

МРНТИ 44.33.31, 29.15.19, 29.15.53, 27.35.33, 27.35.30, 38.33.15

Ядерно-химические характеристики подкритических ториевых реакторов с внешним нейтронным источником: обзор

З. Инсепов^{1,2*}, А.А. Калыбай¹, З.А. Мансуров³, Б.Т. Лесбаев³, А. Хасанейн², Ж. Алсар^{1,4}

¹Nazarbayev University Research and Innovation System (NURIS), Назарбаев Университет,
пр. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан

²Школа ядерной инженерии, Purdue University, West Lafayette, IN, США

³Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

⁴Нанокompозит ЛТД, пр. Улы Дала, д. 54, Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В связи с ухудшением экологической ситуации проблема декарбонизации требует использования всех доступных низкоуглеродных технологий. Атомная энергетика является одним из перспективных источников низкоуглеродного производства электро- и теплоэнергии, которая может способствовать достижению углеродной нейтральности. Развитие ядерной энергетики невозможно без надежного обеспечения топливным материалом и в данной статье обращается внимание на возможность использования слаборадиоактивного тория-232 (Th-232) в качестве альтернативного топлива для ядерных реакторов. В настоящем обзоре приведены преимущества использования ториевого топлива в различных типах реакторов, таких как легководные реакторы (LWR), водо-водяные реакторы под давлением (PWR) и реакторы на расплавленных солях – жидкосолевые реакторы (MSR). Показано, что ториевый топливный цикл может быть использован в конструкциях реакторов LWR и MSR с незначительными техническими изменениями. Рассмотрены преимущества экспериментального реактора на основе тория на расплавленных солях (Thorium-based Molten Salt Reactor – TMSR), разрабатываемого и внедряемого в Китае в качестве успешного проекта по запуску ториевого цикла как альтернативы традиционному топливу на основе урана. Кроме того, обсуждены проблемы и причины возросшего в настоящее время интереса к жизнеспособности ториевого топливного цикла.

Ключевые слова: ядерное топливо, торий, уран, ядерная реакция, подкритический реактор

1. Введение

Рост численности населения, темпы экономического роста и климатические факторы приводят к тому, что мировой спрос на электроэнергию увеличивается с каждым годом, что обуславливает сокращение запасов ископаемого топлива, а действия, связанные с их добычей, имеют необратимые последствия для экологической обстановки на планете. В рамках Парижского соглашения поставлена задача поиска альтернативных источников энергии, которые приведут к полной декарбонизации экономики, чтобы предотвратить катастрофические последствия глобального изменения климата. Многолетний опыт эксплуата-

ции атомных электростанций показал, что они не загрязняют окружающую среду токсичными газами, золошлаковыми отходами и парниковыми газами, являются источником низкоуглеродной электроэнергии и отвечают требованиям глобальной стратегии декарбонизации. Для удовлетворения растущего спроса на энергию, получаемую экологичным способом, потенциал ядерной энергетики является одним из наиболее перспективных для сохранения устойчивого энергетического баланса в будущем. Однако устойчивость такого энергобаланса во многом будет зависеть от доступности источников ядерного топлива [1]. На сегодняшний день запасы урана, используемого в качестве топлива в атомных электростанциях, сокращаются. Следует отметить, что помимо истощения запасов урана, такие причины, как получение оружейного плутония, трансурановых

*Ответственный автор

E-mail: zinsepov@purdue.edu

изотопов, проблемы, связанные с нехваткой хранилищ отходов, и ядерный терроризм, вызывают глобальную обеспокоенность в отношении использования традиционных ядерных реакторов, работающих на урановом топливе [2-4]. Эти проблемы вновь пробудили потребность в жизнеспособной и более безопасной альтернативе ядерному топливу, которая свела бы к минимуму проблемы, возникающие при использовании ядерного топлива на основе урана [5, 6]. С началом XXI века возобновился интерес к возможному использованию топлива на основе тория для производства ядерной энергии [7, 8]. По сравнению с ураном, торий является более распространенным элементом [9] и в настоящее время остается одним из перспективных экологически чистых видов топлива в ядерных технологиях [10, 11]. Одной из важных положительных характеристик тория как ядерного топлива является то, что он производит меньше долгоживущих радиоактивных отходов, чем уран, поскольку торию требуется семь последовательных захватов нейтронов для преобразования в изотоп минорного актинида (МА), тогда как урану – только один [12-15]. Другой положительной характеристикой тория является то, что он обладает большим сечением захвата тепловых нейтронов, что позволяет генерировать большее количество расщепляющегося материала в виде U-233 при низких энергетических затратах, и тем самым обеспечивает высокий коэффициент конверсии в тепловых легководных реакторах. Полученный из тория уран (U-233) имеет самое низкое отношение сечения захвата нейтронов к делению и самое высокое значение деления нейтрона на поглощенный нейтрон, что позволяет реализовать замкнутый ториевый топливный цикл [16].

Целью настоящего обзора является систематизация текущих исследований и проектов, связанных с использованием тория в ядерной энергетике, анализ преимуществ и вызовов ториевого топливного цикла, а также оценка перспектив внедрения тория в современные и будущие конструкции ядерных реакторов.

2. Торий как альтернативное ядерное топливо

Интерес к урану-235 как к ядерному топливу по сравнению с торием-232, обусловлен тем, что уран-235 является единственным легко расщепляющимся природным материалом, в то время как для превращения тория-232 в расщепляющийся изотоп урана U-233 необходима ядерная трансмутация [17, 18]. Принимаемые меры по повышению безопасности всех типов действующих

атомных реакторов на урановом топливе имеют большой запас реактивности и не могут быть полностью защищены в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, особенно при диверсиях и землетрясениях, и всегда существует риск возникновения аварийных ситуаций, подобных той, что произошла на АЭС «Фукусима». Еще одна существенная проблема атомных станций на уране заключается в том, что они нарабатывают огромное количество радиоактивных отходов, которые являются чрезвычайно токсичными и опасными, поскольку их трудно безопасно утилизировать и очень дорого трансмутировать. Внедрение ториевого топливного цикла в ядерную энергетику может решить проблемы, связанные как с безопасностью атомных реакторов, так и с накоплением радиоактивных отходов [10, 11, 19].

Основные преимущества тория как ядерного топлива заключаются в том, что запасы тория больше по сравнению с ураном. Торий, в отличие от урана, практически состоит из одного изотопа и не требует трудоемкого разделения изотопов. Наличие высокоактивного изотопа U-232 в отработанных продуктах упрощает контроль за несанкционированным перемещением ядерных материалов, а ядерные реакторы, работающие на ториевом топливе, не имеют запаса реактивности, вызывающие неконтролируемые цепные реакции и приводящие к аварийным ситуациям.

Основными местами скопления тория являются промышленные отходы редкоземельных металлов (РЗМ). В этом плане разработка тория имеет свои привлекательные стороны по сравнению с добычей урана, поскольку, сопутствуя добыче РЗМ, не требует строительства новых шахт. Возможность использования уран-ториевого топлива в атомных реакторах изучается учеными еще с прошлого века. Научно-исследовательские и конструкторские работы проводились в Германии, Индии, Японии, России, Великобритании и США [20, 21]. Современное состояние исследований возможностей использования тория в атомных реакторах отражено в работах [22-26].

Для получения энергии в подкритическом режиме необходим делящийся изотоп. В работе [27] описана упрощенная схема получения ядерной энергии в подкритическом режиме путем облучения тория (Th-232) нейтронами. При облучении нейтронами происходят два основных процесса: во-первых, при нейтронном облучении U-233 происходит деление ядра с выделением энергии, а во-вторых, при захвате нейтронов ядром Th-232 возникает цепочка последователь-

ных реакций $^{232}\text{Th} + n \rightarrow (\gamma) \rightarrow ^{233}\text{Th} \rightarrow (\beta) ^{233}\text{Pa} \rightarrow (\beta) ^{233}\text{U}$. Каждая реакция деления приводит к потере одного ядра U-233, а каждая реакция захвата нейтронов ядром Th-232 приводит к появлению ядра U-233, т.е. топливо воспроизводится автоматически и выполняется условие работы реактора в подкритическом режиме. Первое комплексное исследование возможностей использования тория в качестве ядерного топлива, когда Th-232 рассматривался как воспроизводимый изотоп, подвергающийся ядерной трансмутации с образованием делящегося ядра U-233, началось в рамках Манхэттенского проекта [18]. Интерес к Th-232 объясняется тем, что этот металл оказывается только воспроизводящим (или фертильным), но не расщепляющимся материалом, поэтому в ядерных реакторах с ториевым топливом не могут происходить спонтанные неконтролируемые цепные ядерные реакции. Для превращения Th-232 в ядерное топливо необходимо в реактор добавить изотоп радиоактивного вещества, испускающий нейтроны, или облучить Th-232 внешним источником нейтронов. Для деления ядра тория могут использоваться как тепловые (низкоэнергетические), так и быстрые (высокоэнергетические) нейтроны. Урановые стержни должны быть извлечены из реактора после того, как будет использовано менее 10% содержавшегося в них «топлива», торий может быть использован полностью, пока не завершится его преобразование в U-233, который поддерживают ядерную реакцию. В результате в энергетическом выражении 1 тонна тория выделяет энергию, эквивалентную 200 тоннам урана или более чем 3 млн тонн угля.

Таким образом, использование тория в качестве ядерного топлива представляет собой перспективное направление для ядерной энергетики, способное обеспечить более высокий уровень безопасности реакторов, снижение объема радиоактивных отходов и более эффективное использование природных ресурсов.

3. Кинетика ядерных превращений

Ядерное деление – это процесс, при котором атомное ядро, состоящее из Z протонов и N нейтронов ($A = N+Z$), может расщепляться на два или более легких элемента. В работах [28-30] в качестве параметра ядерной «делимости», характеризующего способность ядра к спонтанному делению, была предложена удобная величина, определяемая как $I = (N-Z)/A$. Деление ядра может быть также вынужденным, которое может быть вызвано ядерной реакцией между ядром-мишенью и такими частицами, как нейтроны, протоны, альфа-частицы или гамма-лучи. Известны четыре случая запуска ядерного деления радиоактивных элементов (Pu-239, Pu-241, U-233, U-235), когда поглощение нейтрона с кинетической энергией в несколько десятков МэВ достаточно для деления, среди которых изотоп U-235 является единственным природным делящимся радиоактивным элементом.

Ядерная энергетика тория основана на ядерном делении изотопа U-233, получаемого из воспроизводящего элемента Th-232. При этом образуется нестабильный изотоп Th-233, который в результате β -распада выделяет электрон наряду с антинейтрино и преобразуется в изотоп элемента протактиния Pa-233. Этот изотоп Pa-233 повторно вступает в β -распад, в результате которого образуется U-233, который уже непосредственно является радиоактивным топливом в реакторе. На рис. 1 представлена схема превращения тория в уран.

В конце 1980-х годов лауреат Нобелевской премии Карло Руббиа предложил использовать протонный ускоритель в качестве поставщика нейтронов. Протонный ускоритель частиц бомбардирует мишени из тяжелых металлов, где нейтроны генерируются в результате реакции (p, n). Этим объясняется безопасность ториевого цикла по сравнению с урановым.

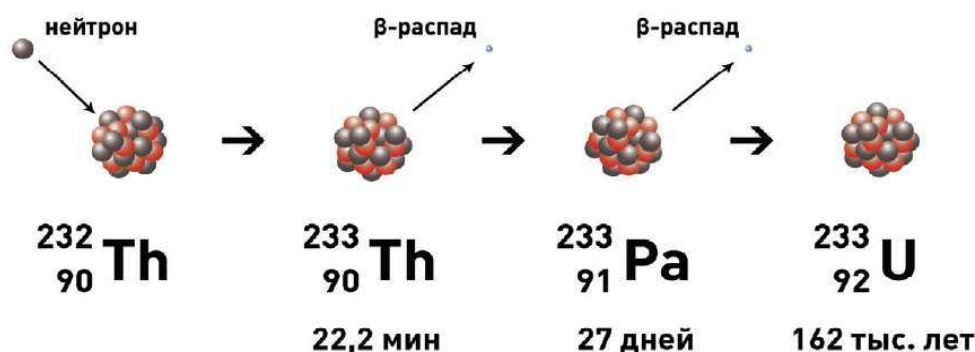
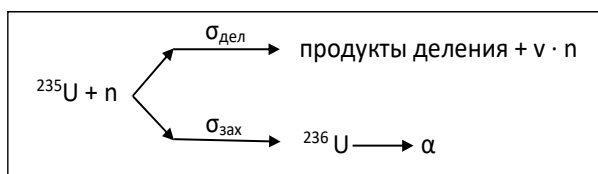


Рис. 1. Последовательность ядерных превращений.

Энергия в атомном ядерном реакторе вырабатывается в процессе деления ядер урана под действием нейтронов. При делении ядер урана образуются «осколки деления» с высокой кинетической энергией и вторичные нейтроны с энергией в диапазоне 10^5 - 10^7 эВ. Среднее число образующихся вторичных нейтронов является определяющей характеристикой для продолжения цепного процесса деления ядер. При взаимодействии нейтронов с атомами урана наряду с реакцией деления происходит конкурирующая реакция радиационного захвата нейтронов с образованием более тяжелых изотопов урана (U-235, U-239), что приводит к потере нейтронов для продолжения процесса деления. В случае с U-235 под действием тепловых нейтронов происходит его «выгорание» в реакциях:



В процессе «выгорания» U-235 образуется долгоживущий изотоп U-236 с периодом полураспада $T_{1/2} = 2,34 \cdot 10^7$ лет с испусканием α -частиц. Таким образом, в связи с тем, что в реакции деления будет участвовать только часть тепловых нейтронов, поглощенных U-235, вероятность того, что поглощенный нейтрон вызовет процесс деления будет выражаться отношением сечения деления $\sigma_{\text{дел}}$ к полному сечению поглощения нейтронов: $\sigma_{\text{дел}}/(\sigma_{\text{дел}} + \sigma_{\text{зах}}) = 1/(1 + \sigma_{\text{зах}}/\sigma_{\text{дел}})$. Выход вторичных нейтронов на каждый первичный нейтрон, поглощенный ядром U-235, будет в ν раз больше: $\eta = \nu/(1 + \sigma_{\text{зах}}/\sigma_{\text{дел}})$. Величина η называется коэффициентом деления. Одним из основных требований для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления является условие $\eta > 1$. Для U-235 и тепловых нейтронов значения сечений реакций деления $\sigma_{\text{дел}}$ и радиационного захвата $\sigma_{\text{зах}}$ дают величину $\eta = 2,07$. Для природного урана с соотношением концентраций U-235 (0,72%) и U-238 (99,28%) получаем $\eta = 1,33$, что означает возможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления в природном уране на тепловых нейтронах [31]. При распаде U-238 в реакциях радиационного захвата нейтронов образуются два короткоживущих элемента: U-239 с периодом полураспада $T_{1/2} = 23,470$ мин и Np-239 с периодом полураспада $T_{1/2} = 2,355$ сутки, которые при естественном

радиоактивном распаде с испусканием β -частиц образуют долгоживущий элемент Pu-239 с периодом полураспада $T_{1/2} = 2,41 \cdot 10^4$ лет.

Состояние работающего ядерного реактора характеризуется эффективным коэффициентом размножения нейтронов k_{ef} в активной зоне, где происходит контролируемая цепная реакция деления ядер. Для описания поведения ядерного реактора используется понятие реактивности, связанная с величиной k_{ef} , которая характеризует поведение цепной реакции деления в активной зоне и выражается соотношением:

$$\rho = \frac{k_{\text{ef}} - 1}{k_{\text{ef}}}$$

При отсутствии дополнительных источников нейтронов и обратных связей в ядерном реакторе возможны три различных состояния: при условии $\rho = 0$, $k_{\text{ef}} = 1$ мощность нейтронов остается постоянной и состояние реактора называется критическим; при условии $\rho > 0$, $k_{\text{ef}} > 1$ мощность нейтронов увеличивается после затухания переходных процессов и состояние реактора называется надкритическим; при условии $\rho < 0$, $k_{\text{ef}} < 1$ мощность нейтронов уменьшается после затухания переходных процессов и состояние реактора называется подкритическим. Работа подкритических систем связана с относительно небольшой реактивностью [32].

Основная цель изучения кинетики ядерных превращений состоит в том, чтобы связать происходящие в системе трансформации с определенными изменениями реактивности, которые возникают либо из-за управления ресурсами, либо из-за перемещения топлива. Th-232 претерпевает ряд последовательных реакций при облучении нейтронами. Эти ядерные превращения производят продукт U-233, тот самый расщепляющийся материал, который затем может использоваться в ядерных реакторах в качестве радиоактивного топлива

4. Подкритические ториевые реакторы с внешним нейтронным источником

Традиционный ядерный энергетический реактор рассчитан на работу на проектной мощности в течение достаточно длительного периода времени, называемого кампанией активной зоны реактора. В течение всей кампании реактор должен оставаться критическим. Первое критическое состояние реактора создается за счет постепенного

заполнения активной зоны реактора топливными сборками до тех пор, пока не начнется самоподдерживающаяся цепная реакция деления и в активной зоне не накопится первая критическая масса. Когда определенная часть загруженного топлива израсходуется на деление, в системе появятся «осколки деления», которые в разной степени выполняют функцию поглотителей нейтронов. В этот момент реактор станет подкритическим и остановится. Таким образом, для длительной работы реактора необходимо загружать его активную зону топливом сверхкритического количества. Процесс сверхкритической загрузки активной зоны всегда должен сопровождаться синхронным введением соответствующих количеств компенсирующих поглотителей. Загрузка сверхкритического количества ядерного топлива в активную зону приводит к появлению положительной реактивности, которая мгновенно подавляется компенсирующими поглотителями. Компенсирующими поглотителями могут быть подвижные группы стержней, сплошные стержни с выгорающим поглотителем, закрепленные в активной зоне, или борная кислота, добавленная в воду первого контура. При изучении динамики критического реактора становится ясно, что механизмы обратной связи в реакторе заставляют его работать на определенном уровне мощности. Для температурной обратной связи замедлитель уменьшает количество нейтронов в направлении, где плотность замедлителя значительна. Таким образом, если мощность реактора увеличивается, то будет большая «утечка» более быстрых нейтронов из активной зоны до того, как они термализуются, что имеет явный отрицательный коэффициент реактивности. Теория запаздывания нейтронов и эксплуатационное руководство показывают, что мощность реактора может изменяться мгновенно из-за постоянной внешней реактивности во всей системе. Поэтому критический реактор относительно нестабилен как по отношению к мгновенным нагрузкам реактивности, так и к большим изменениям реактивности.

Подкритические реакторы – это ядерные системы, основанные на принципах конструкции и эксплуатации без размножения нейтронов. Они полагаются на внешний источник нейтронов для поддержания активной зоны реактора. Эти реакторы должны поддерживать запас реактивности (Shutdown margin, SDM) между подкритическими и критическими условиями, где размножение нейтронов стабилизирует реактивность. Производительность подкритического реактора

зависит от степени поглощения нейтронов, замедления, конфигурации источника и топливной мишени. Текущие исследования сосредоточены на вопросах анализа и совершенствования сборки подкритического реактора [33, 34].

Подробную информацию о текущем состоянии использования тория в ядерных и неядерных коммерческих приложениях, существующих промышленных методах производства тория и перспективах модернизации технологических процессов по наращиванию его добычи, можно найти в технических отчетах Национальных лабораторий Министерства энергетики США [35] и в статьях [36, 37].

Предложенный Лоуренсом в 1950-х годах подкритический реактор ADS (Accelerator-Driven System) с управляемой ускорительной системой, работающий на тории, используется для генерации делящихся материалов посредством трансмутации нейтронов (рис. 2).

Нейтрон от расщепления тяжелых ядер, таких как свинец, преобразует торий в U-233, генерируя тепло в результате ядерного деления после того, как протон с энергией от 500 до 1000 МэВ попадает в атомное ядро свинца, а затем отрывает нейтроны. Впоследствии U-233 распадается на более мелкие элементы, такие как ксенон и цирконий, производя меньше отходов. Ядерный реактор на Th-232 производит меньшее количество долгоживущих актинидов, чем реактор, работающий на U-238, а ядерный топливный цикл Th-232/U-233 не генерирует плутоний. Реакция протекает при атмосферном давлении и автоматически прекращается при остановке пучка протонов. Все эти преимущества использования ториевого цикла в реакторах ADS обеспечивают гарантию безопасности для потребителей энергии во всем мире.

Преимущества тория, как ядерного топлива, побудили провести обширные исследования по его использованию в различных типах ядерных реакторов как в однократном, так и в замкнутом топливном циклах. В однократном цикле исследования тория в качестве топлива проводились для широкого круга ядерных реакторов, включая легководные реакторы (LWR, The light-water reactor) [38-39] и реакторы на расплавленных солях (MSR, Molten salt reactor) [40, 41]. Использование аксиально-гетерогенного уран-ториевого стержня в сборке PWR может увеличить выгорание топлива с использованием LEU и ториевого топлива [40]. В работе [42] сообщается, что при использовании уран-ториевой фракции в соотно-

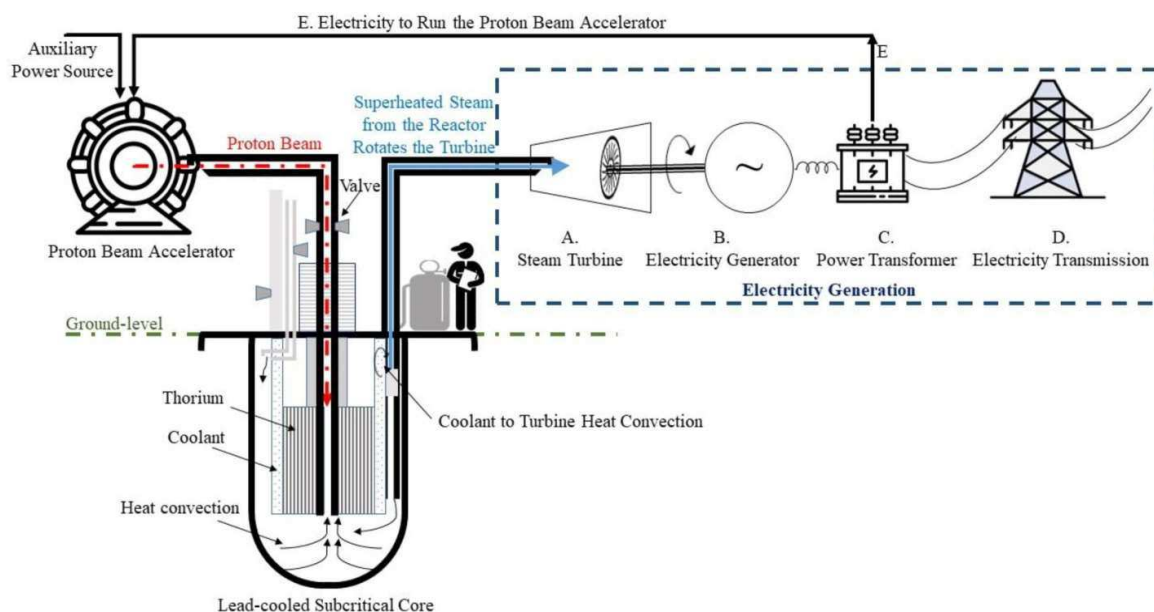


Рис. 2. Ядерная подкритическая система, управляемая ускорителем (ADS).

шении 1:1, эквивалентное выгорание в однократном реакторе MSR может быть увеличено на 20% по сравнению с низкообогащенным ураном (LEU) и за 30 лет эксплуатации может снизить потребность в природном уране до 1500 тонн. В реакторах с водой под давлением (PWR, pressurized water reactor) использование тория может помочь выровнять распределение мощности и улучшить запас безопасности для остановки реактора [43], в то время как плутоний-ториевое топливо может продлить топливный цикл по сравнению LEU [44]. В работе [45] исследованы возможности ториевого цикла для утилизации радиоактивных отходов.

В качестве примера следует упомянуть, что в настоящее время Китай готовится к испытанию тестового ядерного реактора на тории. В результате анализа научно-технического сотрудничества между Китаем и Канадой, можно предположить, что за основу данного экспериментального реактора на тории взят реактор CANDU 6 производства Канады [46, 47]. Отличительная черта китайского экспериментального реактора в том, что в качестве охлаждающей жидкости используют расплав соли вместо воды. Преимуществом реакторов на расплавленных солях (MSR) является то, что они позволяют производить переработку топлива в режиме онлайн и эти реакторы разработаны для полного использования тория путем воспроизводства U-233 для собственного потребления, так что не требуется внешнего делящегося сырья. Некоторые примеры: реактор-размножитель на расплавленных солях (MSBR) [48, 49], пассивный компактный реактор на распла-

вленных солях (PCMSR) [50] и однофазный двухзонный реактор на расплавленных солях тория (SD-TMSR) [51], вырабатывающие ядерную энергию безопасно и дешево, а также производящие гораздо меньшее количество долгоживущих радиоактивных отходов, чем обычные реакторы.

Стратегический проект Китая по разработке жидкосолевого реактора (ЖСР) с тепловым спектром был запущен в 2011 году. В 2025 году планируется испытать демонстрационный жидкосолевой реактор на основе тория (Thorium-based Molten Salt Reactor – TMSR) мощностью 10 МВт, а также коммерческого TMSR мощностью 1 ГВт – в 2050 году. С момента начала китайского проекта было проведено несколько исследований по разработке реактора TMSR для эффективного использования торий-уранового топливного цикла. В рамках этого проекта Ли и др. представили концепцию однофазного двухзонного ториевого жидкосолевого реактора в 2018 году [51], которая в настоящее время считается одной из наиболее многообещающих концепций жидкосолевых реакторов.

Опытный жидкосолевой ториевый реактор в городе Увэй, находящийся под управлением Шанхайского института прикладной физики (SINAP), имеет расчетную мощность всего 2 МВт тепловой энергии. Этой мощности достаточно для обеспечения не более 1000 домов. Если запланированные эксперименты будут успешными, Китай надеется построить реакторную электростанцию мощностью 373 МВт к началу 2030 года, которая сможет обеспечить электроэнергией сотни тысяч домов.

Уникальные свойства тория и возможности их использования не оставляют без внимания и исследователи из других стран. Энтузиазм в отношении всестороннего изучения возможного применения тория в атомной энергетике уже демонстрировали Индия, Япония, Великобритания, США и другие страны. Однако надо отметить, что применение тория для производства электроэнергии сопряжено с трудностями, что стало предметом обсуждения новой публикации МАГАТЭ «Ближайшие и перспективные долгосрочные варианты развертывания ядерной энергетики на основе тория» [52]. Четырехлетний исследовательский проект, координируемый МАГАТЭ, опубликовал отчет об основных результатах. Проект, посвященный возможностям дальнейшего развития атомной энергетики на основе тория, рассматривает основные преимущества и проблемы использования ториевого топлива, а также анализирует применение тория в различных типах атомных реакторов, от наиболее распространенных водоохлаждаемых до жидкосолевых реакторов.

Еще одним преимуществом является то, что ториевые реакторы потенциально могут быть гораздо более экологичными, чем реакторы на урановом топливе. Ториевые реакторы, как и ядерные реакторы в целом, не выделяют углекислый газ или другие парниковые газы во время работы. В то же время реакторы на основе тория производят значительно меньше долгоживущих ядерных отходов, чем реакторы на урановом топливе, которые широко используются сегодня.

5. Проблемы ториевых реакторов

Всестороннее изучение тория показывает, что существуют некоторые экономические и технические препятствия, затрудняющие непосредственному практическому использованию этого металла в качестве ядерного топлива. Основным недостатком ториевого цикла очевиден: он значительно дороже уранового и технологически не до конца проработан. В связи с этим, будущее ядерной энергетики зависит от успехов в разработке реакторов и топливных циклов нового поколения, которые должны иметь высокую безопасность и быть экономически конкурентоспособными. Изобилие этого ценного ископаемого внушает оптимистичные перспективы, однако фактически добыча тория в современных реалиях является дорогостоящим технологическим процессом.

«Основным источником тория является тот же минерал, который является источником других редкоземельных элементов, и этот минерал – монацит», – утверждает Марк Михаласки, специалист МАГАТЭ по ресурсам урана. На сегодняшний день ценность монацита определяется именно спросом на редкоземельные элементы (РЗЭ). Очевидно, что добыча монацита исключительно из-за содержания в нем тория на сегодня нерентабельна. Поскольку торий является сопутствующим продуктом добычи РЗЭ, для его извлечения требуются дополнительные более дорогие методы, чем для добычи урана. Таким образом, в нынешних условиях объемы тория, которые можно добыть из недр экономически рентабельными способами, не так уж велики по сравнению с объемами добычи урана. Однако ситуация может кардинально измениться, если возрастет спрос на торий и его использование в качестве ядерного топлива в энергетике нового поколения» [35].

Отсутствие достаточного мирового опыта использования тория в качестве ядерного топлива сказывается на высокой стоимости научных и практических исследований, разработки и испытаний ториевых ядерных экспериментальных установок. Поскольку торий является воспроизводящим материалом, а не расщепляющимся, для него требуется своего рода двигатель – нейтронный источник, например, уран или плутоний, способные запускать и поддерживать цепные ядерные превращения в реакторе.

6. Заключение

Ториевый топливный цикл обладает значительным потенциалом для развития ядерной энергетики и может решить множество проблем, связанных с уран-плутониевым циклом. В их числе безопасность реакторов, уменьшение объемов долгоживущих радиоактивных отходов, а также устойчивость к распространению ядерного оружия. Ториевые реакторы, такие как подкритические системы ADS и жидкосолевые реакторы, предлагают высокую степень безопасности, возможность работы в замкнутом цикле и снижение экологических рисков.

В этом направлении уже достигнуты существенные успехи. В частности, Китай активно разрабатывает ториевые реакторы, включая экспериментальный жидкосолевой реактор (TMSR) мощностью 2 МВт, запущенный в городе Увэй. Планируется испытание демонстрационного TMSR мощностью 10 МВт к 2025 году и коммерческого реактора мощностью 1 ГВт к 2050 году.

В то же время практическое внедрение тория сталкивается с рядом технических и экономических вызовов. Высокая стоимость добычи и переработки тория, необходимость разработки новых конструкций реакторов и топливных циклов, а также отсутствие достаточного опыта промышленного использования ограничивают темпы его внедрения. Для решения этих проблем необходимо продолжение фундаментальных и прикладных исследований, направленных на оптимизацию технологий добычи, обработки и использования тория в ядерной энергетике.

Прогресс в этой области может обеспечить безопасное, экономически эффективное и экологически устойчивое будущее ядерной энергетики, способствующее достижению глобальных целей по декарбонизации и обеспечению энергетической безопасности.

Благодарность

Данное исследование выполнено в рамках реализации научной Программы ИРН BR24993225 по программно-целевому финансированию Комитета науки Министерства науки и высшего образования РК на 2024-2026 годы.

Список литературы

- [1]. Pauluis G., Van den Duerpel L. Trends in the nuclear fuel cycle. Economic, environmental and social aspects // NEA News. – 2001. – Vol. 19.2. – P. 4-7.
- [2]. Galahom A.A. Minimization of the fission product waste by using thorium based fuel instead of uranium dioxide // Nucl Eng Des. – 2017. – Vol. 314. – P. 165-172.
- [3]. Schaffer M.B. Toward a viable nuclear waste disposal program // Energy Policy. – 2011. – Vol. 39. – P. 1382-1388.
- [4]. Schaffer M.B. Abundant thorium as an alternative nuclear fuel: important waste disposal and weapon proliferation advantages // Energy Policy. – 2013. – Vol. 60. – P. 4-12.
- [5]. Heffron R.J., Ashley S.F., Nuttall W.J. The global nuclear liability regime post Fukushima Daiichi // Prog Nucl Energy. – 2016. – Vol. 90. – P. 1-10.
- [6]. Hong S., Bradshaw C.J., Brook B.W. Evaluating options for the future energy mix of Japan after the Fukushima nuclear crisis // Energy Policy. – 2013. – Vol. 56. – P. 418-424.
- [7]. Ault T., Krahn S., Croff A. Thorium fuel cycle research and literature: trends and insights from eight decades of diverse projects and evolving priorities // Ann Nucl Energy. – 2017. – Vol. 110. – P. 726-738.
- [8]. Vijayan P., Shivakumar V., Basu S., Sinha R. Role of thorium in the Indian nuclear power programme // Prog Nucl Energy. – 2017. – Vol. 101. – P. 43-52.
- [9]. Patel K.S., Sharma S., Maity J.P., Martín-Ramos P., Fiket Ž., Bhattacharya P., Zhu Y. Occurrence of uranium, thorium and rare earth elements in the environment: A review // Front. Environ. Sci. – 2023. – Vol. 10. – P. 1058053.
- [10]. Galahom A., Abdelghafar A. Discussing the possibility of using thorium-based fuels as an alternative fuel to uranium dioxide fuel for APR-1400 reactor // Nucl Eng Des. – 2024. – Vol. 417. – P. 112817.
- [11]. Mohamed S.A., Alnassar N., Abdel-Rahman M.A., Galahom A.A. Investigating the possibility of using a mixture of thorium with different fissile materials as a fuel in TRISO particles for the PBMR-400 reactor // Prog Nucl Energy. – 2024. – Vol. 173. – P. 105293.
- [12]. Brown N.R., Powers J.J., Feng B., Heidet F., Stauff N.E., Zhang G., Taiwo T.A. Sustainable thorium nuclear fuel cycles: A comparison of intermediate and fast neutron spectrum systems // Nucl Eng Des. – 2015. – Vol. 289. – P. 252-265.
- [13]. Chroneos A., Goulatis I., Daskalopulu A., Tsoukalas L.H. Thorium fuel revisited // Progress in Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 164. – P. 104839.
- [14]. Galahom A., Abdelghafar A., Amr Ibrahim. Integrated analysis to investigate the viability of using Thorium-based fuel instead of traditional fuel in CANDU reactor // Nucl Eng Des. – 2022. – Vol. 398. – P. 111969.
- [15]. Jyothi R.K., De Melo L.G.T.C., Santos R.M., Yoon H.S. An overview of thorium as a prospective natural resource for future energy // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – P. 1132611.
- [16]. Zou C.Y., Cai C.Z., Yu C.G., Wu J.H., Chen J.G. Transition to thorium fuel cycle for TMSR // Nucl Eng Des. – 2018. – Vol. 330. – P. 420-428.
- [17]. Drera S.S., Björk K.I., Kelly J.F. Thorium fuel production and results from beginning of life irradiation // Prog Nucl Energy. – 2014. – Vol. 72. – P. 5-10.
- [18]. Ünak T. What is the potential use of thorium in the future energy production technology? // Prog Nucl Energy. – 2000. – Vol. 37. – P. 137-144.
- [19]. Humphrey U.E., Khandaker M.U. Viability of thorium-based nuclear fuel cycle for the next generation nuclear reactor: Issues and prospects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 97. – P. 259-275.
- [20]. Пухлий В.А., Софийский И.Ю., Мирошниченко С.Т. Концепция ториевой энергетики. Збірник наукових праць СНУЯЕмап. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2010.

- [21]. Субботин С.А. Ториевый цикл. Выбираем реактор // Атомная стратегия. – 2007. – Vol. 6. – P. 28.
- [22]. Van Gosen B.S., Tulsidas H. Thorium as a nuclear fuel. In Uranium for nuclear power // Woodhead Publishing. – 2016. – P. 253-296
- [23]. Lainetti P.E. Thorium and its future importance for nuclear energy generation // Journal of Energy and Power Engineering. – 2016. – Vol. 10. – P. 600-605.
- [24]. Rubbia C. A future for thorium power?. In Thorium Energy for the World: Proceedings of the ThEC13 // Conference, CERN, Globe of Science and Innovation. Geneva, Switzerland, 2016. – P. 9-25.
- [25]. Titarenko Y.E., Ananev S.S., Batyaev V.F., Belousov V.I., Blandinskiy V.Y., Chernov K.G., Konobeyev A.Y. Radiation and nuclear Physics aspects of the use of the thorium fuel cycle in a hybrid fusion facility // Fusion Science and Technology. – 2023. – Vol. 79(2). – P. 117-134.
- [26]. Mammadzada E., Kara A. Thorium fuel Performance: A comparative study on thorium's efficiency in PWR reactors // Nucl Eng Des. – 2024. – Vol. 424. – P. 113306.
- [27]. Арбузов Б.А. Физика подкритического ядерного реактора // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – №. 1. – С. 73-78.
- [28]. Bell G.I. Fission and the Synthesis of Heavy Nuclei by Rapid Neutron Capture. Physical Review. – 1967. – Vol. 158(4). – P. 1127.
- [29]. Nix J.R. Further studies in the liquid-drop theory on nuclear fission // Nuclear Physics A. – 1969. – Vol. 130(2). – P. 241-292.
- [30]. Bolsterli M., Fiset E.O., Nix J.R., Norton J.L. New calculation of fission barriers for heavy and superheavy nuclei // Physical Review C. – 1972. – Vol. 5(3). – P. 1050.
- [31]. Физические основы работы ядерных реакторов // Интернет-газета «Энергетика». <http://energetika.in.ua/ru/books/book-4/part-1/section-2/2-1>
- [32]. Liu B., Zhang X., Liu F., Dou W., Wang J. The electron accelerator driven sub-critical system // Nucl Eng Des. – 2022. – Vol. 386. – P. 111567.
- [33]. Manwaring N., Borrelli R.A. At-power subcritical multiplication in the advanced test reactor // Nucl Eng Des. – 2023. – Vol. 401. – P. 112040
- [34]. Ma Y., Zhong R., Yu H., Huang S., Tian C., He X., Chai X. Startup analyses of a megawatt heat pipe cooled reactor // Prog Nucl Energy. – 2022. – Vol. 153. – P. 104405.
- [35]. Alternate Fuels: Thorium and Uranium-233 // Report to Congress. US Department of Energy, 2023.
- [36]. Pauzi A.M., Abdul Wahid A.W., Saad J.M. Preliminary quantitative feasibility analysis of proposed Th-based nuclear reactor // IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Engin. – 2019. – Vol. 555. – P. 012006.
- [37]. Хассанейн А., Калабаев А.А., Инсепов З. Торий как потенциальное ядерное топливо. Сборник COR 28 UAE Некоторые проблемы декарбонизации и альтернативной энергетики. Алматы, 2024.
- [38]. Lau C.W., Nylén H., Demaziere C., Sandberg U. Reducing axial offset and improving stability in PWRs by using uranium–thorium fuel // Prog Nucl Energy. – 2014. – Vol. 76. – P. 137-147
- [39]. Uguru E.H., Sani S.A., Khandaker M.U., Rabir M.H. Investigation on the effect of ²³⁸U replacement with ²³²Th in small modular reactor (SMR) fuel matrix // Nucl Eng Des. – 2020. – Vol. 118. – P. 103108
- [40]. van der Walt H.B., van Niekerk F., Reitsma F. Implementation of in-rod axially heterogeneous thorium-uranium fuel in a typical PWR // Nucl Eng Des. – 2023. – Vol. 408. – P. 112319.
- [41]. Ahmad A., McClamrock E.B., Glaser A. Neutronics calculations for denatured molten salt reactors: Assessing resource requirements and proliferation-risk attributes // Ann Nucl Energy. – 2015. – Vol. 75. – P. 261-267
- [42]. Tan M.L., Zhu G.F., Zhang Z.D., Zou Y., Yu X.H., Yu C.G., Yan R. Burnup optimization of once-through molten salt reactors using enriched uranium and thorium // Nuclear Science and Techniques. – 2022. – Vol. 33(1). – P. 5.
- [43]. Björk K.I., Netterbrant C. Thorium as an additive for improved neutronic properties in boiling water reactor fuel // Ann Nucl Energy. – 2018. – Vol. 113. – P. 470-475.
- [44]. Insulander Björk K., Lau C.W., Nylén H., Sandberg U. Study of Thorium-Plutonium Fuel for Possible Operating Cycle Extension in PWRs // Sci Technol Nucl Install. – 2013. – Vol. 1. – P. 867561.
- [45]. Schaffer M.B. Abundant thorium as an alternative nuclear fuel: Important waste disposal and weapon proliferation advantages // Energy Policy. – 2013. – Vol. 60. – P. 4-12.
- [46]. Azeez S., Dick P., Hopwood J. The Enhanced CANDU 6 TM Reactor-Generation III CANDU Medium Size Global Reactor // In Proceedings of an International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21. Century. Vienna, 2011.
- [47]. Mallapaty S. China prepares to test thorium-fuelled nuclear reactor // Nature. – 2021. – Vol. 597(7876). – P. 311-312.
- [48]. Bettis E.S., Robertson Roy C. The design and performance features of a single-fluid molten-salt breeder reactor // Nuclear applications and technology. – 1970. – P. 190-207.

- [49]. Serp J., Allibert M., Beneš O., Delpech S., Feynberg O., Ghetta V., Zhimin D. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives // *Prog Nucl Energy*. – 2014. – Vol. 77. – P. 308-319.
- [50]. Harto A.W. Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR), modular thermal breeder reactor with totally passive safety system // In AIP Conference Proceedings. – 2012. – Vol. 1448(1). – P. 82-95.
- [51]. Li G.C., Cong P., Yu C.G., Zou Y., Sun J.Y., Chen J.G., Xu H.J. Optimization of Th-U fuel breeding based on a single-fluid double-zone thorium molten salt reactor // *Prog Nucl Energy*. – 2018. – Vol. 108. – 144-151.
- [52]. Th fuel cycle - Potential benefits and challenges // Intern. Atomic Energy Agency-1450. – 2005. <https://www.ourenergypolicy.org/resources/thorium-fuel-cycle-potential-benefits-and-challenges/>

References

- [1]. Pauluis G, Van den Durpel L (2001) *NEA News* 19.2:4-7.
- [2]. Galahom AA (2017) *Nucl Eng Des* 314:165-172. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.01.024>
- [3]. Schaffer MB (2011) *Energy Policy* 39:1382-1388. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.010>
- [4]. Schaffer MB (2013) *Energy Policy* 60:4-12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.062>
- [5]. Heffron RJ, Ashley SF, Nuttall WJ (2016) *Prog Nucl Energy* 90:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.019>
- [6]. Hong S, Bradshaw CJ, Brook BW (2013) *Energy Policy* 56:418-424. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.002>
- [7]. Ault T, Krahn S, Croff A (2017) *Ann Nucl Energy* 110:726-738. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.06.026>
- [8]. Vijayan P, Shivakumar V, Basu S, Sinha R (2017) *Prog Nucl Energy* 101:43-52. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.02.005>
- [9]. Patel KS, Sharma S, Maity JP, Martín-Ramos P, Fiket Ž, Bhattacharya P, Zhu Y (2023) *Front. Environ. Sci.* 10:1058053. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058053>
- [10]. Galahom A, Abdelghafar A (2024) *Nucl Eng Des* 417:112817. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112817>
- [11]. Mohamed SA, Alnassar N, Abdel-Rahman MA, Galahom AA (2024) *Prog Nucl Energy* 173:105293. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105293>
- [12]. Brown NR, Powers JJ, Feng B, Heidet F, Stauff NE, Zhang G, Taiwo TA (2015) *Nucl Eng Des* 289:252-265. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.04.015>
- [13]. Chronos A, Goulatis I, Daskalopulu A, Tsoukalas LH (2023) *Prog Nucl Energy* 164:104839. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104839>
- [14]. Galahom A, Abdelghafar A, Amr Ibrahim (2022) *Nucl Eng Des* 398:111969. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111969>
- [15]. Jyothi RK, De Melo LGTC, Santos RM, Yoon HS (2023) *Front Energy Res* 11:1132611. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1132611>
- [16]. Zou CY, Cai CZ, Yu CG, Wu JH, Chen JG (2018) *Nucl Eng Des* 330: 420-428. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.033>
- [17]. Drera SS, Björk KI, Kelly JF (2014) *Prog Nucl Energy* 72:5-10. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.08.008>
- [18]. Ünak T (2000) *Prog Nucl Energy* 37: 137-144. [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(00\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00038-X)
- [19]. Humphrey UE, Khandaker MU (2018) *Renew Sustain Energy Rev* 97:259-275. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.019>
- [20]. Pukhliy VA, Sofiyskiy IYu, Miroshnichenko ST (2010) The concept of thorium energy [Kontseptsiya torievoy energetiki] Sevastopol, SNUYaEiP (in Russian).
- [21]. Subbotin SA (2007) Nuclear strategy [Atomnaya strategiya]. 6:28.
- [22]. Van Gosen BS, Tulsidas H (2016) Woodhead Publishing: 253-296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100307-7.00010-7>
- [23]. Lainetti PE (2016) *Journal of Energy and Power Engineering* 10:600-605. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2016.10.003>
- [24]. Rubbia C (2016) A future for thorium power?. In Thorium Energy for the World: Proceedings of the ThEC13. Conference, CERN, Globe of Science and Innovation, Geneva, Switzerland P. 9-25. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26542-1_4
- [25]. Titarenko YE, Ananov SS, Batyaev VF, Belousov VI, Blandinskiy VY, Chernov KG, Konobeyev AY (2023) *Fusion Sci Technol* 79(2):117-134. <https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2121525>
- [26]. Mammadzada E, Kara A (2024) *Nucl Eng Des* 424:113306. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113306>
- [27]. Arbuzov B.A (1997) *Soros Educational Journal [Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal]* 1:73-78.
- [28]. Bell GI (1967) *Physical Review* 158(4): P. 1127. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.158.1127>
- [29]. Nix JR (1969) *Nucl Phys A* 130(2):241-292. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(69\)90730-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(69)90730-1)
- [30]. Bolsterli M, Fiset EO, Nix JR, Norton JL (1972) *Phys Rev C* 5(3):1050. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.5.1050>
- [31]. Internet newspaper «Energy». Physical principles of operation of nuclear reactors [Fizicheskie osnovy raboty yadernykh reaktorov]. <http://energetika.in.ua/ru/books/book-4/part-1/section-2/2-1>

- [32]. Liu B, Zhang X, Liu F, Dou W, Wang J (2022) Nucl Eng Des 386:111567. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111567>
- [33]. Manwaring N, Borrelli RA (2023) Nucl Eng Des 401:112040. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112040>
- [34]. Ma Y, Zhong R, Yu H, Huang S, Tian C, He X, Chai X (2022) Prog Nucl Energy 153:104405. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104405>
- [35]. Alternate Fuels: Thorium and Uranium-233. Report to Congress, 2023. US Department of Energy.
- [36]. Pauzi AM, Abdul Wahid AW, Saad JM (2019) IOP Conf Series: Mater Sci Engin 555:012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/555/1/012006>
- [37]. Khassaneyn A, Kalabaev AA, Insepov Z (2024) Thorium as a potential nuclear fuel. Collection COR 28 UAE Some problems of decarbonization and alternative energy [Toriy kak potentsialnoe yadernoe toplivo. Sbornik COR 28 UAE Nekotorye problemy dekarbonizatsii i alternativnoy energetiki], Almaty.
- [38]. Lau CW, Nylén H, Demaziere C, Sandberg U (2014) Prog Nucl Energy 76:137-147. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.05.016>
- [39]. Uguru EH, Sani SA, Khandaker MU Rabir MH (2020) Prog Nucl Energy 118:103108. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103108>
- [40]. van der Walt HB, van Niekerk F, Reitsma F (2023) Nucl Eng Des 408:112319. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112319>
- [41]. Ahmad A, McClamrock EB, Glaser A (2015) Ann. Nucl. Energy 75:261-267. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.014>
- [42]. Tan ML, Zhu GF, Zhang ZD, Zou Y, Yu XH, Yu CG, Yan R (2022) Nucl Sci Tech 33(1):5. <https://doi.org/10.1007/s41365-022-00995-2>
- [43]. Björk KI, Netterbrant C (2018) Ann Nucl Energy 113:470-475. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.11.040>
- [44]. Insulander Björk K, Lau CW, Nylén H, Sandberg U (2013) Sci Technol Nucl Install 1:67561. <https://doi.org/10.1155/2013/867561>
- [45]. Schaffer MB (2013) Energy Policy 60:4-12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.062>
- [46]. Azeez S, Dick P, Hopwood J (2011) The Enhanced CANDU 6 TM Reactor-Generation III CANDU Medium Size Global Reactor // In Proceedings of an International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21. Century, Vienna.
- [47]. Mallapaty S (2021) Nature 597(7876):311-312. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02459-w>
- [48]. Bettis ES, Robertson Roy C (1970) Nuclear applications and technology, 190-207. <https://doi.org/10.13182/NT70-A28625>
- [49]. Serp J, Allibert M, Beneš O, Delpech S, Feynberg O, Ghetta V, Zhimin D (2014) Prog. Nucl. Energy 77:308-319. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.014>
- [50]. Harto AW (2012) AIP Conf Proc 1448(1):82-95. <https://doi.org/10.1063/1.4725441>
- [51]. Li GC, Cong P, Yu CG, Zou Y, Sun JY, Chen JG, Xu HJ (2018) Prog Nucl Energy 108:144-151. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.04.017>
- [52]. Intern. Atomic Energy Agency-1450 (2005) Th fuel cycle - Potential benefits and challenges. <https://www.ourenergypolicy.org/resources/thorium-fuel-cycle-potential-benefits-and-challenges/>

Nuclear-chemical characteristics of subcritical thorium reactors with external neutron source: a review

Z. Insepov^{1,2}, A.A. Kalybay¹, Z.A. Mansurov³,
B.T. Lesbayev³, A. Hassanein², J. Alsar^{1,4}

¹Nazarbayev University Research and Innovation System (NURIS), Nazarbayev University, 53, Kabanbay Batyr ave., Astana, Kazakhstan

²School of Nuclear Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

³Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbay Batyr str., Almaty, Kazakhstan

⁴Nanocomposite LTD, 54, Uly Dala ave., Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

Due to the deteriorating environmental situation, the problem of decarbonisation requires the use of all available low-carbon technologies. Nuclear power is one of the promising sources of low-carbon electricity and heat generation, which can contribute to achieving carbon neutrality. The development of nuclear power is impossible without a reliable supply of fuel material and this paper draws attention to the possibility of using weakly boron-radioactive thorium-232 (Th-232) as an alternative fuel for nuclear reactors. In this review, the advantages of using thorium fuel in different types of reactors such as light water reactors (LWRs), pressurised water reactors (PWRs) and molten salt reactors - liquid salt reactors (MSRs) are presented. It is shown that the thorium fuel cycle can be used in LWR and MSR reactor designs with minor technical changes. The advantages of the experimental Thorium-based Molten Salt Reactor (TMSR), which is being developed and implemented in China as a successful

project to launch the thorium cycle as an alternative to conventional uranium-based fuel, are reviewed. In addition, the problems and reasons for the currently increased interest in the viability of the thorium fuel cycle are discussed.

Keywords: nuclear fuel, thorium, uranium, nuclear reaction, subcritical reactor

Сыртқы нейтрон көзі бар субкритикалық торий реакторларының ядро-химиялық сипаттамалары: шолу

З. Инсепов^{1,2*}, А.А. Калыбай¹, З.А. Мансуров³,
Б.Т. Лесбаев³, А. Хасанейн², Ж. Алсар^{1,4}

¹Nazarbayev University Research and Innovation System (NURIS), Назарбаев Университеті, Қабанбай батыр даңғылы, 53, Астана, Қазақстан

²Ядролық инженерия мектебі, urdue University, West Lafayette, IN, USA.

³Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к-сі, 172, Алматы, Қазақстан

⁴Nanocomposite LTD, Ұлы Дала даңғылы, 54, Астана, Қазақстан

АНДАТПА

Экологиялық жағдайдың нашарлауына байланысты декарбонизация проблемасы барлық қолда бар төмен көміртекті технологияларды қолдандуды талап етеді. Атом энергетикасы көміртекті бейтараптылыққа қол жеткізуге көмектесетін электр және жылу энергиясын төмен көміртекті

өндірудің перспективалы көздерінің бірі болып табылады. Атом энергетикасын дамыту отын материалдарымен сенімді қамтамасыз етудің мүмкін емес және бұл мақалада ядролық реакторлар үшін балама отын ретінде әлсіз радиоактивті торий-232 (Th-232) пайдалану мүмкіндігіне назар аударылады. Бұл шолуда торий отынын жеңіл су реакторлары (LWR), қысымды су реакторлары (PWR) және балқытылған тұз реакторлары (MSRs) сияқты реакторлардың әртүрлі түрлерінде пайдаланудың артықшылықтары сипатталған. Торийдің жанармай циклін LWR және MSR реакторларының конструкцияларында шамалы техникалық өзгерістермен қолдануға болатыны көрсетілді. Дәстүрлі уран негізіндегі отынға балама ретінде торий циклін іске қосудың сәтті жобасы ретінде Қытайда әзірленіп, жүзеге асырылып жатқан тәжірибелік торий негізіндегі балқытылған тұз реакторының (TMSR) артықшылықтары қарастырылады. Сонымен қатар, торийдің отын циклінің өміршеңдігіне қызығушылықтың артуының қиындықтары мен себептері талқыланады.

Түйін сөздер: ядролық отын; торий; Уран; ядролық реакция; субкритикалық реактор