

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. И. Киевицкая

Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, hannakiev@gmail.com

Основными научными и практическими задачами современной атомной энергетики являются: создание безопасных ядерно-энергетических установок, решение проблемы обращения с долгоживущими радиоактивными отходами, накопленными за время эксплуатации реакторов 1-го и 2-го поколений. В работе обсуждаются инновационные проекты ядерно-энергетических установок с пассивными системами безопасности для производства энергии и выжигания долгоживущих радиоактивных отходов.

Ключевые слова: атомная энергетика; ядерно-энергетические установки; безопасность; долгоживущие радиоактивные отходы; устойчивое развитие.

RESEARCH IN THE FIELD OF THE ADVANCED NUCLEAR POWER SYSTEMS

H. I. Kiyavitskaya

International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, hannakiev@gmail.com

Main scientific and practical tasks of modern nuclear power are: development of safety nuclear power systems, solution of the long-lived radioactive waste management accumulated during of the operation of the 1st and 2nd generation reactors. The paper discusses innovative designs of nuclear power plants with passive safety systems for energy production and the long-lived radioactive waste transmutation.

Keywords: nuclear power; nuclear power systems; safety; the long-lived radioactive waste management; sustainable development of world energy system.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-1-46-51>

Долговременное и устойчивое развитие мировой энергетической системы невозможно представить без ядерной энергетики, которую характеризуют: 1 – высокая концентрация ядерной энергии на единицу массы топлива, 2 – наименьшее, по сравнению с энергетикой на органическом топливе, влияние на окружающую среду и 3 – большие запасы топлива. В промышленно развитых странах доля электричества, производимого на атомных энергетических станциях (АЭС), составляет около 30% и неуклонно увеличивается. Мировая атомная энергетика включала в 2021 году 447 атомных реакторов, которые расположены в 31 стране и суммарно производят около 400 ГВт электроэнергии [1]. Мировым лидером по доле АЭС в национальном производстве электроэнергии является Франция. Большинство эксплуатируемых реакторов относится к реакторам на тепловых нейтронах. В Республике Беларусь функционирует АЭС с двумя энергоблоками ВВЭР по 1200 МВт каждый, обеспечивая около 40 % потребностей в электроэнергии. Белорусская АЭС – проект АЭС-2006 – относится к Поколению 3+. Основными инновациями в системах безопасности АЭС-2006 по сравнению с типовым проектом ВВЭР-1000 являются пассивные технологии: пассивный отвод тепла; пассивный за-

лив активной зоны (гидроемкости первой и второй ступеней); пассивная фильтрация межоболочечного пространства; пассивная локализация и удержание расплавленных материалов активной зоны (кориума).

В настоящее время атомная энергетика вступает в новую фазу развития, поэтому основными научными и практическими задачами современной атомной энергетики являются: создание безопасных ядерно-энергетических установок, решение проблемы обращения с долгоживущими отходами, накопленными за время эксплуатации реакторов 1-го и 2-го поколений [2]. Прогнозируемый революционный переворот на рынке ядерных реакторов скорее всего будет начат с эксплуатацией реакторов четвертого поколения (Программа Generation IV). В рамках этой программы разрабатываются газоохлаждаемые быстрые реакторы (GCR); быстрые реакторы, охлаждаемые теплоносителем на основе свинца или его сплавов (LCR); жидкосолевые реакторы (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. Ни одна из этих реакторных технологий, степень проработанности которых различна, в настоящее время не используется в промышленных масштабах [3]. Для некоторых из них существуют успешно работающие прототипы (исследовательские реакторы или опытно-промышленные установки), которые позволяют накопить необходимый объем знаний, а затем перейти к проектированию и строительству реакторов четвертого поколения. Важнейшим преимуществом реакторов 4-го поколения станет безопасность, т.к. все разработки реакторов этого поколения нацелены, прежде всего, не на экономичность, а на безопасность. К тому же во всех этих реакторах предусматривается наличие систем пассивной безопасности – систем, которые сработают без вмешательства человека в случае нештатных ситуаций. Отличительной особенностью реакторов четвертого поколения является то, что они предназначены для работы в условиях крупномасштабной ядерной энергетики, которые в настоящее время пока отсутствуют. Жидкосолевые реакторы планируется использовать также и для уничтожения (сжигания) трансурановых элементов, образующихся в традиционных реакторах при облучении ядерного топлива, что позволит снизить экологические угрозы, связанные с их захоронением и т. д.

Одним из новых направлений является также разработка малых модульных реакторов (ММР). Малые модульные реакторы – это современные ядерные реакторы мощностью до 300 МВт (эл.) на энергоблок, что составляет примерно одну треть от генерирующей мощности традиционных ядерных энергетических реакторов. Их преимущества очевидны: они малые – в несколько раз меньше традиционных ядерных энергетических реакторов; и – модульные, что позволяет собирать системы и компоненты на заводах и перевозить их единым блоком на место установки. По сравнению с действующими реакторами предлагаемые конструкции ММР являются в целом более простыми, а концепция безопасности для ММР часто в большей степени опирается на пассивные системы и такие присущие этим реакторам внутренние характеристики безопасности, как малая мощность и низкое рабочее давление. Это означает, что для отключения систем не требуется вмешательства человека или внешней энергии или силы, поскольку пассивные системы полагаются на физические явления, такие как естественная циркуляция, конвекция, гравитация и создание повышенного давления. На электростанциях на основе ММР можно реже осуществлять перегрузку топлива: каждые 3–7 лет, на традиционных станциях она требуется каждые 1–2 года. Некоторые ММР спроектированы таким образом, что могут работать без перегрузки до 30 лет (Рис.1).



Рис. 1. Инновационная установка ММР Шельф

Проекты более 70-ти коммерческих ММР, разрабатываемых по всему миру, рассчитаны на различную производительность и области применения. В настоящее время четыре ММР находятся на продвинутых этапах строительства в Аргентине, Китае и России, а еще несколько стран, имеющих атомные электростанции, и стран, приступающих к развитию ядерной энергетики, проводят НИОКР по ММР. Конструкции ММР варьируются от уменьшенных версий существующих больших реакторов до конструкций поколения IV. В варианте ММР проектируются в том числе реакторы на тепловых нейтронах, реакторы на быстрых нейтронах, а также реакторы на расплавленных солях с газовым охлаждением. ММР более безопасны по сравнению с традиционными реакторами вследствие малой мощности и низкого внутреннего давления, а также из-за широкого применения в их конструкции пассивных систем безопасности. Кроме того малым модульным реакторам реже требуется перезагрузка топлива. ММР могут быть использованы в паре с возобновляемыми источниками энергии и повышать их эффективность в рамках гибридной энергетической системы. Благодаря этим характеристикам ММР смогут сыграть ключевую роль в переходе к экологически чистой энергетике, а также помочь странам в достижении целей устойчивого развития (ЦУР).

К реакторам 4-го поколения относят и подкритические реакторы, управляемые ускорителями заряженных частиц (ADS), – они могут работать на урановом топливе низкого обогащения [3]. В реакторах этого типа в принципе невозможно возникновение самопроизвольной цепной ядерной реакции, поскольку отключение ускорителя приводит к исчезновению нейтронов, поддерживающих цепную реакцию. Предполагается, что такие системы будут и производить энергию, и сжигать образовавшиеся долгоживущие радиоактивные нуклиды. Как известно, за один год легководный реактор мощностью 1 ГВт (Эл) с топливом в виде UO_2 вырабатывает 6100 ГВт-час. (эл) и около 21 тонны отработанного ядерного топлива: 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 путем 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 $1,57 \cdot 10^7$ лет, поглотив нейтрон тепловой энергии, через несколько суток превратится в стабильный изотоп ксенона. Таким же образом можно подобрать условия для каждого долгоживущего изотопа. Трансмутация долгоживущих делящихся изотопов (^{237}Np , ^{241}Am и др.) может быть реализована также путем деления этих ядер (incineration). В критических реакторах необходимые условия создать достаточно сложно, т.к. в реакции деления рождается около 2,5 нейтронов. Для поддержания цепной реакции обязательно нужен один нейтрон. Но есть другие реакции, в которых нейтрон участвует, но они не приводят к делению. Поэтому подкритические системы, в которых имеется избыток нейтронов благодаря их множественному образованию

в высокоэнергетических реакциях расщепления, являются многообещающими установками для реализации технологий трансмутации [3–6].

Основная идея, на которой основаны 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 ($K_{эф} \sim 0,9-0,98$) blankets [3-6]. ADS-система состоит из ускорителя высокоэнергетических протонов, мишени, подкритического blanketа с коэффициентом умножения $M = 1/(1-k_{эф}) \sim 50$, электрогенератора. Прекращение работы ускорителя приводит к прекращению ввода нейтронов из мишени в подкритический blanket, что приводит к практически мгновенному затуханию цепной ядерной реакции. Для реализации проектов ADS-систем должен быть решен ряд физических и технических задач: выбрана энергия и ток протонного пучка и создан ускоритель с требуемыми параметрами; выбран материал мишени и разработана конструкция мишени для получения нейтронов расщепления; разработана схема и конструкция подкритического blanketа; разработаны методы контроля уровня подкритичности в режиме реального времени (проблемы безопасности); разработана схема съема тепла в подкритическом blanketе; определены скорости реакций трансмутации долгоживущих нуклидов и скорости их образования. Для изучения ключевых вопросов технологий трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и создания Европейского подкритического пилотного реактора, управляемого ускорителем протонов с энергией 200 МэВ Европейский союз объединил исследования всех стран, входящих в ЕС (проекты GUINEVERE, MYRRHA, EFIT в рамках 5 – 7-ых Европейских рамочных программ) [3-6] (Рис. 2 и 3).



Рис. 2. Инновационная установка – GUINEVERA

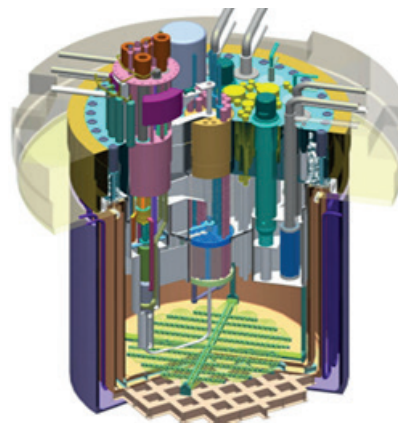


Рис. 3. Инновационная установка – MYRRHA

Эксперименты в области подкритических систем проводились в ОИЯИ (Россия) на глубоководкритической сборке из природного урана «КВИНТА» [3-6]. Они были посвящены изучению сечений взаимодействия высокоэнергетических дейтронов с ядрами урана и тория, сечений образования различных частиц и ядер в реакциях расщепления. Энергии дейтронов варьировались от 2 до 8 ГэВ. Еще одна экспериментальная установка в ОИЯИ (Россия) GAMMA-2 состояла из нейтронпроизводящих мишеней из свинца и из урана. Снаружи мишень окружена парафиновым замедлителем толщиной 6 см, на поверхности которого размещались радиоактивные мишени из йода-129 и нептуния-237, а также детекторы из урана и лантана. На установке были проведены эксперименты по исследованию трансмутации ядер ^{129}I и ^{237}Np под действием релятивистских протонов с энергиями 1,5 ГэВ, 3,7 ГэВ и 7,4 ГэВ, которые подтвердили вывод о независимости спектра нейтронов от энергии и типа первичной частицы в протяженных мишенях [3-6].

В рамках программы работ Международной коллаборации “Энергия–Трансмутация» было выполнено большое количество экспериментальных исследований по ядерной трансмутации. Установка «Энергия-трансмутация» состояла из центральной свинцовой мишени, окруженной урановым бланкетом. Вся система размещалась в деревянном контейнере, заполненном гранулированным полиэтиленом. Систематические исследования характеристик нейтронных полей в установке проводились с использованием протонных и дейтронных пучков с энергией от 0,7 до 2,52 ГэВ. Главной целью экспериментов являлась оптимизация геометрических размеров мишени и уранового бланкета для подкритической сборки “Энергия–Трансмутация» [3-6].

В ГНУ ОИЭЯИ-Сосны НАН Беларуси был создан ядерно-физический подкритический комплекс «ЯЛНА» для проведения исследований нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых внешним источником. Стенд состоит из генератора нейтронов НГ-12-1, уран-полиэтиленовой (тепловой) и бустерной (быстро-тепловой) подкритических сборок, измерительного комплекса и системы жизнеобеспечения (Рис. 4) [3-6].

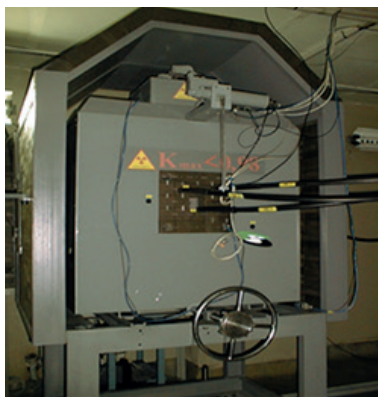


Рис. 4. Инновационная установка – ЯЛНА

На стенде проводились исследования в области: ядерной и нейтронной физики; кинетики подкритических систем с внешними источниками нейтронов; развития методов измерения уровней подкритичности; физики связанных нейтронных систем; трансмутации долгоживущих осколков деления и младших актинидов в различных спектрах нейтронов; оценки ядерных данных для радиотоксичных изотопов; нейтронно-активационного анализа. Полученные данные использовались при создании установки GUINEVERA (Бельгия), функционирующего в критическом и подкритическом режимах; Харьковского нейтронного источника (Украина), Иорданской подкритической сборки и др., а также внесены в базу данных МАГАТЭ как бенчмарк-эксперименты для разработки технологий трансмутации продуктов деления и минорных актинидов в подкритических ядерно-энергетических системах, управляемых внешними источниками нейтронов. Аналогичные проекты разрабатываются в США, Италии, Японии, Индии, России.

В заключение следует отметить, что теоретические и экспериментальные исследования различных типов ядерно-энергетических систем IV поколения активно проводятся в различных странах. Ядерная технология IV поколения обеспечит экономически эффективное и безопасное максимальное использование энергетического потенциала природных ресурсов (благодаря размножению делящегося материала), оптимальное обращение с ядерными отходами (рециклирование всех актинидов и незначительные выбросы парниковых газов) и минимальные риски распространения ядерных материалов. Для обоснования и внедрения систем IV поколения применяются самые строгие критерии с соблюдением требований как отрасли, так и общества, включая устойчивое развитие, конкурентоспособность, безопасность и надежность, защиту от распространения и физическую защиту.

Библиографические ссылки

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. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2013 г. 620 с.
4. OECD/NEA, Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study (2002).
5. Salvatores, M. et al. “Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei” / Nucl. Science&Technology. 1994. Vol. 116, №1. P. 215–227.
6. *Киевицкая, А. И.* Исследовательские ядерные установки государств-участников содружества независимых государств // А. И. Киевицкая / Исследовательские ядерные установки государств – членов СНГ. Под ред. М. К. Виноградова и В. Н. Федulina, М.: Gelios ARV, 2016. 480 с. С. 32–39.