 ГэВ. Поэтому представляет значительный интерес возможность экспериментальных исследований различных аспектов ADS на основе ускорителей низких энергий (до 30 МэВ) – циклотронов, микротронов, а также ускорителей ионов дейтерия – генераторов нейтронов высокой интенсивности [6–9, 15, 32, 33, 43, 63–66, 74].

Использование таких установок позволяет проводить экспериментальные исследования с целью: а) изучения поведения реактора при наличии внешнего источника; б) изучения структуры активной зоны и др., для последующего планирования экспериментов на ускорителях высоких энергий. Аналогичная ситуация в свое время имела место и в атомной энергетике. Многие физические характеристики энергетических ядерных реакторов и, в первую очередь, активных зон изучались и изучаются на критических сборках.

Разработка концепции использования низкоэнергетических ускорителей ионов (циклотронов, микротронов, генераторов нейтронов) для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых внешними источниками, и технологий трансмутации была начата в Институте радиационных физико-химических проблем Национальной академии наук Беларуси (в настоящее время — ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны») соискателем под

руководством кандидата физико-математических наук С.Е. Чигринова [8,9,15,17]. Концепция явилась фундаментом при проектировании и сооружении первого в мире уникального ядерно-физического подкритического экспериментального комплекса «Яліна».

Результаты исследований, выполненных при разработке проектов подкритических уран-полиэтиленовой и бустерной сборок ядерно-физического подкритического стенда «Яліна», их создании, пуске в эксплуатацию и эксплуатации, составляют основное содержание данной работы.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с крупными научными программами и проектами

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011-2015 годы: 1. Энергообеспечение, энергосбережение, энергоэффективность. Новые энерго-экономичные материалы и технологии: 1.2. безопасность атомной энергетики на всех стадиях топливного цикла, обращение с радиоактивными отходами; 1.3. ядерно-физические технологии в научных исследованиях, промышленности, здравоохранении и сельском хозяйстве.

Диссертационная работа выполнена в рамках следующих заданий:

- № ГР\_20062863 «Экспериментальные и теоретические исследования нейтронно-физических процессов в бустерных подкритических системах с тепловым и быстрым спектрами нейтронов, управляемых ускорителями частиц высоких энергий, для изучения технологий трансмутации» ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии»;

- № ГР\_20081022 «Определение основных параметров активной зоны и характеристик бустерной подкритической сборки «ЯЛІНА-Бустер» по плану Интегрированного проекта «Европейская исследовательская программа по трансмутации высокоактивных ядерных отходов в системах, управляемых ускорителями (ЕВРОТРАНС);

- № ГР\_20100172 «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009-2010 годы и на период до 2020 года. Организация эффективного международного сотрудничества по обеспечению атомной энергетики»;

- № ГР\_201000173 «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009-2010 годы и на период до 2020 года. Выполнение работ по перспективному развитию атомной энергетики»;

- № ГР\_20111612 «Исследования нейтронно-физических характеристик инновационной подкритической сборки YALINA-FAST с топливом низкого обогащения для целей оптимизации условий трансмутации минорных актинидов (Np, Am, Cm), имеющих большой период полураспада»; ГПНИ «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии»;

- № ГР\_20141691 «Расчетно-теоретические исследования основных нейтронно-физических параметров подкритической исследовательской ядерной установки с быстрым спектром нейтронов с урановым топливом низкого обогащения» ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика»;

- проектов международного научно-технического центра:

- В-70-98 «Теоретические и экспериментальные исследования особенностей трансмутации долгоживущих продуктов деления младших актинидов в подкритической сборке, управляемой генератором нейтронов» (1998–2005);
- В-1341 и В1732Р «Аналитическая и экспериментальная оценка возможности создания универсального объемного источника нейтронов в подкритической бустерной сборке с низкообогащенным урановым топливом, управляемой генератором нейтронов» (2005–2009, 2009–2013);
- проекта МАГАТЭ 13389/RO «Теоретические и экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик подкритической бустерной сборки, управляемой генератором нейтронов» (2006–2010);

- заданий Координационного плана НИР с Объединенным институтом ядерных исследований (г. Дубна, Россия):

- № 03-1-0940-91/2005 «Исследование рождения вторичных частиц и выхода нейтронов из тяжелых мишеней в ядерных взаимодействиях. Изучение трансмутации радиоактивных отходов ядерных энергетических установок»;
- № 03-01-1008-1995/2005 «Теоретические и экспериментальные исследования электроядерного способа получения энергии и трансмутации радиоактивных отходов».

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является обоснование, разработка и создание ядерно-физического подкритического стенда ««Яліна» для экспериментального определения и апробации результатов теоретических расчетов нейтронно-физических характеристик перспективных ядерно-энергетических систем.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Обосновать концепцию использования низкоэнергетических (до 30 МэВ) ускорителей ионов (циклотронов, микротронов, нейтронных генераторов)



в качестве внешнего источника для исследований физических и кинетических характеристик подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий ( $> 100$  МэВ), и изучения технологий ядерной трансмутации в подкритических системах.

2. Разработать и создать конструкцию ядерно-физического подкритического стенда из имеющихся в Национальной академии наук Беларуси топливных, замедляющих и конструкционных материалов на основе предложенной концепции.

3. Разработать физическую и конструкционную модели подкритической сборки с тепловым спектром нейтронов с внешним источником нейтронов, провести ее физический пуск и измерения основных нейтронно-физических характеристик, включая скоростей реакций трансмутации йода-129, нептуния-237 и америция-243.

4. Выполнить необходимый комплекс нейтронно-физических расчетов, создать и произвести физический пуск подкритической сборки с быстро-тепловым спектром нейтронов с внешним источником нейтронов, выполнить измерения ее основных нейтронно-физических характеристик и измерения скоростей реакций трансмутации йода-129, нептуния-237 и америция-243.

Основной объект исследования – подкритические системы, управляемые внешним источником. Предметами исследования являются: 1) подкритические уран-полиэтиленовая и бустерная сборки; 2) расчетные и экспериментальные нейтронно-физические характеристики подкритических уран-полиэтиленовой и бустерной сборок; 3) их ядерная безопасность; 4) скорости реакций трансмутации долгоживущих продуктов деления и минорных актинидов.

## **Методология исследования**

Логика построения диссертации следующая.

**В общей характеристике работы** показана связь её с крупными научными проектами и темами, сформулированы цель и задачи исследования, положения диссертации, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации и опубликованности результатов диссертации, а также о ее структуре и объеме.

**В главе 1** исследуются общие вопросы, касающиеся ядерно-физических процессов, происходящих в подкритических электроядерных системах; при этом используется унифицированный подход к расчетам нейтронно-

физических характеристик, основанный на использовании современных расчетных кодов на базе метода Монте Карло и библиотек оцененных ядерных данных для описания процессов, происходящих в диапазоне энергий от 0,025эВ до 5 ГэВ.

**В главе 2** на основе метода, изложенного в главе 1, обосновываются физическая и конструкторская модели подкритической уран-полиэтиленовой сборки, ее нейтронно-физические характеристики, ядерная и радиационная безопасность; приводятся экспериментальные и расчетные данные, проводится сравнение расчетных и экспериментальных параметров.

**В главе 3** на основе метода, изложенного в главе 1, обосновываются физическая и конструкционная модели подкритической бустерной сборки, ее нейтронно-физические характеристики, ядерная и радиационная безопасность; приводятся экспериментальные данные и сравниваются с расчетными параметрами.

**В главе 4** рассматриваются проблемы обращения с долгоживущими радионуклидами, накопленными за время эксплуатации АЭС; вопросы трансмутации продуктов деления и минорных актинидов на примере изотопов йода, нептуния и америция; приводятся расчетные и экспериментальные скорости реакций, полученные на подкритических уран-полиэтиленовой и бустерной сборках.

**В разделе "Заключение"** дается краткое изложение сущности научных результатов диссертационной работы и обсуждаются возможности их практического применения.

**В Приложениях А и Б** приводятся рисунки с экспериментальными и расчетными данными, полученными для подкритическихборок соответственно «Яліна-Тепловая» и «Яліна-Бустер», управляемых генератором нейтронов.

**В Приложении В** представлены акты внедрения результатов в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» (Украина), Аргоннской национальной лаборатории (США), Королевском техническом институте (Швеция) и Международном агентстве по атомной энергии (Австрия).

Общая методическая установка диссертации – исследовать проблемы разработок инновационных ядерно-энергетических систем и показать возможности их создания для решения проблем современной атомной энергетики.

## Научная новизна и значимость полученных результатов

### Впервые:

1. Предложена и обоснована концепция использования низкоэнергетических (до 30 МэВ) ускорителей (циклотроны, микротроны, генераторы нейтронов) для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий (выше 100 МэВ).

2. Созданы и пущены в эксплуатацию подкритические сборки «Яліна-Тепловая» и «Яліна-Бустер», управляемые генератором нейтронов.

**По первой главе.** Впервые теоретически обосновано применение низкоэнергетических ускорителей типа циклотронов или ускорителей ионов (нейтронных генераторов) для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий. Предложен и обоснован метод расчета нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых как ускорителем высоких энергий, так и внешними источниками нейтронов (генераторы нейтронов, циклотроны и др. Обоснована независимость энергетического распределения нейтронов, вылетающих из протяженных тяжелых мишеней, от энергии и типа первичного пучка. Показано, что скорости реакций трансмутации в системах мишень–бланкет, в основном, зависят от степени развития нуклон/мезонного каскада, т.е. от числа нейтронов, образующихся в реакциях расщепления.

**По второй главе.** Впервые в Республике Беларусь разработаны оригинальные концепция, физическая и конструкционная модели подкритической уран-полиэтиленовой сборки с тепловым спектром нейтронов, управляемой генератором нейтронов, на основе предложенной и реализованной в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси идеи. Сборка построена, осуществлен ее физический пуск. Исследовательская ядерная установка с  $k_{эфф} \leq 0,98$  – подкритическая сборка «Яліна-Тепловая», состоящая из активной зоны, отражателя и свинцовой мишени, расположенной в центре активной зоны, сдана в эксплуатацию. Впервые получены экспериментальные характеристики (эффективный коэффициент размножения, плотности нейтронного потока в экспериментальных каналах, скорости реакций захвата и др.) на стадии физического пуска. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных. Для восстановления нейтронного спектра в подкритической уран-полиэтиленовой сборке использовался метод эффективных сечений пороговых реакций на изотопах  $^{115}\text{In}$ ,  $^{19}\text{Fe}$ ,  $^{27}\text{Al}$  и др. Характерной особенностью подкритического стенда является оригинальный

проект, позволяющий изменять конфигурацию активной зоны для проведения экспериментальных исследований с различными уровнями подкритичности, использовать различные типы внешних источников нейтронов ( $^{252}\text{Cf}$ ;  $d(d,n)^3\text{He}$  или  $d(t,n)^4\text{He}$ ) и размещать их на различных расстояниях от центра активной зоны. Оригинальная конструкция подкритической уран-полиэтиленовой сборки, возможность применения различных типов внешних источников, оказалась востребованной мировым научным сообществом. Сборка «Яліна-Тепловая» была первой в мире подкритической системой, управляемой внешним источником, внесена в базу исследовательских ядерных установок МАГАТЭ и используется как международный бенчмарк для ADS-систем. Представлены результаты расчетов НФХ сборки, выполненных в ядерных центрах Аргентины, Индии, Кореи, Польши, Сербии, США в рамках международного бенчмарка МАГАТЭ.

**По третьей главе.** Представлены не имеющие аналогов концепция, физическая и конструкционная модели новой ядерно-физической экспериментальной установки «Яліна-Бустер» с быстро-тепловым спектром нейтронов. Обоснована ядерная и радиационная безопасность сборки. ИЯУ с  $k_{\text{эфф}} \leq 0,975$ , состоящая из подкритического blankets (двухзонной активной зоны), отражателя и свинцовой мишени, расположенной в центре blankets, сконструирована и пущена в эксплуатацию в 2005 году. Реализованные в конструкции сборки технические решения значительно улучшили ее эксплуатационные характеристики по сравнению с уран-полиэтиленовой сборкой. Определяющий вклад в нейтронно-физические характеристики подкритической бустерной сборки вносит тепловая зона. Каждая из зон подкритической сборки имеет свой ярко выраженный спектр нейтронов: быстрый (средняя энергия  $\sim 1$  МэВ) в зоне бустера и тепловой — в тепловой зоне. Исследовано влияние конфигурации загрузки топлива на размножающие свойства сборки. Так, замена металлического топлива 90%-го обогащения на 36 и 21%-ную двуокись урана приводит к некоторому смягчению спектра в центральной подзоне быстрой зоны, в тепловой зоне спектр не меняется, что приводит к уменьшению расчетного значения  $k_{\text{эфф}}$  сборки: 0,978 для конфигурации 1, 0,975 для конфигурации 2 и 0,961 для конфигурации 3. Изменение прямоугольной конфигурации быстрой и промежуточной зон на круговую позволяет увеличить  $k_{\text{эфф}}$  сборки до 0,964 без загрузки дополнительного количества топлива в тепловую зону.

Сборка «Яліна-Бустер», как и «Яліна-Тепловая», внесена в базу исследовательских ядерных установок МАГАТЭ и используется как международный бенчмарк для ADS-систем.

**По четвертой главе.** Представлены экспериментальные и расчетные скорости реакции захвата для образцов йода, нептуния и америция в экспериментальных каналах подкритической уран-полиэтиленовой сборки «Яліна-Тепловая» при облучении нейтронами с энергией 2,5 МэВ. Полученные результаты демонстрируют удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных для спектра нейтронов, характерного для тепловых систем. Выполнены экспериментальные и расчетные исследования скоростей реакции захвата для образцов йода, нептуния и америция в экспериментальных каналах подкритической бустерной сборки «Яліна-Бустер» (Конфигурация 3) при облучении нейтронами с энергией ~14 МэВ. Проведенные исследования показали неплохое согласие экспериментальных и расчетных данных для мишени из  $^{129}\text{I}$ , размещенной в экспериментальном канале ЕСТ6 тепловой зоны бустерной сборки. Для мишеней из  $^{237}\text{Np}$  и  $^{243}\text{Am}$  наблюдается значительное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями при их размещении в каналах ЕСВ2 и ЕСТ6. Исследования скоростей реакции захвата для образцов йода, нептуния и америция представляют большой интерес для уточнения сечений реакций при переоценке библиотек ядерных данных, а также для разработки технологий трансмутации ПД и МА в подкритических ядерно-энергетических системах, управляемых внешними источниками нейтронов, таких как, например, ADS и термоядерные источники нейтронов (ТИН).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Концепция использования низкоэнергетических (до 30 МэВ) ускорителей (циклотроны, микротроны, генераторы нейтронов) для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий (> 100 МэВ).

2. Концепция, физическая и конструкционная модели ядерно-физического подкритического стенда, состоящего из обладающих мировой новизной уран-полиэтиленовой и быстро-тепловой подкритических сборок.

3. Комплекс нейтронно-физических характеристик уран-полиэтиленовой подкритической сборки «Яліна-Тепловая», включающий: а) экспериментальные и расчетные зависимости эффективного коэффициента размножения от количества загружаемых топливных элементов; б) аксиальные распределения

скорости деления  $^{232}\text{Th}$  при облучении нейтронами с энергией 2,5 МэВ; в) нейтронные спектры и скорости реакций  $^{115}\text{I}(n,n')^{115}\text{In}^m$ ,  $^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{23}\text{Na}$ ; г) аксиальное и радиальное распределения плотностей потока нейтронов, д) скорости и сечения реакций трансмутации йода-129, нептуния-237 и америция-243 при облучении нейтронами с энергией 2,5 МэВ.

4. Нейтронно-физические характеристики бустерной подкритической сборки «Яліна-Бустер» для четырех конфигураций активной зоны: а) эффективный коэффициент размножения; б) аксиальные и радиальные распределения скорости счета малогабаритного  $^3\text{He}$ -детектора в экспериментальных каналах быстрой и тепловой подзон активной зоны; в) аксиальные распределения скорости реакции деления  $^{235}\text{U}(n,f)$ ; г) скорости реакций трансмутации нептуния-237 и америция-243 при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ.

#### **Личный вклад соискателя**

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад соискателя в исследования, выполненные авторским коллективом. Первоначальный подход к проблеме был сформулирован под руководством кандидата физико-математических наук С.Е. Чигринова. Конструкции подкритических сборок «Яліна-Тепловая» и «Яліна-Бустер» были разработаны совместно с И.Г. Серафимовичем, С.Е. Чигриновым, А.М. Хильмановичем, А.П. Малыхиным, К.К. Рутковской, В.А. Левадным, О.И. Ярошевичем. Теоретические исследования проводились совместно с Ю.Г. Фоковым, К.К. Рутковской и С.М. Садовичем. С 2005 года автором осуществлялось научное руководство исследованиями на ЯФПКС «Яліна», формулировались основные направления исследований и интерпретировались полученные результаты.

Персонал стенда «Яліна» в составе В.В. Бурноса, И.А.Едчика, С.Э.Мазаника, И.Г.Серафимовича, А.С. Нестеровича, А.А. Адамовича, В.А. Левадного, А.П. Малыхина при руководстве соискателя отвечал за подготовку и проведение физических пусков, проведение экспериментальных исследований на исследовательской ядерной установке «Яліна». Обработка результатов экспериментов проводилась В.В.Бурносом, С.В.Корнеевым, Б.А. Марцинкевичем, С.М. Садовичем, А.М.Хильмановичем. Значительную часть нейтронно-физических расчетов выполнили Ю.Г.Фоков и К.К. Рутковская.

Основные результаты диссертации получены соискателем лично или под его научным руководством. Личный вклад в получение результатов и положений, выносимых на защиту, является определяющим.

По теме диссертации опубликовано 27 статей в журналах, 38 докладов в трудах международных конференций, 10 препринтов, издана 1 монография с соавторами В.В. Зеневичем, А.В. Кузьминым, В.А. Брылевой, Л.П. Домашенко, Ю.И. Едчиком, Д.М. Максимовичем «Культура физической ядерной безопасности». Опубликованные по теме диссертации работы написаны соискателем после анализа и обсуждения полученных результатов с соавторами работ. Основными соавторами работ по теме диссертации являются В.В. Бурнос, В. Гудовски, Й.Гохар, С.Е. Чигринов, К.К. Рутковская, Ю.Г. Фоков, а также В.В. Барашенков, К.Бродерс, Д.Виллемарин, С.В.Корнеев, А.В.Куликовская, С.Э. Мазаник, Б.А.Марцинкевич, С.М. Садович, И.Г.Серафимович, А.М. Хильманович, С.Е. Чигринов, А. Таламо, В.И.Кувшинов, И.В. Жук, А.С. Потапенко, Л.И.Сальников, Т.Н.Корбут, В.В.Зеневич, С.Ф.Булыга, В.А. Брылева, И.А. Едчик, И.Л. Рахно, В.А.Петлицкий.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, докладывались на международных конференциях «Accelerator Driven Transmutation Technologies&Applications (ADTTA)» 1996, 1999, 2001; научном семинаре «Проблемы использования ядерной энергии», посвященном 85-летию академика А.К. Красина, 1996; Международных конференциях «Атомная энергетика в 21 веке» 2008, 2010, 2012, 2014; на международных семинарах «Nonlinear Dynamics and applications» 2006, 2007, 2010, 2014 и «Nonlinear Phenomena in Complex Systems» 2011; конференциях по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013), ICENES 1993, 1997, GLOBAL97; международной конференции «Physics of Nuclear Science and Technology» 1998; международной конференции «Advanced Reactors with Innovative Fuels» ARWIF 2001; международных совещаниях «Use of low enriched uranium in Accelerator Driven Subcritical assemblies» 2005, 2006, 2008, 2012, 2011, 2013; международных конференциях PHYSOR 2012, ЯДРО-2014; технических совещаниях МАГАТЭ по вопросам применения электроядерных систем и использования низкообогащенного урана; 3-ей международной конференции «Инновационные технологии для ядерной

энергетики 2014», 10-й Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» 2015.

### **Опубликованность результатов**

По теме диссертации опубликовано: 27 статей в рецензируемых международных и республиканских журналах; 10 препринтов, 1 монография; 38 докладов в трудах международных конференций. Результаты прошли апробацию на многих международных конференциях, совещаниях и семинарах. Общее количество страниц опубликованных материалов: статьи в журналах – 23,6 а.л., монография – 6,3 а.л., препринты – 26,5 а.л.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех оригинальных глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций и трех приложений. В оригинальных главах излагаются метод расчета нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых как ускорителем высоких энергий, так и генератором нейтронов (глава 1), применяемый далее для расчетов нейтронно-физических характеристик уран-полиэтиленовой (глава 2), бустерной (глава 3) и подкритическихборок, а также для расчетов скоростей и сечений реакций трансмутации (глава 4). Полный объем диссертации составляет 196 страниц, из которых 23 занимают 43 рисунка, 18 — использованные источники из 76 наименований и список публикаций соискателя из 76 наименований, 26 страниц занимают 3 приложения.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе обосновывается актуальность диссертационной работы и обсуждается место работ соискателя в ряду современных исследований в области инновационных ядерно-энергетических систем; проведен литературный обзор проблем, стоящих перед разработчиками инновационных ядерных систем для трансмутации и производства энергии; дано описание ядерно-физических процессов, происходящих в подкритических системах, управляемых как ускорителями заряженных частиц высоких энергий, так и внешними нейтронными источниками; предложен и обоснован метод расчета нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых как ускорителем высоких энергий, так и генератором нейтронов (внешние источники нейтронов).

Представлены экспериментальные и расчетные данные по выходам нейтронов из свинцовых, урановых, вольфрамовых мишеней при облучении пучками протонов высоких энергий, а также их спектры. Для свинцовых мишеней приводятся расчетные и экспериментальные выходы нейтронов (Таблица 1), их спектры при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ

Таблица 1. – Выход нейтронов из свинцовой мишени диаметром 10,2 см и длиной 61 см, облучаемой пучком протонов

Мишень	Энергия протона, ГэВ	Эксперимент, BNL	LANET	SONET [34]	MCNPX[40]
Pb	0,8	$13,60 \pm 0,2$	14,96	$15,00 \pm 0,35$	$14,45 \pm 0,2$
Pb	1,0	$17,38 \pm 0,2$	19,82	$16,90 \pm 0,35$	$18,64 \pm 0,2$
Pb	1,2	$22,31 \pm 0,3$	24,25	$23,30 \pm 0,40$	$23,20 \pm 0,2$
Pb	1,4	$26,21 \pm 0,45$	28,26	$26,10 \pm 0,30$	$27,09 \pm 0,3$

Впервые теоретически обосновано применение низкоэнергетических ускорителей типа циклотронов и нейтронных генераторов для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий. Обоснована независимость энергетического

распределения нейтронов, вылетающих из протяженных тяжелых мишеней, от энергии и типа первичного пучка.

Обоснование основано на сходстве механизмов ядерных реакций в области высоких (20 МэВ - 2 ГэВ) и низких энергий ( $\leq 20$  МэВ), что приводит к подобию энергетических распределений нейтронов в интервале  $E_n \leq 20$  МэВ как при облучении мишеней высокоэнергетическими протонами, так и при облучении нейтронами с энергией ниже 20 МэВ. Если принять во внимание процесс замедления частиц в протяженных мишенях и деление ядер во всем интервале энергий, то энергетические распределения нейтронов, вылетающих из протяженных мишеней из тяжелых металлов (Pb, Bi, Th, U) при облучении протонами высоких энергий ( $E_p \approx 0,8 - 2,0$  ГэВ) или нейтронами с энергией  $E_n < 20$  МэВ, будут одинаковыми в диапазоне энергий  $E_n < 15 - 20$  МэВ.

Поскольку в неупругих реакциях нейтронов с энергией  $\sim 14$  МэВ основной вклад в спектр нейтронов дает испарительная стадия [5, 26, 63, 29], то спектры нейтронов утечки из протяженных мишеней из тяжелых металлов (W, Pb, Th, Bi, U), облучаемых нейтронами, образующимися в реакциях  $D + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ , и протонами высоких энергий ( $E_p \approx 0,8 - 2,0$  ГэВ), должны иметь одинаковую форму в диапазоне энергий  $E_n < 15 - 20$  МэВ. Именно это обстоятельство приводит к тому, что энергетический спектр нейтронов не зависит от типа первичной частицы и материала мишени.

В связи с этим распределение нейтронов с  $E_n < 15 - 20$  МэВ, вылетающих из мишеней:

$$F(E_i) = \frac{1}{N_{sp}} \cdot \frac{1}{\frac{E_i}{E_p}} \cdot \frac{dN_i}{\frac{dE_i}{E_p}}$$

где  $E_i$  – энергия нейтронов, вылетающих из протяженных мишеней;

$E_p$  – энергия первичной частицы;

$N_{sp}$  – число нейтронов, вылетающих из мишени с  $E_n < 15 - 20$  МэВ,

будет иметь одинаковый вид как при облучении первичными нейтронами с энергией  $\sim 14$  МэВ, так и при облучении протонами в области энергий нескольких ГэВ.

Во **второй** главе представлены обладающие мировой новизной: обоснование концепции, физическая и конструкционная модели

подкритической уран-полиэтиленовой сборки «Яліна-Тепловая» с тепловым спектром нейтронов, управляемой генератором нейтронов.

При разработке физической модели и конструкции подкритической сборки было выполнено большое количество расчетов с целью выбора оптимальных материального состава и геометрии. Конструкция и материальный состав сборки должны обеспечивать коэффициент размножения не выше 0,975 в режиме пуска и эксплуатации для обеспечения ядерной и радиационной безопасности. Использовались имеющиеся в Национальной академии наук Беларуси ядерные и конструкционные материалы.

Обосновано использование замедляющих, топливных и конструкционных материалов в конструкции сборки. Показано, что наиболее перспективной конструкцией с точки зрения изучения скоростей реакций трансмутации и нейтронной физики представляется конструкция, состоящая из свинцовой мишени и подкритического blankets, окруженного графитовым отражателем.

Проведенные расчетные исследования показали, что наиболее перспективной конструкцией с точки зрения изучения скоростей реакций трансмутации и нейтронной физики представляется конструкция, состоящая из свинцовой мишени и подкритического blankets, окруженного графитовым отражателем.

Одной из основных систем генератора нейтронов является титан-дейтериевая или титан-третиевая мишени, при взаимодействии ускоренных ионов с которыми рождаются нейтроны с энергией 2,5 или ~14 МэВ. Для того, чтобы нейтрон не вылетел из мишени без взаимодействия с материалом мишени, должно произойти, как минимум, 2 – 3 неупругих взаимодействия. Пробег до неупругого взаимодействия определяется следующим соотношением:

$$\lambda_{in} = 1 / (\sigma_{in} \rho),$$

где  $\rho$  – концентрация ядер свинца,

$\sigma_{in}$  – микросечение неупругого взаимодействия нейтрона с ядром свинца.

Сечение неупругого взаимодействия нейтрона с энергией ~14 МэВ с ядром свинца составляет около 3,865 барн, полное сечение взаимодействия – 5,835 барн ([www-nds.iaea.org](http://www-nds.iaea.org)). Таким образом, пробег до неупругого взаимодействия ~ 8 см, т.е. минимальная длина мишени должна быть не менее 24 см. Поскольку по радиусу мишень окружается blankets, то размер мишени по радиусу можно сделать минимальным, чтобы максимальное количество

нейтронов источника попадало в бланкет. Исходя из вышеизложенного, были определены размеры свинцовой мишени, а именно радиус  $\sim 10,0$  см и длина  $\sim 60,0$  см.

Выбор полиэтилена в качестве замедлителя в активной зоне основан на его свойствах, а именно: 1) замедляющая способность  $\xi\Sigma_s$  в интервале энергий 1эВ – 100 кэВ порядка 3,26) и 2) коэффициент замедления  $\xi\Sigma_s \Sigma_a^{-1} \sim 122,3$ .

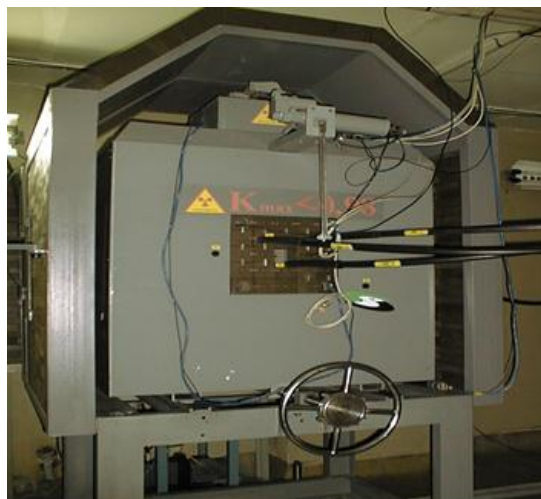
Топливо в виде двуокиси урана с обогащением 10% позволяет сформировать тепловой спектр нейтронов, что обусловило выбор тепловыделяющих элементов типа ЭК-10.

Для уменьшения утечки нейтронов в качестве материала отражателя был выбран графит. Полное сечение взаимодействия нейтронов тепловой энергии с ядром графита составляет 4,9102 барн, а для 14 МэВ – 1,3212 барн (согласно библиотеке оцененных ядерных данных ENDF). Полный пробег составит для тепловых  $\sim 2,5$  см, а для быстрых  $\sim 9,4$  см, т.е толщина графитового отражателя порядка 40 см позволит практически все нейтроны замедлить до тепловых энергий, что позволяет значительно снизить утечку нейтронов.

Исследовательская ядерная установка «Яліна-Тепловая» создана из имеющихся в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси ядерных, конструкционных и замедляющих материалов на основе результатов, изложенных в главе 1.

В 2000 году осуществлен физический пуск подкритической уран-полиэтиленовой сборки «Яліна-Тепловая» с  $k_{эфф} \leq 0,98$  (рисунок 2). Сборка состоит из активной зоны, отражателя и свинцовой мишени, расположенной в центре активной зоны. Пуск в эксплуатацию первой в мире подкритической сборки, управляемой внешним источником, позволил Республике Беларусь занять достойное место среди небольшого количества стран, занимающихся созданием инновационных ядерных установок.

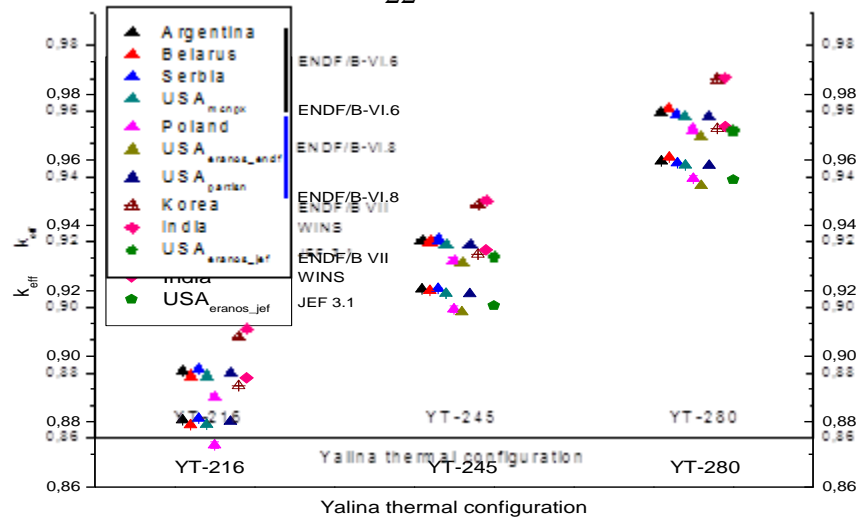
Впервые получены экспериментальные характеристики (эффективный коэффициент размножения, плотности нейтронного потока в экспериментальных каналах, скорости реакций захвата и др.) на стадии физического пуска. Сравнительный анализ показал удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных. Для восстановления нейтронного спектра в подкритической уран-полиэтиленовой сборке использовался метод эффективных сечений пороговых реакций на изотопах  $^{115}\text{In}$ ,  $^{19}\text{Fe}$ ,  $^{27}\text{Al}$  и др., разработанный совместно с ГНУ «Институт физики им. Б.И.Степанова».



**Рисунок 2. – Уран-полиэтиленовая подкритическая сборка**

В главе также представлены нейтронно-физические характеристики подкритической уран-полиэтиленовой сборки, полученные в рамках аналитического бенчмарка МАГАТЭ с участием ядерных центров Аргентины, Индии, Кореи, Польши, Сербии, США и Швеции, и экспериментальные и расчетные данные лаборатории нейтронной физики ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси (рисунок 3).

В главе 3 представлены обладающие мировой новизной концепция, физическая и конструкторская модели не имеющей аналогов новой ядерно-физической экспериментальной установки с быстро-тепловым спектром нейтронов. Сборка «Яліна-Бустер» с  $k_{эф} \leq 0,975$ , состоящая из подкритического blankets (двухзонной активной зоны), отражателя и свинцовой мишени, расположенной в центре blankets, сконструирована и пущена в эксплуатацию в 2005 году (рисунок 4). Основная причина, по которой такие системы представляют интерес, состоит в возможности создания установки на быстрых нейтронах, которая, будучи лишь слегка подкритической, сочетала бы в себе свойства реакторов на быстрых нейтронах, но имела большее время жизни нейтронов, характерное для реакторов на тепловых нейтронах, обеспечивая тем самым безопасность установки. Таким образом, система с бустерной (усилительной) зоной при наличии односторонней нейтронной связи между зонами может быть настоящим мультипликатором нейтронов источника, т.е. усилителем энергии первичного пучка ускорителя частиц. Это позволит существенно уменьшить требования к току пучка ускорителя в энергетических ADS и обеспечить благоприятные условия для трансмутации долгоживущих продуктов деления (ПД) и минор-актинидов (МА).



**Рисунок 3. - Зависимость эффективного коэффициента размножения  $k_{эфф}$  для ПКС «Яліна-Тепловая» от количества загруженных твэлов**

Пуск в эксплуатацию подкритической бустерной сборки подтвердил приоритет Республики Беларусь в области создания инновационных ядерных установок. Реализованные в конструкции сборки технические решения значительно улучшили ее эксплуатационные характеристики по сравнению с уран-полиэтиленовой сборкой.

Основные характеристики подкритической бустерной сборки:

Плотность потока нейтронов с $E_n \sim 1,1$ МэВ	$\sim 10^9$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$
Плотность потока тепловых нейтронов	$\sim 10^9$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$
Максимально возможный коэффициент размножения ( $k_{\max}$ )	$< 0,975$ .

Экспериментальные и расчетные исследования нейтронно-физических характеристик ПКС «Яліна-Бустер» проводились для четырех основных конфигураций активной зоны:

**Конфигурация 1** – центральная зона быстрой зоны загружена урановым топливом 90% -го обогащения, периферийная – двуокись урана 36% -го обогащения по  $^{235}\text{U}$ , тепловая зона – двуокись урана 10%-го обогащения ( $k_{эфф} \leq 0,975$ ).

**Конфигурация 2** - быстрая зона загружена двуокисью урана 36% -го обогащения по  $^{235}\text{U}$ , тепловая зона – двуокись урана 10%-го обогащения.

**Конфигурация 3** - быстрая зона бустерной сборки загружена  $\text{UO}_2$  21%-го обогащения, тепловая зона – двуокись урана 10%-го обогащения.

**Конфигурация 4** - прямоугольная геометрия быстрой и промежуточной зон бустерной сборки зоны заменяется на круговую и загружается топливом 21%-го обогащения.

Впервые рассчитаны и экспериментально получены следующие характеристики: эффективный коэффициент размножения для всех конфигураций активной зоны; аксиальные и радиальные распределения скорости счета малогабаритного  $^3\text{He}$ -детектора в экспериментальных каналах быстрой и тепловой подзон активной зоны для всех конфигураций; аксиальные распределения скорости реакции  $^{235}\text{U}(n,f)$  счета малогабаритного  $^3\text{He}$ -детектора в экспериментальных каналах быстрой и тепловой подзон активной зоны.

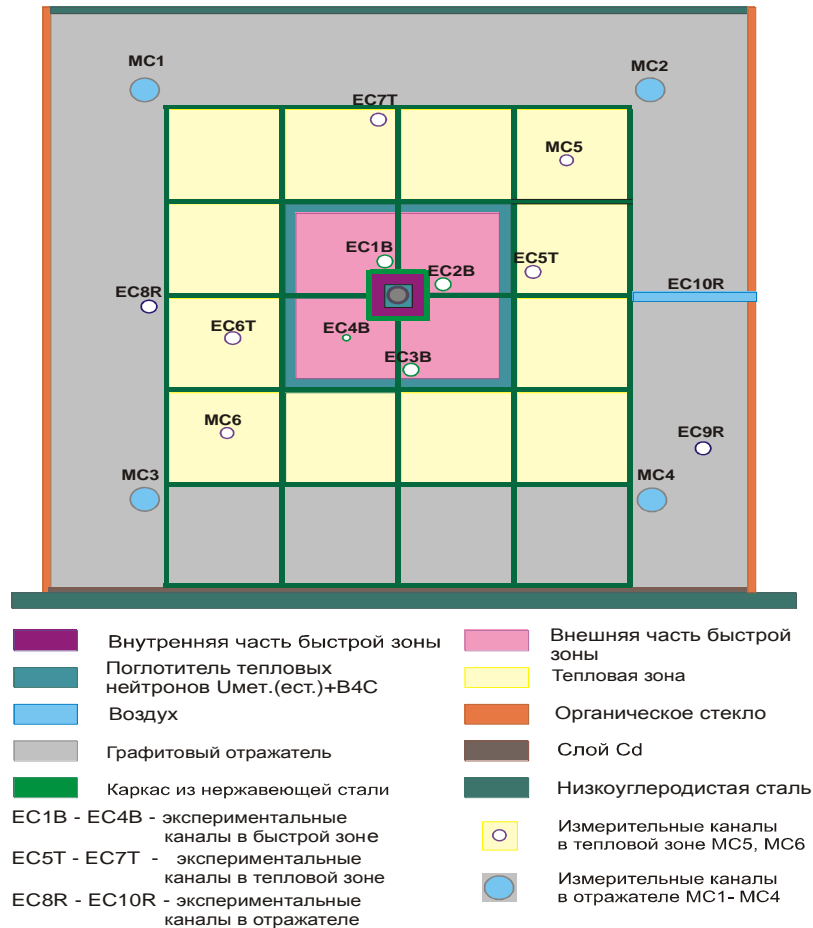
Проведенные исследования показали, что определяющий вклад в нейтронно-физические характеристики подкритической бустерной сборки вносит тепловая зона. Каждая из зон подкритической сборки имеет свой ярко выраженный спектр нейтронов: быстрый (средняя энергия  $\approx 1$  МэВ) в зоне бустера и тепловой в тепловой зоне. Исследовано влияние конфигурации загрузки топлива на размножающие свойства сборки. Так, замена металлического топлива 90%-ного обогащения на 36 и 21%-ную двуокись урана приводит к некоторому смягчению спектра в центральной подзоне быстрой зоны, в тепловой зоне спектр не меняется, а также приводит к уменьшению расчетного значения  $k_{\text{эфф}}$  сборки от 0,978 для конфигурации 1, 0,975 для конфигурации 2 и 0,961 для конфигурации 3. Плотность потока нейтронов при работе нейтронного генератора в dt-режиме достигает  $\sim 10^{10}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \text{с})$  для всех четырех конфигураций.

Замена прямоугольной конфигурации быстрой и промежуточной зон на круговую позволяет увеличить  $k_{\text{эфф}}$  сборки до 0,964 без загрузки дополнительного количества топлива в тепловую зону.

Сборка «Яліна-Бустер», как и «Яліна-Тепловая», внесена в базу исследовательских ядерных установок МАГАТЭ и используется как международный бенчмарк для ADS-систем.

**В главе 4** обсуждается проблема безопасной утилизации накопленных ядерных отходов, технологии нейтронной трансмутации с использованием инновационных ядерных установок. Представлены экспериментальные и расчетные исследования скоростей реакции захвата для образцов йода, нептуния и америция в экспериментальных каналах подкритической уран-полиэтиленовой сборки «Яліна-Тепловая» при облучении нейтронами с энергией 2,5 МэВ (рисунок 5). Полученные результаты демонстрируют удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных для

спектра нейтронов, характерного для тепловых систем. Выполнены экспериментальные и расчетные исследования скоростей реакции захвата для образцов йода, нептуния и америция в экспериментальных каналах подкритической бустерной сборки «Яліна-Бустер» (Конфигурация 3) при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ. В этом канале наблюдается установившийся спектр тепловых нейтронов.

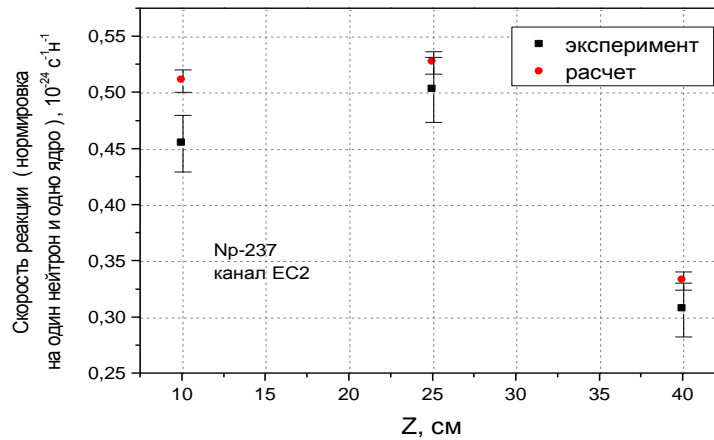


**Рисунок 4. — Схема подкритической сборки «Яліна- Бустер».**  
**Картограмма активной зоны.**

Проведенные исследования показали удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных для  $^{129}\text{I}$ , размещенного в экспериментальном канале EC6T тепловой зоны бустерной сборки. Для образцов  $^{237}\text{Np}$  и  $^{243}\text{Am}$  наблюдается значительное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями при размещении образцов в каналах EC2B и EC6T. В канале EC2B спектр нейтронов жесткий, тепловых нейтронов мало, что приводит к большой погрешности измерений.



Расхождение между экспериментальными и расчетными сечениями уменьшется при размещении образцов нептуния-237 и америция-243 в канале ЕСТ6 вследствие улучшения статистики в тепловом спектре. Исследования скоростей реакции захвата для образцов йода, нептуния и америция представляют большой интерес для уточнения сечений реакций при переоценке библиотек ядерных данных, а также для разработки технологий трансмутации ПД и МА в подкритических ядерно-энергетических системах, управляемых внешними источниками нейтронов, таких как, например, ADS и ТИН.



**Рисунок 5. — Экспериментальные и рассчитанные аксиальные распределения скорости реакции  $^{237}\text{Np}(n, \gamma)^{238}\text{Np}$  в экспериментальном канале EC2 ( $R = 10$  см) ПКС «Яліна-Тепловая»**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Диссертационная работа посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям нейтронно-физических характеристик перспективных ядерно-энергетических систем для выжигания долгоживущих радиоактивных нуклидов и производства энергии на базе ядерно-физического подкритического стенда «Яліна». В данной работе впервые получены следующие результаты:

1. Обоснована концепция использования низкоэнергетических ускорителей (циклотроны, микротроны, генераторы нейтронов) для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий. Предложенная концепция является научно и практически востребованной при исследованиях, разработках и создании инновационных ядерных установок для выжигания долгоживущих радиоактивных нуклидов и производства энергии [1- 9, 15, 27, 31–38, 40 - 45].

2. Предложена концепция подкритического стенда, включающая не имевшие мировых аналогов физические и конструкционные модели подкритических уран-полиэтиленовой и бустерной сборок, управляемых генератором нейтронов [8, 15, 18, 31 – 36, 46].

3. Получены новые результаты при физическом пуске уран-полиэтиленовой подкритической сборки «Яліна-Тепловая». Исследованы экспериментальные и расчетные зависимости: а) эффективного коэффициента размножения от количества загружаемых топливных элементов; б) аксиальные распределения скорости деления  $^{232}\text{Th}$  при облучении нейтронами с энергией 2,5 МэВ; аксиальные распределения скоростей реакций  $^{115}\text{I}(n,n')^{115}\text{In}^m$ ,  $^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{23}\text{Na}$  для базовой конфигурации; в) аксиальное и радиальное распределения плотностей потока нейтронов (быстрых и тепловых) [11,17, 23,40,43,45, 75].

4. Получены новые результаты при физическом пуске бустерной подкритической сборки для четырех конфигураций активной зоны: а) эффективный коэффициент размножения для всех конфигураций активной зоны; б) аксиальные и радиальные распределения скорости счета малогабаритного  $^3\text{He}$ -детектора в экспериментальных каналах быстрой и тепловой подзон активной зоны; в) аксиальные распределения

скорости реакции  $^{235}\text{U}(n,f)$  в экспериментальных каналах быстрой и тепловой подзон активной зоны, измеренные камерой деления [14 – 17].

5. Установлено, что каждая из зон подкритической бустерной сборки имеет свой ярко выраженный спектр нейтронов со средней энергией от  $\sim 1$  МэВ в зоне бустера до теплового в тепловой зоне. Выявлено влияние конфигурации загрузки топлива на размножающие свойства сборки. Изменение прямоугольной конфигурации быстрой и промежуточной зон на круговую позволяет увеличить  $k_{\text{эфф}}$  сборки без загрузки дополнительного количества топлива в тепловую зону [13,15,17, 57, 62].

6. Получены новые рассчитанные и измеренные сечения реакций трансмутации изотопов  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{243}\text{Am}$  при облучении нейтронами с энергией 2,5 МэВ [8, 11, 15, 17, 37, 40, 43, 44] в экспериментальных каналах уран-полиэтиленовой и в экспериментальном канале ЕС6Т бустерной подкритической сборки «Яліна-Бустер» при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ [20 – 24, 58 – 59, 64]. Проведенные исследования показали удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных для  $^{129}\text{I}$ , размещенного в экспериментальном канале ЕС6Т тепловой зоны бустерной сборки. Для нептуния  $^{237}\text{Np}$  и америция  $^{243}\text{Am}$  наблюдается значительное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями при размещении образцов в каналах ЕСВ2 и ЕС6Т. Расхождение между экспериментальными и расчетными сечениями уменьшется при размещении образцов нептуния-237 и америция-243 в канале ЕС6Т вследствие улучшения статистики в тепловом спектре.

7. Впервые на примере подкритической бустерной сборки экспериментально и расчетным путем показано, что определяющий вклад в нейтронно-физические характеристики подкритических быстро-тепловых систем вносит тепловая зона [12, 13, 24, 25, 72].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Впервые в Республике Беларусь создан успешно функционирующий ядерно-физический подкритический стенд, состоящий из двух подкритических сборок, генератора нейтронов, измерительного комплекса и системы жизнеобеспечения. Стенд «Яліна» не имеет мировых аналогов и используется для получения надежных экспериментальных данных («каталога»), которые требуются для разработки технического проекта индустриального прототипа инновационного подкритического реактора (ADS) по связи ускорителя,

мишенного устройства и подкритического blankets. Результаты работы использовались в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия), государственном научном центре Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва, Россия), Королевском технологическом институте (г. Стокгольм, Швеция), Ядерном центре (г. Карлсруэ, Германия), Аргоннской национальной лаборатории (г. Чикаго, США) и могут в дальнейшем использоваться в вышеперечисленных и других ядерных центрах: 1) при разработке проектов ядерных установок для выжигания долгоживущих радиоактивных нуклидов; 2) в прикладных научных исследованиях при проектировании мишенного блока и blankets подкритических ядерных установок, включая blankets термоядерных реакторов; 3) в фундаментальных исследованиях по нейтронной и ядерной физике; 4) при переоценке интегральных сечений реакций захвата и деления йода-129, нептуния-237 и америция-243; 5) для разработки технологий трансмутации продуктов деления и минорных актинидов в подкритических ядерно-энергетических системах, управляемых внешними источниками нейтронов, таких как, например, ADS и термоядерные источники нейтронов; 6) в смежных областях фундаментальных и прикладных исследований (нейтронно-активационный анализ геологических образцов, восстановление нейтронных спектров и др.).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Киевицкая, А.И. Оценки выходов  $\pi$ - мезонов и нуклонов из легких мишеней, облучаемых пучком ядер трития с энергией 1 ГэВ/нукл. / А.И. Киевицкая, С.Е. Чигринов, В.А. Петлицкий // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фіз.-мат. навук. – 1992. – № 3. – С. 91 – 94.
2. Выходы  $\pi$ -мезонов и нуклонов из легких мишеней, облучаемых пучком ядер дейтерия с энергией 1 ГэВ/нукл. / А.И. Киевицкая, К.К. Гудима, В.А. Петлицкий, С.Е. Чигринов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фіз.-энерг. навук. – 1992. – № 2. – С. 8 - 13.
3. Киевицкая, А.И. Оценка возможностей мезокаталитического гибридного реактора по накоплению делящихся нуклидов и анализ баланса энергии /А.И.Киевицкая, В.А. Петлицкий, С.Е. Чигринов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фіз.-энерг. навук. – 1992. – № 2. – С. 13–19.
4.  $\pi$ -mesons and Nucleon Yields from Light Targets Irradiated by Deuterium and Tritium Nuclei Beams at Energies 1 GeV/nucleon /S. Chigrinov, K. Gudima, A. Kievitskaia, V. Petlitski // Hyperfine Interactions. – 1993. – Vol. 77. – P. 149-159.
5. Kievitskaia, A. Relevance of Mesocatalytic Hybrid Reactors for Accumulation of Fissile Nuclei and Energy Balance Analysis /S. Chigrinov, A. Kievitskaia, V. Petlitskij // Nuclear Fusion. – Vol. 33, № 5 – 1993. – P. 815 - 820.
6. Determination of spatial and energy distribution of neutrons in experiments on transmutation of radioactive waste using relative protons // I.Zhuk, E.Lomonosova, S. Boulyga, A.Kievitskaya, I. Rakhno, S.Chigrinov, V.Bradnova, M.Krivopustov, B.Kulakov, R.Brandt, M.Ochs, J.S.-Wan // Radiation Measurements. – 1999. – № 31. – P. 515 – 520.
7. Transmutation of  $^{129}\text{I}$  and  $^{237}\text{Np}$  Using Spallation Neutrons Produced by 1.5, 3.7 and 7.4 GeV Protons / J.S. Wan, Th. Schmidt, E.-J. Langrock, P. Vater, R. Brandt, J. Adam, V. Bradnova, V/P. Bamblevski, L. Gelovani, T.D. Gridnev, V.G.Kalinnikov, M.I. Krivopustov, B.A. Kulakov, A.N. Sosnin, V.P.Perelygin, V.S. Pronskikh, V.I.Stegailov, V.M.Tsourko-Sitnikov, G.Modolo, R.Odoj, M.Zamani-Valassiadou, S. Chigrinov, A. Kievitskaya, I. Rakhno, W.B. Wilson // Nuclear Instruments and Methods in Physical Research: A. – 2001. – Vol. 463, № 3. – P. 634 – 652.
8. Киевицкая, А.И. Подкритический стенд «ЯЛІНА» для изучения нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых

ускорителями / А.И. Киевицкая, Ю.Г. Фоков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2015. – Т. 38, вып. 3. – С. 50 - 55.

9. Peculiarities of neutron fields in the systems “neutron producing target – moderator” irradiated by high energy particles / S.E. Chigrinov, I.G. Serafimovich, V.V. Burnos, Yu.G. Fokov, S.V. Korneev, C.K. Routkovskaia, S.E. Mazanik, A.A. Adamovich, H.I. Kiyavitskaya, A.V. Koulikovskaya, A.M. Khilmanovich, B.A. Martsinkevich, T.N. Korbut, V.S. Butsev // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physical Investigations. – 2005. - № 6. - P. 101 – 105.

10. The Transmutation of Minor Actinides in a System “Proton Accelerator – Lead Neutron-Producing Target – Graphite Neutron Moderator” / T.N. Korbut, B.A. Martsynkevich, H.I. Kiyavitskaya and A. M. Khilmanovich // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2006. – Vol. 9, №1. – P. 87 – 91.

11. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в системе “Свинцовая мишень + подкритическая сборка “Яліна” при облучении нейтронами 2.6 МэВ / А.И. Киевицкая, В.В. Бурнос, И.Г. Серафимович, И.В. Жук, А.С. Потапенко // Приложение к журналу “Весці НАН Беларусі”, сер. физ-тех. наук. - Ч.3. – 2008. - С.189-194.

12. Экспериментальное определение скоростей реакций радиационного захвата нейтронов ядром  $^{238}\text{U}$  в бустерной подкритической сборке “Яліна-Б” / А.А. Сафронова, А.С. Потапенко, И.В. Жук, В.В. Бурнос, И.Г. Серафимович, А.И. Киевицкая // Весці НАН Беларусі, сер. физ-тех. наук. - 2010. - №1. – С. 116-120.

13. Бустерная подкритическая сборка «Яліна–Б», управляемая внешними источниками нейтронов / А.И. Киевицкая, А.В. Куликовская, К.К. Рутковская, А.Ю. Фоков, Ю.Г. Фоков // Доклады НАН Беларусі. – 2006. – Т. 50, № 6. – С. 115 - 118.

14. Analysis of the reactivity determination methods in the subcritical experiment Yalina / С.-М. Persson, P. Seltborg, A. Ahlander, W. Gudowski, T. Stummer, S. Chigrinov, A. Kiyavitskaya, Yu. Fokov, V. Bournos // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2005. Vol. 554, Issues 1- 3. - P. 374 - 383.

15. Киевицкая, А.И. Исследования в области перспективных ядерно-энергетических систем для производства энергии и выжигания радиоактивных отходов / А.И. Киевицкая // Энергетическая стратегия. – 2009. – №5. – С. 28-32.

16. Pulsed neutron source measurements in the subcritical ADS experiment YALINA-Booster / С.-М. Persson, A. Fokau, I. Serafimovich, V. Bournos, Yu. Fokov,

Ch. Routkovskaia, H. Kiyavitskaya, W. Gudowski // *Annals of Nuclear Energy*. - 2008. Vol. 35. - No. 12. - P. 2357 – 2364.

17. Comparison of calculated and measured reaction rates obtained through foil activation in the subcritical dual spectrum facility YALINA-Booster” /M.Tesinsky, C.Berglöf, T. Bäck, B. Martsynkevich, I. Serafimovich, V.Bournos, A.Khilmanovich, Y. Fokov, S. Korneev, H.Kiyavitskaya, W.Gudowski // *Annals of Nuclear Energy*. V. 38, issue 6, 2011, pp. 1412 – 1417.

18. Fast Subcritical Assembly with MOX Fuel for Research on Nuclear Waste Transmutation / V. Barashenkov, W. Gudowski, A.Kievitskaya, V.Butstev, S. Chigrinov, S.Dudarev, A.Polanski, I.V.Puzynin, I.L.Rakhno, A.N.Sisakyan, // *Vesti of NAS of Belarus. Seriya Physical-Technical Sciences*. – 2001. – №3. – P. 149–153.

19. MCNPX, MONK, and ERANOS analyses of the YALINA Booster subcritical assembly /A. Talamo, Y. Gohar, G. Aliberti, Y. Cao, D. Smith, Z.Zhong, H.Kiyavitskaya, V. Bournos, Y. Fokov, C. Routkovskaya, I. Serafimovich // *Nuclear Engineering and Design* - 2011. – Vol. 241. - P. 1606–1615.

20. Reactivity Measurements in the Subcritical Booster Assembly Yalina Driven by Neutron Generator /H. Kiyavitskaya, S. Mazanik, V. Bournos, Yu. Fokov, C.Routkovskaya, S. Sadovich // *Nonlinear phenomena in Complex Systems*. – 2011. – Vol. 14. - № 2. – P. 1 – 10.

21. Impact of the neutron detector choice on Belland and Glasston spatial correction factor for subcriticality measurement / A. Talamo, Y. Gohar, Y. Cao, Z. Zhong, H. Kiyavitskaya, V. Bournos, Y. Fokov, C. Routkovskaya // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. – 2012. Vol. 668. - P. 71–82.

22. Correction factor for the experimental prompt neutron decay constant / A. Talamo, Y.Gohar, S.Sadovich, H. Kiyavitskaya, V.Bournos, Yu. Fokov, C.Routkovskaya // *Annals of Nuclear Energy*. – 2013. – Vol. 62. – P. 421 – 428.

23. Monte Carlo and deterministic neutronics analyses of YALINA Thermal Facility and comparison with experimental results /A. Talamo, Y. Gohar, H. Kiyavitskaya, V. Bournos, Y. Fokov and C.Routkovskaya // *Nuclear Technology*. - 2013. - Vol.184. - P. 131-147.

24. High enriched to low enriched fuel conversion in YALINA Booster facility /A. Talamo, Y. Gohar, S. Sadovich, H. Kiyavitskaya, V.Bournos, Y.Fokov, C. Routkovskaya // *Progress in Nuclear Energy*. - 2014. - Vol.70. – P. 43-53.

25. Pulse superimposition calculational methodology for estimating the subcriticality level of nuclear fuel assemblies /A.Talamo, Y.Gohar, C.Rabiti, G.Aliberti, F.Kondev, D.Smith, Z.Zhong, H.Kiyavitskaya, V. Bournos, Y.Fokov, C.Routkovskaya, I.Serafimovich // *Nuclear Instruments and Methods in Physics*

Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – Vol. 606, № 3. – P. 661 – 668.

26. Бенчмарк-эксперименты для верификации расчетных параметров бланкетов термоядерного источника нейтронов / Ю.Е.Титаренко, Павлов К.В., Титаренко А.Ю., Киевицкая А.И., Алексеев Р.Н., Гуревич М.И., Е.Ф. Батяев, Дудников А.А., Жиркин А.В., Кутеев Б.В., Колдовский А.В., Фоков Ю.Г. //Атомная энергия. – 2016. - Т. 120. - Вып.1. - P. 43-48.

27. A road map for the realization of global-scale thorium breeding fuel cycle by single molten-fluoride flow /K. Furukawa, K. Arakawa, L.Berrin Erbay, Y. Ito, Y. Kato, H.Kiyavitskaya, J. Pleasant, R. Mour, A. Lecocq, V. Simonenko, D.Sood, C. Urbun, R. Yoshioko // Energy Conversion and Management. – 2008. –Vol.49. – P. 1832–1848.

### **Материалы конференций**

28. Развитие атомной энергетики в Республике Беларусь Киевицкая А.И., В.Т. Казазян, Кузьмин А.В., Малыхин А.П. // Человек, Энергия, Атом. – 2015. – №1 (23) – С. 22 - 25.

29. PNS and statistical experiments simulation in subcritical systems using Monte-Carlo method on example of Yalina-Thermal assembly /S.Sadovich, A.Talamo, V. Burnos, H. Kiyavitskaya, Yu. Fokov // Proc. Of Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2013 (SNA + MC 2013) La Cite des Sciences et de l'Industrie, Paris, France, October 27-31, 2013. – (CD ROM Edition T3.12).

30. Культура физической ядерной безопасности / В.В.Зеневич, А.И. Киевицкая, А.В. Кузьмин, В.А. Брылева, Л.П. Домащенко, И.А. Едчик. Д.М.Максимович // НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны. – Минск: Беларусь, 2013. – 110 с.

31. Calculation Method of Energy Systems Based on Using of High Energy Particles and Nuclei Accelerators / S.Chigrinov, A. Kievitskaia, V. Petlytski, C. Routkovskaya // Proc. of ICENES'93, Makuhari, Chiba, Japan, September 20 – 24, 1993. – 1993. – P. 434 – 438.

32. The Research of Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor – Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by the Neutron Generator / S. Chigrinov, A. Kievitskaya, I. Rakhno, C.Rutkovskaya // Proc. of 2-nd Int. Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies&Applications (ADTTA), Kalmar, Sweden, June, 1996. – Vol. 2. – P. 737 – 741.



33. Экспериментальные исследования трансмутации долгоживущих продуктов деления и младших актинидов в подкритической сборке, управляемой генератором нейтронов /А.И. Киевицкая, С. Чигринов, Л. Сальников, А. Хильманович, И. Рахно, К. Рутковская // Проблемы использования ядерной энергии: сб. докл. науч. семинара, посвящ. 85-летию акад. А.К. Красина. – Минск, 1996. – С. 60 – 65.

34. Accelerator Molten Salt Breeder as Fissible Producing Component of THORIUM-NES Concept for Energy Production and Transmutation of Plutonium / A. Kievitskaia, S. Chigrinov, I. Rakhno // Proc. of the Eight Int. Conf. On Emerging Nuclear Energy Systems, ICENES'96, Obninsk, Russia, 24 - 28 June 1996. – 1996. – P. 564 – 571.

35. Experimental and theoretical research of accelerator driven transmutation technology on subcritical assemblies driven by a neutron generator / H. Kievitskaia, S.Chigrinov, V.Petlytski, C. Rutkovskaya // Proc. of the Int. Conf. on Future Nuclear Systems (GLOBAL 97), Yokohama, Japan, October 5 – 10, 1997. – P. 451 – 456.

36. Chigrinov, S. Computer study of interaction of high energy particles with matter. Spallation neutron production in Pb- and W-targets / A. Kievitskaya, S Chigrinov, I. Rakhno // Proc. of the Ninth Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems, Tel-Aviv, Israel, 28 June – 2 July 1998. – P. 241–248.

37. Kievitskaia, A. Monte Carlo calculation of relativistic protons interaction with extended targets and transmutation of Iodine-129 and Neptunium-237 / S.Chigrinov, I.Rakhno, A.Kievitskaia // Proc. of the Int. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology, New York, USA, October 5 – 8, 1998. – P. 1455 – 1461.

38. Chigrinov, S. The Code SONET to calculate accelerator driven system performance / S.E. Chigrinov, I. Rakhno, H. Kiyavitskaya // Proc. of the 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Application (99'ADTTA), Praha (Pruhonice), Czech Republic, June 7–11, 1999. – P. 1 – 8. – MO-O-C12 (CD ROM Edition).

39. IAEA Benchmark on Accelerator-Driven Systems: ISBN: 0-89448-666-7 / W. Gudowski, A. Stanculescu, H. Kiavitskaya, C.-M. Perrson, C.Routkovskaya // ANS Topical Meeting on Accelerator Applications/Accelerator Driven Transmutation Technologies Applications'01, November 11 - 15 2001, Reno, Nevada. – (CD ROM Edition).

40. Experimental investigations on neutronics of the Accelerator Driven Transmutation Technologies at the subcritical facility “Yalina” / H.Kiavitskaya,

S. Chigrinov, C. Routkovskaya, I. Serafimovich, V. Bournos, S. Mazanik // ARWIF Workshop, Chester, Great Britain, October 22 – 25, 2001. – (CD ROM Edition).

41. IAEA, Working Material, Research Coordinated Meeting of the Coordinated Research Project on Analytical and Experimental Benchmark Analyses of Accelerator Driven Systems / W. Gudowski, A. Stanculescu, H.Kiyavitskaya, H. ait Abderrahim, Y. Gohar, E. Gonzales, 5-9 December 2005 Minsk, Belarus. – IAEA-RC-1003.1, TWG-FR/127, Vienna. – 2006.

42. Experimental Investigations on Neutronics of the Accelerator Driven Transmutation Technologies at the Subcritical Facility “YALINA”/ A.Kiyavitskaya, S. Chigrinov, C. Routkovskaya, I. Serafimovich, S.Mazanik // Proc. of the ANA/ADTTA, Reno, Nevada, November 11 - 15 2001.

43. Application of the low energy accelerators to study neutronics of ADS / H. Kiyavitskaya, V. Bournos, I. Serafimovich, C. Routkovskaya, Y. Fokov // Proc. of the International Symposium International Symposium on Utilization of Accelerators, Croatia, Dubrovnik, 5-9 June 2005. IAEA-CN-115. – P. 64. CD-ROM edition.

44. Subcritical assemblies with fast and thermal neutron spectrum with high intensity neutron generator NG-12-1/ H. Kiyavitskaya, V. Bournos, I. Serafimovich, C. Routkovskaya, Y. Fokov. – Ibid. - P.65.

45. Transmutation of fission products and minor actinides in a subcritical assembly driven by a neutron generator / H. Kiyavitskaya, V. Bournos, I. Serafimovich, C. Routkovskaya, Y. Fokov // NATO Advanced Research Workshop: Nuclear Science and Safety in Europe, Yalta, Ukraine, September 10 - 16, 2005. – Physics and Biophysics: Springer Netherlands Series B. – 2005. – P. 265 – 274.

46. Experimental investigations at subcritical facilities of Joint Institute for Power and Nuclear Research-Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus: Int. Workshop Use of low enriched uranium in Accelerator Driven Subcritical assemblies. Vienna, Austria, October 10 - 12 2005 / H.Kiyavitskaya, V. Bournos, C. Routkovskaya, I. Serafimovich, S. Mazanik, A. Kulikovskaya. – IAEA-NEFW-651-T1-TM. 28939. – P. 13 – 24.

47. Kiyavitskaya, H. (coordinator) YALINA-Booster Benchmark. Specifications for the IAEA Coordinated Research Projects on Analytical and Experimental Benchmark Analysis on Accelerator Driven Systems and Low Enriched Uranium Fuel Utilization in Accelerator Driven Sub-Critical Assembly Systems. IAEA. – 2007. Mode of access: <http://www-nfcis.iaea.org>.

48. YALINA Booster Subcritical Assembly Modelling and Analyses: Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Nuclear Technologies in 21 century, Minsk, October 6-8, 2010 /

H. Kiyavitskaya, V. Bournos, C. Routkovskaya, I. Serafimovich, S. Mazanik, A. Kulikovskaya. – P. 248 - 252.

49. Analytical and Experimental Benchmark of YALINA-Booster and YALINA-Thermal Assemblies / H. Kiyavitskaya, V. Bournos, C. Routkovskaya, I. Serafimovich, S. Mazanik, A. Kulikovskaya – Ibid. P. 253 – 261.

50. Analyses of YALINA Facility Experimental Data Processing / Y.Gohar. H. Kiyavitskaya, A. Talamo, V. Bournos, C. Routkovskaya, I. Serafimovich, – Ibid. P. 262 – 266.

51. Ядерно-физический подкритический стенд «Яліна» – базовая модель для изучения физики и кинетики подкритических реакторов, управляемых внешними источниками нейтронов / А. Киевицкая, В. Бурнос, К.Рутковская, С. Мазаник, А. Куликовская // Атомная энергетика в 21-м веке: тез. докл. III Междунар. конф., Минск, 21 – 23 июня 2011г. - ОИЭЯИ-Сосны НАН Беларуси. – Минск, 2011. – С. 9.

52. Introduction of Nuclear Security Culture at the Joint Institute for Power&Nuclear Research-Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus / V. Bryleva, L. Domaschenko, H. Kiyavitskaya, V. Zenevich, A. Kuzmin // The Institute of Nuclear Materials Management, 52<sup>nd</sup> Annual Meeting: Book of abstracts, Palm Desert, July 13 – 17, 2011, California, USA. – P. 262 – 263.

53. YALINA-Booster Subcritical assembly: from HEU to UEU / H. Kiyavitskaya, Yu. Fokov, V. Bournos, S. Mazanik, Ch. Routkovskaya, S. Sadovich, Y. Gohar, I. Bolshinski International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization // Rabat, Morocco, November 14 - 18 2011, Book of Synopsis. – IAEA-CN-188. - P. 75

54. Spatial Correction Factors for YALINA Booster Facility Loaded with Medium and Low Enriched Fuels: Book of Abstracts Int. Conf. PHYSOR 2012 Advances in Reactor Physics. Linking Research, Industry and Education / A. Talamo, Y. Gohar, H. Kiyavitskaya, S. Sadovich, C. Routkovskaya. – Knoxville, USA, April 15 – 20, 2012.

55. Statistical Methods for Neutron Multiplication Factor Determination in Deeply Subcritical Assembly Yalina-Thermal / S. Sadovich, V. Bournos, Yu. Fokov, H. Kiyavitskaya // Book of Abstracts of European Research Reactor Conference. - Prague. 19-23 March 2012/- P.83-87.

56. Experimental and Analytical Research of the Neutronics Performance of the Yalina-Booster with Modified Fast Zone / V. Bournos, H. Kiyavitskaya, A. Kulikovskaya, Ch. Routkovskaya, S. Sadovich, Yu. Fokov. // Proceedings of the X

Conference on High Energy Physics, Nuclear Physics and Accelerators, Kharkiv, Ukraine, 27 February – 2 March 2012. – 2012.

57. Об измерении подкритичности подкритических систем методом стреляющего источника на примере подкритической сборки «Яліна-тепловая» / А.И. Киевицкая, В. Бурнос, К.Рутковская, С. Мазаник // Ядерные технологии 21-го века: сб. трудов III-ей Междунар. конф., Минск, 23–26 октября 2012 г. – Минск, 2012. – С. 185 – 192.

58. Current International Accelerator Driven System Activities with Low Enriched Uranium Fuel / Y. Gohar, H. Kiyavitskaya, I. Bolshinski, S. Sadovich, C. Routkovskaya, Y. Fokov // Technical Meeting on Lessons Learned from the RRRFR Programme, Sevastopol, Ukraine, June 12 - 14 2013.

59. Нейтронно-физические характеристики подкритической сборки «Яліна-Бустер» с выгруженной быстрой зоной / Ю.Фоков, В. Бурнос, К.Рутковская, А.Киевицкая // XI конф. по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 11–15 марта 2013 г. / Нац. научн. центр «Харьковский физико-технический институт». – Сб. тезисов докладов, Харьков, 2013. – С. 66.

60. Sadovich, S. A modernized method of the effective fraction of the delayed neutrons calculation by MCNP code by the example of subcritical assembly Yalina-Thermal / S. Sadovich, H. Kiyavitskaya, Yu. Fokov // Proc. III Int. Conf. Nuclear Technologies of XXI century, Minsk, 2012, Book of Abstract. - P.51 (in Russian).

61. Развитие атомной энергетики в Республике Беларусь / А. Киевицкая, А. Кузьмин, В. Казазян, А. Малыхин // Сборник тезисов 6-й международной научно-практической конференции «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития», г. Курчатов. Казахстан, 24 - 26 сентября 2014. – С. 32.

62. Kiyavitskaya, H. The IAEA support related to ADS activities: from benchmarking to core conversion of subcritical assemblies / H.Kiyavitskaya, Y. Fokov, D. Ridicas // Proc. ANS Winter Meeting: special session on the IAEA Reactor Physics and Technology Development Activities San-Diego, USA, 2012. Report on CD.

63. Подкритический стенд «ЯЛІНА» для изучения нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых ускорителями» / А.И. Киевицкая, К.К. Рутковская, С.Э. Мазаник, Ю.Г. Фоков // 3-я международная конференция «Инновационные технологии для ядерной энергетики», Москва, РФ 7 - 10 октября 2014г. сб. тр. – Т. 1. – С.146 - 151.

64. Киевицкая, А. Проблемы создания подкритических исследовательских установок, управляемых внешними источниками /А.Киевицкая, К. Рутковская, Ю. Фоков //64th International Conference “Nucleus-2014”, Минск, 1-4 июля 2014г.: сб. тр. – С.255.

65. The Challenges of Creating Subcritical Research Installations Driven by External Neutron Sources / Н. Kiyavitskaya, С. Routkovskaya, Y. Fokov, S/ Mazanik // Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the Twenty first Annual Seminar NPCС’2014, Minsk, May 20-23, 2014. – Vol. 20. – P. 86 – 94.

66. Киевицкая, А.И. Исследования скоростей реакций трансмутации I-129, Np-237 и Am-243 на подкритической сборке «ЯЛИНА-ТЕПЛОВАЯ / А.И.Киевицкая, Ю.Г. Фоков, С.В. Корнеев // Сб. рефератов 10-й международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 8 - 11 сентября 2015, г. Курчатов, Казахстан. – С. 112

67. Spatial Correction Factors for YALINA Booster Facility Loaded with Medium and Low Enriched Fuels / А. Talamo, Y. Gohar, V. Bournos, Y. Fokov, Н. Kiyavitskaya, С. Routkovskaya / International Conference PHYSOR2012 - Advances in Reactor Physics - Linking Research, Industry, and Education. - April 15-20, 2012. Knoxville, USA. Book of Abstracts. - P.38

68. Transmutation of  $^{129}\text{I}$  and  $^{237}\text{Np}$  using spallation neutrons produced by 1.5, 3.7 and 7.4 GeV protons / М. Ochs, Jh. Schmidt, E. Langrock, S. Chigrinov, А. Kievitskaya, I. Rakhno, W.B. Wilson. – Dubna, 1997. – 27 p. – (Preprint / Joint Institute of Nuclear Research; E1-99-1).

69. Transmutation of radioactive waste with the help of relativistic heavy ions / R. Brandt [et al]. – Dubna, Russia, 1997. – 24 p. – (Preprint / JINR; E1-97-349).

70. Нейтронный генератор НГ-12-1 – базовая установка для проведения исследований в нейтронном центре НАН Беларуси / Хильманович А.М., А.И. Киевицкая, С.Е. Чигринов, Л.И. Сальников, И.Л. Рахно, Б.А. Марцынкевич, Л.П. Рогинец, В.Г. Гуло. – Минск, 1998. – 36 с. – (Препринт / Акад. наук Беларуси, ИРФХП; ИРФХП-21).

71. Unfolding of Fast Neutron Spectra in Wide Energy Range (up to 200 MeV) at Subcritical Uranium-Lead Assembly of Electronuclear System, (Energy Plus Transmutation) / В.А. Martsinkevich [et al]. – Dubna, Russia, 2002. – 20 p. – (Preprint/ JINR; P-2002-65).

72. Исследование особенностей трансмутации долгоживущих осколков деления и младших актинидов в быстрых и тепловых спектрах нейтронов и физики подкритических бустерных систем, управляемых высокоинтенсивным

генератором нейтронов / А.И. Киевицкая [и др.]. – Минск, 2004. – 36 с. – (Препринт / Акад. наук Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ-17).

73. Бустерная подкритическая сборка, управляемая генератором нейтронов/ Киевицкая А.И. [и др.]. – Минск, 2004. – 31 с. – (Препринт/ Акад. наук Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед.–Сосны; ОИЭЯИ-14).

74. Особенности формирования нейтронных полей в системах нейтронообразующая мишень – замедлитель, облучаемых частицами высоких энергий / В.В. Бурнос [и др.] – Минск, 2005. – 35 с. (Препринт Нац. Акад. наук Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед.–Сосны; ОИЭЯИ-20).

75. Подкритический стенд «Яліна» для генерации нейтронов и экспериментальных исследований в области ADS-технологий / А.И. Киевицкая [и др.]. – Минск, 2006. – 22 с. – (Препринт/ Акад. наук Беларуси, Объед. ин-т энергетич. и ядер. исслед.–Сосны; ОИЭЯИ-24).

76. Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development, IAEA TECDOC-1766, Vienna, 2015 ISBN 978-92-0105315-2, ISSN 1011-4289. P. 329.

## РЕЗЮМЕ

Киевицкая Анна Ивановна

Нейтронно-физические характеристики  
подкритических систем: Стенд «Яліна»

**Ключевые слова:** нейтронно-физические характеристики, подкритические системы, внешний источник, генератор нейтронов, спектр нейтронов, трансмутация, скорости реакций.

Целью диссертации являются обоснование, разработка и создание подкритического стенда «ЯЛІНА» для экспериментального определения и апробации теоретических расчетов нейтронно-физических характеристик подкритических ядерно-энергетических систем.

В диссертационной работе получены следующие новые результаты: обоснована концепция использования низкоэнергетических ускорителей (циклотроны, генераторы нейтронов) для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий и создан успешно функционирующий подкритический стенд, состоящий из двух подкритических сборок, генератора нейтронов, измерительного комплекса и системы жизнеобеспечения. Получены новые данные на подкритической сборке «Яліна-Тепловая»; новые расчетные и экспериментальные сечения реакций трансмутации изотопов  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{243}\text{Am}$  при облучении нейтронами с энергией 2,5 МэВ; новые результаты для четырех конфигураций активной зоны бустерной подкритической сборки: Впервые на примере подкритической бустерной сборки экспериментально и расчетным путем показано, что определяющий вклад в нейтронно-физические характеристики подкритических быстротепловых систем вносит тепловая зона.

Стенд «Яліна» не имеет аналогов и является уникальной установкой для получения надежных экспериментальных данных («каталога»), которые требуются для разработки технического проекта индустриального прототипа инновационного подкритического реактора (ADS).

## РЭЗІЮМЭ

Кіявіцкая Ганна Іванауна

Нейтронна-фізічныя характарыстыкі  
падкрытычных сістэм: Стэнд «ЯЛІНА»

**Ключавыя словы:** нейтронна-фізічныя характарыстыкі, падкрытычныя сістэмы, знешняя крыніца, генератар нейтронаў, спектр нейтронаў, трансмутацыя, скорасці рэакцый.

Мэтай дысертацыі з’яўляюцца абгрунтаванне, распрацоўка і стварэнне падкрытычнага стэнда “ЯЛІНА” для эксперыментальнага выяўлення і апрабацыі тэрэтычных разлікаў нейтронна-фізічных характарыстык падкрытычных ядзерна-энергетычных сістэм.

У дысертацыйнай рабоце атрыманы наступныя новыя вынікі: абаснавана канцэпцыя выкарыстання нізкаэнергетычных паскаральнікаў (цыклатроны, генератары нейтронаў) для вывучэння фізікі і кінетыкі падкрытычных сістэм, якія кіруюцца паскаральнікамі зараджаных часцінак высокіх энергій, і створаны падкрытычны стэнд, які паспяхова функцыянуе і складаецца з дзвюх падкрытычных зборак, генератара нейтронаў, вымяральнага комплексу і сістэмы жыццезабеспячэння. Атрыманы новыя вынікі пры фізічным пуску уран-поліэтыленавай падкрытычнай зборкі «Яліна–Цеплавая»; новыя разліковыя і эксперыментальныя сячэнні рэакцый трансмутацыі ізатопаў  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  і  $^{243}\text{Am}$  пры апраменьванні нейтронамі з энергіяй 2,5 МэВ; новыя вынікі пры фізічным пуску бустэрнай падкрытычнай зборкі для чатырох канфігурацый актыўнай зоны. Упершыню на прыкладзе падкрытычнай бустэрнай зборкі эксперыментальна і праз разлікі паказана, што вызначальны ўнёсак у нейтронна-фізічныя характарыстыкі хутка-цеплавых сістэм уносіць цеплавая зона.

Стэнд «Яліна» не мае сусветных аналагаў і з’яўляецца ўнікальнай устаноўкай для атрымання надзейных эксперыментальных дадзеных («каталога»), якія патрабуюцца для распрацоўкі тэхнічнага праекта індустрыяльнага прататыпа інавацыйнага падкрытычнага рэактара (ADS).



## SUMMARY

Kiyavitskaya Ganna Ivanauna

Neutronics of the subcritical systems: Facility «Yalina»

**Key words:** neutronics, external neutron source, neutron generator, neutron spectrum, transmutation, reaction rates.

The present thesis focuses on developing a rational, designing, and implementing the subcritical facility «Yalina» for experimental identification and verification of theoretical calculations of neutronics of advanced nuclear energy systems.

This thesis yields a number of innovative results: (a) provides argumentation for the concept of using low-energy accelerators (cyclotrons, neutron generators) for studying physics and kinetics of subcritical systems driven by high-energy particles accelerators; (b) shows the creation of a new functioning subcritical facility consisting of two sub-critical assemblies, a neutron generator, a measurement complex, and a life-support system. Apart from that, the thesis presents some new results obtained during the start up of the uranium-polyethylene subcritical assembly "Yalina-Thermal". In particular, these results include new theoretical and experimental cross sections of transmutation reactions of isotopes  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  and  $^{243}\text{Am}$  when irradiated by neutrons with energies of 2.5 MeV. The start up of the booster subcritical assembly for the four active zones configurations allowed to demonstrate experimentally and theoretically that the thermal zone makes a decisive contribution to the neutronics of the sub-critical fast-thermal systems.

The "Yalina" facility is a unique system that has no equivalent across the world. It can be used to obtain reliable experimental data, i.e. a catalogue, that is indispensable for elaborating a technical design for an innovative industrial prototype of a subcritical reactor (accelerator-driven system, aka ADS).

**КИЕВИЦКАЯ**  
**Анна Ивановна**

**НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**  
**ПОДКРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: СТЕНД «ЯЛІНА»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.16  
физика атомного ядра и элементарных частиц

Подписано к печати « » 2017 г. Формат 60×90<sub>1/16</sub>.  
Бумага – офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2.8  
Уч.-изд. л. 1.5 Тираж 60 экз. Заказ № 1  
Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,  
220072, Минск, пр. Независимости, 68.  
Отпечатано на ризографе Института физики  
имени Б.И. Степанова НАН Беларуси