

Инновационные исследования в области перспективных ядерно-энергетических систем



Анна Киевицкая,
профессор кафедры ядерной
и радиационной безопасности
Международного государственного
экологического института
им. А.Д. Сахарова Белорусского
государственного университета,
доктор физико-математических
наук, доцент

В промышленно развитых странах доля электричества, производимого на атомных энергетических станциях (АЭС), составляет около 30% и неуклонно увеличивается. В 2021 г. насчитывалось 447 атомных реакторов, расположенных в 31 стране и суммарно генерирующих около 400 ГВт электроэнергии [1]. Лидерство по доле АЭС в национальном энергообеспечении принадлежит Франции. Большинство эксплуатируемых реакторов работает на тепловых нейтронах. В Республике Беларусь функционирует АЭС с двумя энергоблоками ВВЭР по 1200 МВт каждый (проект АЭС-2006 относится к поколению 3+). Основными инновациями в системах ее безопасности по сравнению с типовым проектом ВВЭР-1000 являются пассивные технологии:

- отвода тепла;
- залива активной зоны (гидроемкости первой и второй ступеней);
- фильтрации межблочного пространства;
- локализации и удержания расплавленных материалов активной зоны (кориума).

Сегодня мировую энергетику невозможно представить без атомной, которую характеризуют высокая концентрация ядерной энергии на единицу массы топлива, наименьшее, по сравнению с использованием органического топлива, влияние на окружающую среду и большие запасы сырья. В текущую эпоху атомная энергетика вступает в новую фазу развития, поэтому ее основные научные и практические задачи направлены на создание безопасных ядерно-энергетических установок, решение проблемы обращения с долгоживущими отходами, накопленными за время эксплуатации реакторов 1-го и 2-го поколения [2].

Эксперты прогнозируют революционный переворот в отрасли к 2030 г., поскольку планируется запустить в эксплуатацию реакторы 4-го поколения в рамках программы Generation IV. Среди них быстрые газоохлаждаемые реакторы (GCR); быстрые, охлаждаемые теплоносителем на основе свинца или его сплавов (LCR); жидкосолевые (MSR); быстрые реакторы с натриевым теплоносителем (SFR); легководные реакторы со сверхкритическими параметрами теплоносителя (SCWR); сверхвысокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (VHTR). Они сделают ядерную энергетику еще более конкурентоспособной и позволят обеспечить потребителей надежной, безопасной и экологически чистой энергией. Однако пока ни одна из этих реакторных технологий, степень проработанности которых различна, не используется в промышленных масштабах [3]. Некоторые из них представлены успешно работающими прототипами, которые позволят накопить необходимый объем знаний, а затем перейти к проектированию и строительству реакторов 4-го поколения. Важнейшее их преимущество – наличие систем пассивной безопасности, которые сработают без вмешательства человека в случае нештатных ситуаций. Отличительная особенность создаваемых реакторов в том, что они предназначены для работы в условиях крупномасштабной ядерной энергетики, а таковой пока нет. Что касается области применения, то предполагается, к примеру, что высокотемпературные газовые реакторы могут быть использованы не только для производства электроэнергии, но и в химической промышленности, а жидкосолевые – еще и для уничтожения (сжигания) трансурановых элементов, образующихся в традиционных реакторах при облучении ядерного топлива, что позволит снизить экологические угрозы, связанные с их переработкой и захоронением.

К реакторам 4-го поколения относят и подкритические реакторы, управляемые ускорителями

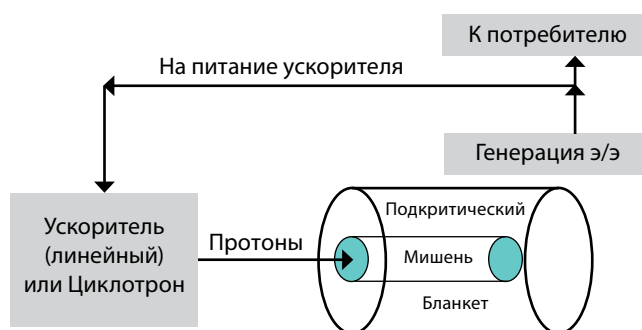


Рис. 1. Принципиальная схема подкритического реактора

заряженных частиц (ADS), которые могут работать на урановом топливе низкого обогащения [3]. В установках данного типа в принципе невозможно возникновение самопроизвольной цепной ядерной реакции, поскольку отключение ускорителя приводит к исчезновению нейтронов, поддерживающих ее. Предполагается, что такие системы будут и производить энергию, и сжигать образовавшиеся долгоживущие радиоактивные нуклиды.

Как известно, за один год легководный реактор мощностью 1 ГВт с топливом в виде UO_2 вырабатывает 6100 ГВт·ч электроэнергии и около 21 т отработанного ядерного топлива, где 20 т – это обедненный уран (около 0,9% ^{235}U), 760 кг – продукты деления, 200 кг – плутоний, 21 кг – младшие актиниды (10 кг – Am, 10 кг – Np, 1 кг – Cm). Наиболее перспективным способом уменьшения количества долгоживущих отходов является трансмутация – превращение долгоживущих радионуклидов в короткоживущие и стабильные с помощью нейтронов [3–6]. Например, йод-129 (продукт деления), имеющий период полураспада $1,57 \times 10^7$ лет, поглотив нейтрон тепловой энергии, через несколько суток превратится в стабильный изотоп ксенона. Таким же образом можно подобрать условия для каждого долгоживущего изотопа. К примеру, для ^{237}Np , ^{241}Am и других минор-актинидов можно создать условия для их деления (incineration). Поэтому подкритические системы, имеющие избыток нейтронов благодаря их множественному образованию в высокоэнергетических реакциях расщепления, являются многообещающими установками для реализации технологий трансмутации [3–7].

Основная идея, на которой базируются все ADS-системы, состоит в использовании ускорителей высоких энергий для производства нейтронов в мишенях, состоящих из тяжелых элементов (Pb, Bi, W, U, Pb-Bi), с последующим их размножением в подкритических ($k_{\text{эфф}} \sim 0,9\text{--}0,98$) blankets

(реакторах) [3–6]. Эта система состоит из ускорителя высокоэнергетических заряженных частиц (протонов, дейтронов, электронов), мишени, подкритического blankets с коэффициентом умножения $M=1/(1-k_{эфф}) \sim 50$, электрогенератора. Остановка ускорителя приводит к прекращению ввода нейтронов из мишени в подкритический blanket, так что происходит практически мгновенное затухание цепной ядерной реакции. Для реализации проектов ADS-систем должен быть решен ряд физических и технических задач:

- *выбраны энергия и ток протонного пучка, создан ускоритель с требуемыми параметрами;*
- *предложен материал мишени и разработано устройство, позволяющее получать нейтроны расщепления;*
- *определены способы съема тепла и конструкция подкритического blankets;*
- *установлены методы контроля уровня подкритичности в режиме реального времени (проблемы безопасности);*
- *исследованы скорости реакций трансмутации долгоживущих нуклидов и скорости их образования.*

На рис. 1 показана принципиальная схема подкритического реактора, управляемого внешним источником.

Для изучения ключевых вопросов технологий трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и создания Европейского подкритического пилотного реактора, управляемого ускорителем протонов с энергией 200 МэВ (проекты MYRRHA, EFIT, GUINEVERE 5–7-й Европейских рамочных программ [7]), объединены исследовательские центры стран ЕС.

Первые эксперименты, касающиеся идеи белорусских ученых о применении генератора нейтронов в качестве внешнего источника нейтронов для подкритической сборки [8–10], были проведены в Кадараше (Франция). Критическая сборка «MAZURKA» на уран-плутониевом топливе была перестроена (выгружено несколько кассет для получения уровня подкритичности 0,98), сделан нейтронопровод от импульсного генератора нейтронов. Используя опыт успешных экспериментов на установке «Яліна-Тепловая», несколько новых сборок для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых внешними источниками нейтронов, были созданы в Китае (рис. 2). В Бельгии критический реактор VENUS был демонтирован, и на его базе создана установка GUINEVERA (рис. 3), функционирующая в критическом и подкритическом режимах. Исследования проводятся с использованием генератора нейтронов, который перевезен из Гренобля (Франция), а в дальнейшем будет заменен на ускоритель протонов с энергией 200 МэВ. То есть появится первый европейский пилотный подкритический реактор для демонстрации осуществимости технологий трансмутации и производства энергии [7]. Аналогичные проекты разрабатываются в США, Италии, Японии, Иордании, Индии, России.

Иорданская подкритическая сборка (Иорданский университет науки и технологий (JSA) (рис. 4) спроектирована главным образом как образовательный и исследовательский инструмент. Простая и безопасная конструкция предоставляет уникальную возможность познавать фундаментальные основы физики и кинетики реакторов, получать реальный опыт работы по измерению их ключевых характеристик [11]. На ней проводятся такие



Рис. 2. Подкритическая сборка VENUS (А) и CLEAR-0 (В) (Китай)

эксперименты, как выход в критическое состояние, а также измерения аксиального и радиального распределения потока нейтронов, нейтронного потока методами: Rossi- α , Feynman- α , стреляющего источника (source-jerk), пустотного эффекта (fuel void effect), эффекта управляющего стержня (control rod (poison) effect).

Все характеристики подкритической сборки, относящиеся к ядерной и радиационной безопасности, удовлетворяют стандартам безопасности МАГАТЭ. Так, например, эффективный коэффициент размножения $k_{\text{эфф}}$ может варьироваться от 0,94 до ~0,95, а обогащение топлива по ^{235}U составляет порядка 3–4%, интенсивность – 10^6 н/с.

Проект ядерной установки «Источник нейтронов», основанный на подкритической сборке, управляемой ускорителем электронов с энергией 200 МэВ, был реализован в Украине на базе Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» и сдан в эксплуатацию в декабре 2014 г. Это первый в мире подкритический реактор, работающий на номинальной мощности 400 кВт [12] (рис. 5) и предназначенный для исследований нейтронно-физических характеристик подкритическихборок, управляемых ускорителями, получения нейтронов и использования их в фундаментальных и прикладных исследованиях, наработки ряда медицинских и промышленных изотопов, а также для подготовки специалистов для атомно-энергетической промышленности Украины.

Выполняемые в течение многих лет в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси теоретические исследования взаимодействия высокоэнергетических заряженных частиц и атомных ядер позволили обосновать возможность использования низкоэнергетических ускорителей ионов (генераторов нейтронов), циклотронов для изучения физики и кинетики подкритических систем, управляемых внешними источниками, технологий трансмутации, а затем подтвердить экспериментально на базе уникального экспериментального комплекса «Яліна», созданного в институте. В 1995–1996 гг. здесь впервые была сформулирована идея применения генератора нейтронов в качестве внешнего источника нейтронов [8–15]. Она оказалась пионерной и востребованной для изучения подкритических систем и создания ядерно-физического комплекса. Работы над проектом проводились в рамках Протоколов поручений Президента Республики Беларусь №1 и №24 и Проекта МНТЦ В-070 в ОИЭЯИ – «Сосны».

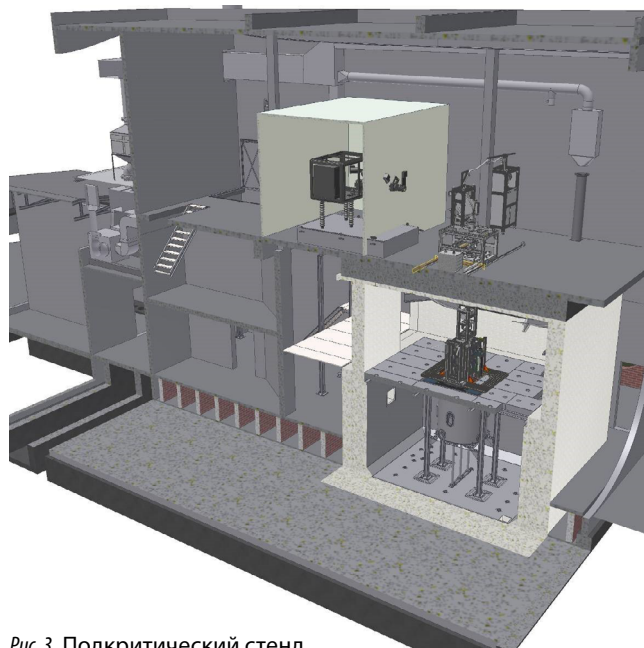


Рис. 3. Подкритический стенд GUINEVERE, управляемый генератором нейтронов, на базе критического реактора VENUS (Моль, Бельгия)

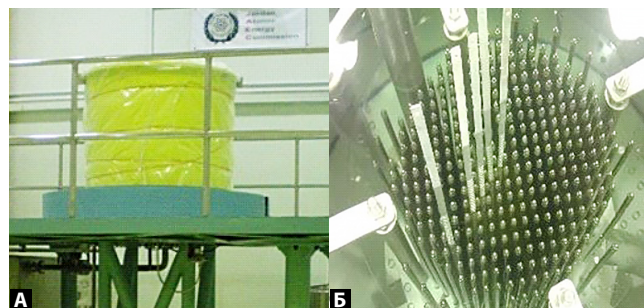


Рис. 4. Общий вид подкритической сборки JSA

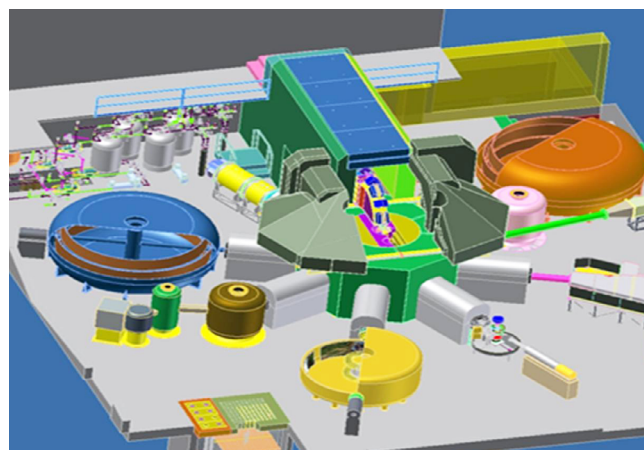


Рис. 5. Общий вид ядерной установки «Источник нейтронов» в ХФТИ

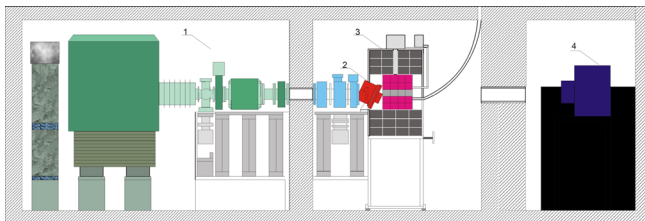


Рис. 6. Схема ядерно-физического подкритического стенда «Яліна»

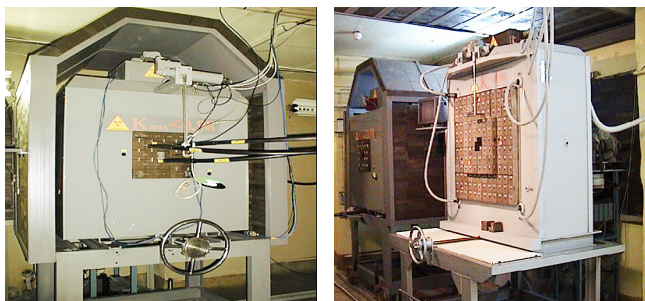


Рис. 7. Подкритические сборки «Яліна-Тепловая» (слева) и «Яліна-Бустер» (справа)

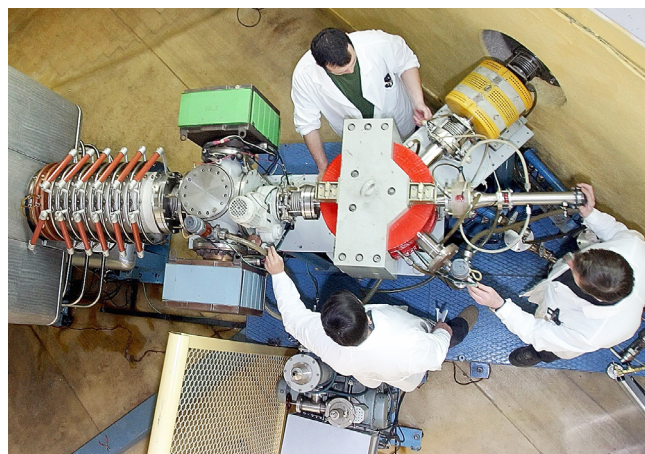


Рис. 8. Ускоритель ионов дейтерия (вид сверху)

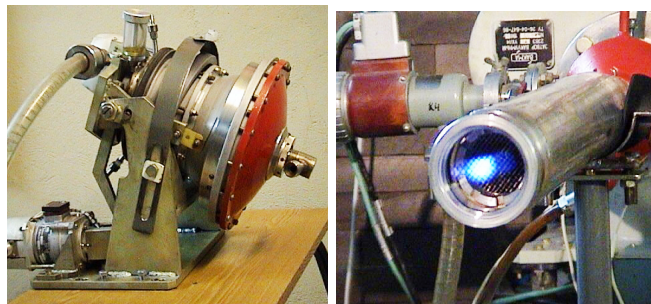


Рис. 9. Титан-дейтериевые (титан-третиевые) мишени диаметром 245 и 45 мм

Их итогом стал стенд, предназначенный для проведения исследований с использованием нейтронов в широкой области энергий – тепловых нейтронов и до 15 МэВ, и состоящего из генератора нейтронов НГ-12-1, уран-полиэтиленовой (тепловой) и бустерной (быстро-тепловой) подкритических сборок, измерительного комплекса и системы жизнеобеспечения (рис. 6–9) [13–15].

На стенде проводились исследования в области:

- ядерной и нейтронной физики;
- кинетики подкритических систем, управляемых внешними источниками нейтронов;
- развития методов измерения уровней подкритичности;
- физики связанных нейтронных систем;
- трансмутации долгоживущих осколков деления и младших актинидов в различных спектрах нейтронов, скорости реакций долгоживущих радиоизотопов;
- оценки ядерных данных для радиотоксичных изотопов;
- нейтронно-активационного анализа.

Стенд «Яліна» не имел мировых аналогов и использовался для получения надежных экспериментальных данных (каталога), необходимых для разработки технического проекта индустриального прототипа инновационного подкритического реактора (ADS).

Результаты этой работы использовались в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия), Институте теоретической и экспериментальной физики (г. Москва, Россия), Королевском технологическом институте (г. Стокгольм, Швеция), Ядерном центре (г. Карлсруэ, Германия), Аргоннской национальной лаборатории (г. Чикаго, США). Стоит подчеркнуть, что она может представлять интерес и сегодня:

- при проектировании ядерных установок для выжигания долгоживущих радиоактивных нуклидов;
- в прикладных научных исследованиях при проектировании мишенного блока и blankets подкритических ядерных установок, включая blankets термоядерных реакторов;
- в фундаментальных работах по нейтронной и ядерной физике;
- при переоценке интегральных сечений реакций захвата и деления йода-129, непуния-237 и америция-243;
- 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;

- в смежных областях фундаментальных и прикладных исследований (нейтронно-активационный анализ геологических образцов, восстановление нейтронных спектров и др.).

Следует отметить, что в довольно сложный исторический период белорусские ученые блестяще реализовали собственную идею, используя имеющиеся материальные (топливо, конструкционные материалы) и интеллектуальные ресурсы, представили новое направление научных исследований и продемонстрировали высокую квалификацию ученых и специалистов Национальной академии наук Беларуси. Большой вклад в создание стенда внесли: С.Е. Чигринов, Л.И. Сальников, В.А. Левадный, В.В. Сапожников, И.Г. Серафимович, Л.Д. Бойко, М.Ф. Коханов, И.Л. Рахно, К.К. Рутковская, С.Э. Мазаник, А.М. Хильманович, Б.А. Марцынkevич, П.А. Нагула, А.С. Нестерович и др. На базе подкритического стенда в свое время проводились международные совещания с участием руководителей и ученых из зарубежных ядерных центров Франции, Испании, Швеции, Швейцарии, США, Италии, Чехии, Бразилии, Пакистана, Индии, Японии и других стран. Академики Российской академии наук Е.Н. Аврорин (Российский федеральный ядерный центр – Всесоюзный научно-исследовательский институт теоретической физики, ФЯЦ-ВНИИТФ), Е.П. Велихов, Л.И. Пономарев (НИЦ «Курчатовский институт»), а также ученые из Объединенного института ядерных исследований, Обнинского Института атомной энергии НИЯУ МИФИ и другие отмечали оригинальность конструкции стенда и его возможности для проведения физических экспериментов.

Доказательная возможность применения ускорителей ионов для изучения физики и кинетики ADS, скоростей реакций трансмутации, международное признание высокого уровня исследований, проводимых в НАН Беларуси и полученных экспериментальных данных, а также опыт проектирования, лицензирования и сдачи в эксплуатацию являются огромной ценностью для ученых и специалистов и могут быть применены при создании реакторов 5-го поколения (SAD, RACE, MYRRHA, EFIT, GUINEVERE и др.). Это особенно важно для нашей страны в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции для подготовки кадров новой отрасли – атомной энергетики. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/yadernaya-energetika-obespechivala-energeticheskuyu-bezopasnost-za-schet-povyshennoy-vyrabotki-elektroenergii-v-2021-godu>.
2. 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.
3. Колесов В.Ф. Электроядерные установки и проблемы атомной энергетики / В.Ф. Колесов. Саров. 2013 г. ISBN 978–5–9615–0233–9.
4. Salvatores M. [et al.]. Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei / Nucl. Science & Technology. 1994. Vol. 116. №1. P. 215–227.
5. Rubbia C. [et al.]. Experimental Study of the Phenomenology of Spallation Neutrons in a Large Lead Block / European Organization for Nuclear Research, CERN/SPSLC 95–17 SPSC/P291. 1995.
6. Venneri F., Bowman C.D., Wender S. The Physics Design of Accelerator-Driven Transmutation Systems / Proceeding of GLOBAL'95, September 11–14, Versailles, France V.1. P. 474–481 (1995).
7. The Integrated Project European Research Programme for the Transmutation of High Level Nuclear Waste in Accelerator Driven System (EUROTRANS) within the 6th Framework Programme EURATOM of the European Commission / Contract No. Fl6W-CT-2005–516520. BELGIUM, BRUSSEL. 2005.
8. Chigrinov S., Petlitsky V., Rutkovskaya K., Kiyavitskaya A. [and etc.]. The Research of Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor – Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by the Neutron Generator / Proc. of 2nd Int. Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies & Applications (ADTTA), June 1996 Kalmar, Sweden. V. 2. P. 737–741.
9. Киевицкая А.И. Подкритический стенд «ЯЛИНА» для изучения нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых ускорителями / Труды 3-й Международной конференции «Инновационные технологии для ядерной энергетики». Москва, Россия, 7–10 октября 2014 г. Т. 1. С. 146–151.
10. Киевицкая А.И., Фоков Ю.Г. Подкритический стенд «ЯЛИНА» для изучения нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых ускорителями / Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2015. Т. 38, вып. 3. С. 50–55.
11. Xoubi N. The design & construction of a subcritical reactor / Proceedings of the 2nd International Symposium on Nuclear Energy (ISNE '09), October 2009. Amman, Jordan. P. 26–28.
12. Борц Б.В. и др. Состояние и основные задачи научных исследований на источнике нейтронов НИЦ ХФТИ / Труды XI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. 11–15 марта 2013, г. Харьков, Украина. – 2013. С. 26.
13. Способ трансмутации радиоактивных отходов и устройство для его осуществления: пат. 221072 РФ / В.А. Левадный, К.К. Рутковская, И.Г. Серафимович, С.Е. Чигринов; заявитель ИРФХП НАН Беларуси. – № 2001112159; заявл. 07.05.01; опубл. 10.09.03 // Российское агентство по патентам и товарным знакам. – 2003.
14. Kiyavitskaya N., Boornos V., Rutkovskaya Ch. [and al.]. YALINA Booster Benchmark Analysis / IAEA-TECDOC-1821. Vienna, Austria. – IAEA, 2017. P. 17–117.
15. А.И. Киевицкая «Инновационные ядерные установки для решения проблем современной ядерной энергетики». – Минск, 2023. ISBN 978–985–880–352–0.