

УДК 621.039.5

ДОМАШЕВ Е.Д.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В УКРАИНЕ

Розглянуто основні проблеми світової енергетики. Криза в атомній енергетиці пов'язана з використанням уран-плутонієвого циклу. Обґрунтована можливість розвитку атомної енергетики України на базі корабельних технологій з реакторами, в яких використовують паливний цикл без відтворення "військового" плутонію та подальшим освоєнням уран-торієвого паливного циклу. Висвітлена доцільність підземного розміщення реакторів, що гарантує безпеку атомних станцій майбутнього.

Рассмотрены основные проблемы мировой энергетики. Кризис в атомной энергетике связывается с использованием уран-плутониевого топливного цикла. Обосновывается возможность развития атомной энергетики Украины на базе судовых технологий с реакторами, использующими топливный цикл без воспроизводства "военного" плутония с дальнейшим освоением уран-ториевого топливного цикла. Показана целесообразность подземного размещения реакторов, что гарантирует безопасность атомных станций будущего.

Main problems of the world power industry are considered. The crisis in nuclear power industry is related to using the uranium-plutonium fuel cycle. The possibility of development of Ukrainian nuclear power industry on the basis of ship's technologies with reactors, using fuel cycles without conversion of "military" plutonium, with further assimilation of the uranium-thorium fuel cycle, is grounded. The expediency of under-ground reactor siting is shown, what guarantees safety of future nuclear power plants.

МИРЭС – Мировой энергетический совет;
 U-Pu ЯТЦ – уран-плутониевый ядерный топлив-
 ный цикл;
 ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;
 ТПЭ – трансплутониевые элементы;
 РТН, РБН – реакторы на тепловых и быстрых ней-
 тронах (соответственно);
 ПАТЭС – подземная атомная теплоэлектростанция;

ЯЭУ – ядерные энергетические установки;
 РАО – радиоактивные отходы;
 U-Th ЯТЦ – уран-ториевый ядерный топливный
 цикл;
 ЖСР – жидко-солевой реактор;
 КЖСР – каскадный жидкосолевой реактор;
 ОТЦ, ЗТЦ – открытый и закрытый топливные цик-
 лы (соответственно).

Решение задач социального развития страны не-
 возможно без соответствующего развития топливно-
 энергетического комплекса. Даже с учетом значи-
 тельных структурных изменений в промышленности
 и перехода на энергосберегающие технологии по-
 требности в энергии в ближайшие десятилетия будут
 увеличиваться, особенно потребность в электро-
 энергии, дефицит которой в стране сегодня ощуща-
 ется весьма заметно, несмотря на то, что стабилиза-
 ция в экономике еще не настала.

Прогноз мировых энергетических потребностей в
 2020 г. на XV Конгрессе МИРЭС основывался на
 предположении, что среднегодовые темпы экономи-
 ческого роста в ближайшие 30 лет будут составлять
 3,3-3,8 % против 3,4 % в 1986-1990 г.г. и 2,8 % в
 1981-1985 г.г. С учетом этого потребность мира в
 первичных энергоресурсах в 2020 г. будет примерно
 в 1,5 раза больше по сравнению с 1990 г. [1].

Энергетика является отраслью хозяйства, которая
 наиболее интенсивно влияет на окружающую среду.
 Поэтому будущее человечества в полной мере зави-
 сит от выбора путей ее развития. Кроме того, энер-
 гетика – материалоемкая и инерционная отрасль,

которая требует больших капиталовложений и, сле-
 довательно, точного выбора стратегии развития.

В настоящее время широко обсуждаются три ос-
 новных пути развития мировой энергетики [2]:

- 1 – угольная энергетика;
- 2 – энергетика, основанная на использовании ядер-
 ного топлива;
- 3 – энергетика, основанная на возобновляемых ре-
 сурсах (солнечная, ветровая, геотермальная и др.).

Понятно, что при определении глобальных путей
 развития мировой энергетики необходимо учиты-
 вать, как наличие ресурсов, достаточных для долго-
 временного развития, так и воздействие каждого из
 этих путей на окружающую среду. Анализ этих путей
 грешит, как правило, субъективностью их авторов,
 отдающих предпочтение тому или другому направ-
 лению. В результате большинству подходов к анали-
 зу того или другого направления характерна гиган-
 томания. Можно ли предать, что вся энергетика
 будет только угольной, или атомной, или солнечной,
 ветровой, геотермальной?... Тем не менее, сторонни-
 ки угольной энергетики стараются отстоять свое на-
 правление аргументацией неисчерпаемых запасов уг-

ля и возможностями кардинальных улучшений экологических показателей угольных станций. Страны-монополисты по производству атомных реакторов совершенствуют реакторы, увеличивая их мощность до 1500-2000 МВт. Сторонники ветровой, солнечной и геотермальной энергетики доказывают неисчерпаемость экологически чистых возобновляемых источников энергии – солнца, ветра, подземных источников горячей воды и т. д.

Взвешенные, всесторонние комплексные подходы в развитии мировой энергетики, особенно с учетом специфики отдельных регионов, к сожалению, пока отсутствуют. А ведь достижение устойчивого энергообеспечения в мире, в перспективе, в большей мере будет зависеть от успехов в решении комплекса экологических, экономических и социальных проблем при производстве, преобразовании, транспортировке и использовании на конечной стадии топлива и энергии. И конечно же, оценка путей развития энергетики немыслима без использования биосферных моделей, позволяющих оценить размер влияния тех или иных источников энергии на глобальные процессы.

Так, мировые запасы угля составляют основную часть мировых запасов ископаемого топлива [3], но использование угля в энергетике – это кислотные дожди и парниковый эффект, определяемые выбросами серы и углерода. Оценка же парникового эффекта невозможна без изучения глобального углеродного цикла, в который включается и антропогенный углерод [4].

Если бы все энергетические потребности удовлетворялись за счет современных ядерных реакторов, то огромные запасы природного урана оказались бы недостаточными [5, 6, 7]. Надежды на реакторы-размножители [5, 6, 7, 23] пока проблематичны. Низкая скорость воспроизводства топлива, отсутствие физически безопасных реакторов, а также проблемы, связанные с получением конструкционных материалов, позволяющих после эксплуатации иметь радиоактивные отходы, которые могут распадаться до безопасного уровня менее, чем за 100 лет, т.е. времени, в течение которого достаточно надежно можно обеспечить эффективный контроль за местами захоронения, затягивают время промышленного использования бридеров до середины следующего столетия [23, 25].

Котлы внутреннего сгорания (КВС) [4], представляющие собой помещенные в землю емкости, внутри которых производятся ядерные взрывы мощностью до 50 килотонн, потребуют до 1000 тонн стали на тонну тротилового эквивалента. Учитывая проблемы, связанные с охрупчиванием металла под воздействием мощного потока нейтронов, такие КВС, как и термоядерные реакторы, могут быть рассчитаны не более, чем на 10 лет, после чего вся масса стали должна подвергнуться захоронению. При этом необходимо, чтобы вся имеющаяся сталь была безазотистой, так как азот, взаимодействуя с нейтронами, превращается в радиоактивный изотоп углерода

C^{14} . Очевидно, что получение безазотистых сталей в таких масштабах делает проблему практически неразрешимой. Проблемы же, которые возникают в связи с необходимостью изоляции изотопа C^{14} , оказываются исключительно сложными по ряду причин [8, 9]:

- время полураспада C^{14} составляет 6000 лет;
- коэффициент накопления C^{14} по сравнению с его концентрацией в среде, равен нескольким тысячам;
- углерод является основным строительным материалом живых организмов, в том числе и генетического материала, так что радиационный эффект от распада C^{14} превосходит воздействие и стронция, и цезия [8].

Поэтому этот путь в энергетике требует получения оценок на новом уровне с использованием моделей углеродного цикла [10].

Солнечная и ветровая энергетики обладают приятным свойством, они подвержены сезонным и суточным колебаниям, а также погодным изменениям. Поэтому необходимо аккумулирование энергии. Самым естественным аккумулятором является биомасса (как наземная, так и водная) [11, 16]. Аккумуляционные способности биосферы по регионам определяют в будущем эффективность использования возобновляемых источников энергии.

При использовании геотермальной энергии возникает несколько проблем в связи с окружающей средой [12, 13, 14, 15]. Это – возможность поступления большого количества минеральных солей из недр вместе с водой, играющей роль теплоносителя, попадание большого количества низкопотенциальной теплоты в верхние оболочки биосферы, так как КПД использования геотермальной теплоты будет достаточно низким из-за низкой температуры поступающего из недр теплоносителя (порядка 200°C). Кроме того, могут возникнуть проблемы, связанные с образованием гидроразрывов и каверн в глубинах земли из-за отбора теплоты и возникновения напряжений в земных породах.

Солнечная и ветровая энергетики обладают неоспоримыми экологическими преимуществами, так как используют чистый и неистощимый источник энергии. Поэтому, если избавиться на данном этапе от навязчивой попытки решить мировые проблемы энергетики с помощью солнца и ветра, то и солнечная, и ветровая, и геотермальная энергии могут занять свое достойное место в энергетике многих стран. Уместно отметить, что стоимость энергии на ветровых станциях приблизилась к величине 7 центов за 1 кВт·час, а стоимость солнечной энергии на полупроводниковых системах может достигнуть 24 цента вместо 60 долл. за 1 кВт·час [11, 16].

Оценки мировых ресурсов нетрадиционных возобновляемых источников энергии, сделанные на XV Конгрессе МИРЭС [1] показали, что в ближайшей перспективе нельзя рассчитывать на существенное увеличение доли этих источников энергии в суммарном мировом энергопотреблении. Можно лишь

ожидать некоторого роста использования биомассы.

Таким образом, каждая страна, планируя развитие своей энергетики, должна осуществлять комплексный анализ, как производства энергии, так и экологических, социальных и экономических проблем, возникающих при этом, включая и анализ возможных глобальных климатических изменений [1, 17].

Глубокий анализ проблем развития энергетики Украины представлен в [18, 19, 20, 21, 22]. В последние годы около 50 % электроэнергии Украины производится на АЭС. Атомные электростанции с реакторами ВВЭР стали надежными производителями электроэнергии в Украине. Однако, "тень Чернобыля" над миром не развеялась и вопрос, как развиваться атомной энергетике в Украине остается без ответа.

Дело в том, что кроме перечисленных выше, атомная энергетика имеет более серьезные недостатки, которые Украина, не имеющая своего замкнутого топливного цикла, не может не учитывать.

В настоящее время во всем мире в ядерной энергетике коммерчески используется U-Pu ЯТЦ (независимо от типа применяемого ядерного реактора).

Вначале U-Pu ЯТЦ был разработан и осуществлен для сугубо военных целей, для производства ядерных зарядов и атомных бомб. Нарботанный в U-Pu ЯТЦ низкофононый Pu (с низким содержанием ^{240}Pu) и высокообогащенный ^{235}U использовались и используются по назначению в военных целях.

Применение "военного" U-Pu ЯТЦ для других целей, в частности для широкомасштабного производства тепловой и электрической энергии, выявило ряд присущих ему принципиальных проблем, которые не были разрешены в процессе осуществления военных программ и при последующем развитии ядерной энергетики. Наиболее серьезным и трудно-разрешимым является загрязнение и накопление в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ) больших количеств высокофононого плутония ($^{239,240,241,242}\text{Pu}$), нептуния, трансплутониевых элементов ($^{241,243}\text{Am}$, $^{242,244}\text{Cm}$), а также изотопов урана ($^{232,234,236}\text{U}$). Эта долгоживущая "грязь", которая получается только благодаря использованию в ядерной энергетике U-Pu ЯТЦ, и составляет основную "головную боль".

По принятой во всем мире концепции развитие ядерной энергетики должно осуществляться в две стадии. На первой стадии в реакторах на тепловых нейтронах (РТН) наряду с производством энергии производится наработка плутония, который должен сжигаться на второй стадии в реакторах на быстрых нейтронах (РБН). Однако создание и эксплуатация первого в мире промышленного РБН Суперфеникс-1 на 1240 МВт (эл), использующего наработанный плутоний, показали его экономическую неконкурентоспособность [25]. По этой причине страны ЕЭС отказались от строительства второго промышленного РБН Суперфеникс-2. Поэтому, как указывалось вы-

ше, согласно самым оптимистическим прогнозным оценкам, широкое промышленное освоение U-Pu ЯТЦ на РБН можно ожидать лишь после 2050 г. и то лишь в случае преодоления множества трудностей технического характера при изготовлении смешанного топлива на основе высокофононого Pu и ТПЭ, а также обеспечения экономической рентабельности этого ЯТЦ. В связи с этим в ядерном топливном цикле будет происходить накопление высокофононого Pu и ТПЭ. При мировой мощности ядерной энергетики в 400 ГВт в период с 1990 по 2050 г. произойдет накопление высокофононого Pu и ТПЭ в количествах:

Высокофононый

$^{239,240,241,242}\text{Pu}$	200,0 кг/(год·ГВт)·400 ГВт x 60 лет=4800 т.
^{241}Am	1,250 кг/(год·ГВт)·400 ГВт x 60 лет=30 т.
^{243}Am	2,300 кг/(год·ГВт)·400 ГВт x 60 лет=55,2 т.
^{242}Cm	0,200 кг/(год·ГВт)·400 ГВт x 60 лет=4,8 т.
^{244}Cm	0,775 кг/(год·ГВт)·400 ГВт x 60 лет=18,6 т.
^{237}Np	11,250 кг/(год·ГВт)·400 ГВт x 60 лет=270,0 т.

При использовании высокофононого Pu и ТПЭ в смешанном топливе (МОХ-топливе) в РТН (при осуществлении 5 рециклов Pu, что технически маловероятно) за этот же период произойдет также значительное накопление указанных радиоактивных материалов.

Кроме того, будут накоплены большие количества урана, загрязненного изотопами $^{232,234,236}\text{U}$: $25\text{т}/(\text{год}\cdot\text{ГВт})\cdot 400\text{ ГВт} \times 60\text{ лет}=600\ 000\text{ т}$ (без рецикла), $25\text{ т}/(\text{год}\cdot\text{ГВт})\cdot 400\text{ ГВт} \times 4\text{ цикла}(15\text{ лет})=40\ 000\text{ т}$ (с рециклом).

Если сравнивать эти количества высокофононого Pu и ТПЭ (накопленные за 60 лет в ядерной энергетике) с накоплением низкофононого Pu в военных программах двух противоборствующих сторон, то они огромны. Следует отметить, что транспортировка ОЯТ на большие расстояния, его переработка на радиохимических заводах, герметизация, транспортировка и хранение на складах, выделение высокофононого Pu, ТПЭ, Np и загрязненного U являются сами по себе очень сложными техническими проблемами, требующими больших постоянных финансовых затрат. Любое существенное нарушение в обращении (преднамеренное или непреднамеренное) может привести к глобальной экологической катастрофе.

К настоящему времени ни в одной стране мира практически до конца не осуществлено полное замыкание (полное использование делящихся материалов) U-Pu ЯТЦ в ядерной энергетике. U-Pu ЯТЦ не замыкается ни по Pu, ни по ТПЭ, ни по U.

При ныне действующих 14 энергоблоках в Украине, хотим мы того или нет, будет ежегодно образовываться примерно 2,56 т высокофонового плутония (не считая нептуния и трансплутониевых элементов) [24], которые подлежат длительному хранению. За период с 1990 по 2050 г. (до появления бридеров) произойдет накопление свыше 150 т высокофонового плутония. Что останется от безъядерной державы Украина при этом? И что мы оставим будущим поколениям?

Какой же выход из создавшегося кризиса в ядерной энергетике, возникшего в результате использования U-Pu ЯТЦ? Путь один – отказаться в ядерной энергетике от "военного" U-Pu ЯТЦ, отказаться и остановить наработку высокофонового Pu и ТПЭ [23].

Необходимо вспомнить слова И.В. Курчатова: "Это только необходимость заставляет нас создавать ядерное оружие. Главное направление использования ядерной энергии – атомная энергетика". И это так. Мир понял, что альтернативы атомной энергетике нет и в ближайшие десятилетия не предвидится. Но даже, если бы Украина пошла на создание собственного замкнутого ядерного топливного цикла, вряд ли целесообразно развивать национальную атомную энергетiku на базе реакторов с U-Pu ЯТЦ, будь это усовершенствованные российские (ВВЭР-1100, НП-500, ВПБЭР-600 и др.), французские (серия № 4 1450 МВт), американские, канадские и др. реакторы повышенной безопасности. Тем более, что ни в одной стране мира, производящей атомную энергию на основе уран-плутониевого топливного цикла, не решена проблема вывода из эксплуатации ядерных установок после выработки ими проектного ресурса времени.

Вывод из эксплуатации ядерных установок после выработки ими ресурсного времени связан с образованием большого количества загрязненных радионуклидами отходов и необходимостью реабилитации (очистки) земель от загрязнений. Реализация этих работ потребует дополнительных финансовых средств, по разным оценкам от 30 до 100 % от первоначально затраченных на создание АЭС. Решение вопросов по выводу ядерных установок также перекладывается на плечи последующих поколений!!!

Поэтому, а также учитывая результаты Чернобыля, Украина должна определить свой, особый путь развития гарантированно безопасной атомной энергетики, глубоко осознавая, что Украина слишком велика для примитивной энергетики. И этот путь, в ближайшие 50-100 лет, необходимо осуществлять не на основе уран-плутониевого ядерного топливного цикла, а на базе так называемого *ядерного топливного цикла без воспроизводства нового делящегося материала* [23, 24]. То есть, в ядерных реакторах предлагается использовать обогащенный уран, практически не содержащий уран-238 (с обогащением до 99,9 %). В таком, чисто урановом ядерном топливном цикле (без урана-238) не будет образовываться высокофоновый плутоний. В предлагаемом ЯТЦ может пол-

ностью использоваться весь высокообогащенный уран от военных программ.

Для практического осуществления ядерного топливного цикла без воспроизводства нового делящегося материала могут быть применены ядерные энергетические установки, в которых уже в настоящее время используется интерметаллидное ядерное топливо с повышенным обогащением по урану-235 до 45-66 %. Они хорошо зарекомендовали себя при многолетней эксплуатации на атомных кораблях и подводных лодках.

Ядерные установки с реакторами корабельного типа были повторно (после Чернобыля) исследованы на надежность и безопасность и рекомендованы к использованию [26, 27]. В настоящее время в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (Санкт-Петербург) разработан проект промышленной подземной атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) мощностью 900 МВт с использованием ядерных реакторов корабельного типа КН-3 на высокообогащенном уране-235 и судостроительных технологий [27, 28, 29].

Возможности размещения атомных электростанций под землей с целью повышения их безопасности изучены достаточно хорошо [30, 31, 32, 33, 34]. После Чернобыля эти предложения были активно поддержаны академиком А.Д. Сахаровым. Единственным сдерживающим фактором оказались внушительные габаритные размеры современных реакторов с U-Pu ЯТЦ.

Судостроительные технологии принципиально по-иному обеспечивают, как характеристики собственно атомных станций, так и весь их жизненный цикл. Благодаря свойственной корабельным ЯЭУ компактности, их удалось разместить в сравнительно небольших подземных выработках для укрепления которых отпала необходимость в применении железобетонных креплений, которые удорожают многократно подземное размещение крупных современных единичных блоков. Прочноплотные барьеры безопасности таких станций улучшаются в количественном отношении до 6 (матрица твэл, оболочки твэл, первый контур, реакторная выгородка, защитное ограждение, толщина земного слоя) и в качественном, поскольку толщина земного слоя становится безальтернативным защитным укрытием радиоактивных источников (реакторных установок, хранилищ ОЯТ, хранилищ РАО) от многих внешних причин, в том числе от разрушения их в результате падения любых по массе и скорости современных самолетов, ракет, бомб, снарядов, космических кораблей, весьма крупных метеоритов, воздействия бетоннопрожигающих боеприпасов и других средств воздушного-космического происхождения.

Подземная станция с использованием строительных технологий и корабельных реакторов ни при каких аварийных обстоятельствах не создает ситуации (предлога) для проведения эвакуации населения, непосредственно проживающего вблизи нее, что характерно для событий 4 уровня безопасности международной шкалы INES. Это обстоятельство

позволяет исключить необходимость страхования станции как объекта повышенного риска для населения.

Судостроительные технологии позволили решить несколько крайне актуальных проблем ядерной энергетики.

Во-первых, необитаемые при эксплуатации контейменты станции оснащаются системой обеднения воздуха кислородом (до 15 %), что практически исключает пожароопасность в энергомодулях. Собственно конструкции оборудования, приборов выполняются, как и на кораблях, в пожарозащищенном исполнении. Таким образом решается одна из серьезнейших проблем современных АЭС.

Во-вторых, оборудование корабельного типа допускает высокие скорости маневрирования (до 1 % в сек) по мощности, что обеспечивает легкую адаптацию станции к графику нагрузки потребителя. Это свойство практически недостижимо для современных ВВЭР.

В-третьих, в составе подземных станций используются технические решения корабельного типа, обеспечивающие высокую ударостойкость конструкций, что позволяет размещать такие станции в любых сейсмоопасных районах планеты без опасения их разрушения в результате сейсмических воздействий.

В-четвертых, решение, в конечном счете, сложнейшей задачи вывода из эксплуатации станции, которое в принятой технологии обеспечивается теми же методами, как и утилизация судовых атомных установок заводским способом. При этом подземные помещения продолжают свою службу с новыми атомными блоками в течение следующего 30-40-летнего цикла.

Ядерные реакторы корабельного типа малогабаритны, управление их работой автоматизировано с использованием современной вычислительной техники. Они могут комплектоваться модульно в АЭС малой, средней и большой мощности по требованию заказчика.

Использование в корабельных реакторах высокообогащенного до 99,9 % урана-235, т.е. отсутствие в топливной композиции урана-238, приводит к практически нулевому коэффициенту реактивности по температуре топлива, что связано с отсутствием доплер-эффекта на резонансах урана-238.

Подземная компоновка ядерных установок корабельного типа резко повышает экологическую безопасность окружающей среды, поэтому АЭС может быть вплотную приближена к потребителю тепла, в том числе и крупному городу. Это позволяет утилизировать практически все тепло, выделяющееся при делении урана-235 для нужд потребителя и не загрязнять окружающую среду тепловыми отбросами.

На втором этапе развития и применения ядерных реакторов корабельного типа, работающих без воспроизводства нового делящегося материала, наряду с производством тепла и электрической энергии можно при повышении плотности потока до

$5.10^{15} \text{H/cm}^2 \cdot \text{с}$ использовать "лишние" нейтроны для трансмутации образующихся в топливном цикле долгоживущих актиноидов и продуктов деления.

Стоимость вывода ядерно-энергетической установки корабельного типа из эксплуатации не превышает 1 % ее первоначальной стоимости.

Расчет технико-экономических показателей АЭС с реакторами типа КН-3 с высокообогащенным топливом в сравнении с альтернативными энергоисточниками (реактор ВВЭР-1000 в мировых ценах (табл. 1), проведенный во Всероссийском проектном и научно-исследовательском институте энергетической технологии (ВНИПИЭТ), показал, что атомная энергия при использовании ядерного топливного цикла без воспроизводства нового делящегося материала на базе ядерных установок корабельного типа дешевле, чем при использовании водо-водяных реакторов уран-плутониевого цикла.

Конкурентоспособность АЭС на основе корабельных реакторов с применением нового ядерного топливного цикла объясняется, в основном, снижением стоимости топливной составляющей и удельных капитальных затрат, более полным использованием тепловой энергии и снижением транспортных расходов, более низкими расходами на вывод из эксплуатации ядерных установок корабельного типа после выработки ими проектного ресурса.

Недостатком этого чисто уранового ЯТЦ является относительно малое наличие в природе изотопа урана-235. На первых порах в предлагаемом ЯТЦ может полностью использоваться весь высокообогащенный уран от военных программ. В дальнейшем в качестве делящегося материала может использоваться весь накопленный от военных программ плутоний и высокофононовый делящийся плутоний из уран-плутониевого цикла.

На следующем этапе поставленную задачу можно решить на основе давно известного уран-ториевого ядерного топливного цикла (U-Th ЯТЦ), внося в него определенные усовершенствования [23]. Следует отметить, что на начальной стадии осуществления U-Th ЯТЦ при использовании тепловыделяющих элементов из смеси диоксида тория и низкообогащенного урана-235 в ядерном реакторе будут нарабатываться значительные количества высокофонового плутония и трансплутониевых элементов. В этом случае говорить о преимуществах U-Th ЯТЦ просто не имеет смысла. По вышеуказанным причинам U-Th ЯТЦ в ядерной энергетике в настоящее время коммерчески не используется.

Альтернативу традиционной концепции развития ядерной энергетике на базе твердотопливных реакторов представляет концепция жидкосольевых ядерных реакторов (ЖСР), которая строится на использовании ядерного топлива в жидкой фазе [35].

Концепция ЖСР рассматривалась в США [35, 36, 37, 38], Японии [39, 40], Франции [41], Швейцарии [42] и бывшем СССР [43]. В докладе [44] описан способ получения тепловой энергии делением тяжелых

Таблица 1. Техничко-экономические показатели АЭС с реакторами типа КН-3 в сравнении с альтернативными энергоисточниками (в мировых ценах на 01.01.95 г. на мощность 750 Мвт.)

Наименование показателей	Ед. изм.	АЭС КН-3	АЭС с реакторами ВВЭР	
			ОТЦ	ЗТЦ
1. Электрическая мощность -установленная -рабочая	МВт	900	1000	1000
	МВт	750	750	750
2. Коэффициент использования установленной мощности	-	0,96	0,75	0,75
3. Расход эл. энергии на собственные нужды	%	5,1	9,5	9,5
4. Годовой отпуск эл. энергии	млрд.кВт·ч	5,98	4,41	4,41
5. Кап. вложения в энергоисточник, в том числе прих. на выруб. энергии.	млн. \$	218,1	1200	1200
	млн. \$	191,9	1176	1176
6. Стоимость начальной загрузки.	млн. \$	154,7	73,5	73,5
7. Долевое участие в строительстве предприятий завершающих стадий топл. цикла з-д по переработке ОЯТ могильник ВАО	млн. \$	7,8		20,8
	млн. \$	6,7		17,8
	млн. \$	1,1		3,0
8. Сум. сравнимые первоначальные затраты.	млн. \$	354,4		1270,3
9. Годовые затраты на производство эл. энергии.	млн. \$	71,72	145,54	143,02
10. Оборотные фонды (страховой запас).	млн. \$	15,47	7,35	7,35
11. Сум. Сравнимые годовые затраты на производство эл. энергии.	млн. \$	87,19	152,89	150,37
12. Себестоимость эл. энергии, в т.ч. – топливная составляющая с учетом затрат на обращение с ОЯТ – эксплуатационная составляющая.	цент/кВт·ч	1,199	3,297	3,240
	цент/кВт·ч	0,456	0,721	0,662
	цент/кВт·ч	0,743	2,576	2,578

ядер, образующихся при переработке твердого топлива РТН и РБН, в каскадном жидкосолевым реакторе (КЖСР).

В основе работы КЖСР лежит известный [45] принцип умножения нейтронов на связанных подкритически быстротепловых активных зонах. КЖСР состоит из двух активных зон (АЗ-1 и АЗ-2), в которых и осуществляется циркуляция расплава топливных солей.

При содержании ^{233}U в топливной соли свыше 2 % его наработка практически сравнивается с его выгоранием, поэтому можно рекомендовать вводить ^{233}U в начальный состав топлива в количестве 0,5-0,8 % по отношению к количеству ^{232}Th . [23].

Следует особо отметить, что использование гомогенной жидкофазной композиции, выполняющей функции топлива и теплоносителя, при ее высокой скорости циркуляции обеспечивает равномерное распределение делящихся материалов в активной зоне. В результате автоматически выравниваются

нейтронные потоки по диаметру и высоте активных зон, в целом улучшаются физические характеристики работы КЖСР.

Проведенные расчеты накопления ядер актиноидов в зоне АЗ-2 при нейтронных потоках от 10^{13} до 10^{15} н/см²·с показали, что наименьшее накопление протактиния-234 (в 100-10000 раз) происходит при нейтронном потоке 10^{13} н/см²·с [23]. Это объясняется тем, что для исключения образования протактиния-234 из протактиния-233 последнему необходимо претерпеть распад до захвата нейтрона для последующего перехода в ^{233}U . В [46] такой режим работы назван "доминирующим режимом распада". При более высоком нейтронном потоке бридинг требует быстрого удаления протактиния-233. Указанные расчеты показали также, что при нейтронном потоке 10^{13} н/см²·с в топливной соли активной зоны АЗ-2 практически не происходит накопления ядер актиноидов с массовым числом более 235. Следовательно, при таком режиме работы нет оснований для

опасений по накоплению тяжелых актиноидов (Np, Pu, Am, Cm), которые вызвали бы загрязнение газовой фазы и существенные затруднения при переработке топливной соли фторированием элементарным фтором. Нет также опасений по накоплению и загрязнению делящегося материала изотопов урана-236 [23].

Снижение нейтронного потока до 10^{13} н/см²·с приводит к увеличению габаритов активной зоны АЗ-2. Расчеты показали, что при равновесном режиме работы и нейтронном потоке 10^{13} н/см²·с в АЗ-2 развивается тепловая мощность 4,35 МВт (1,91 МВт эл) на 1 т тория. Для модульной установки мощностью в 100 МВт (эл) рабочий объем активной зоны АЗ-2 составит 45,0 м³ (цилиндр 2,4x10 м) [23]. Такие размеры КЖСР позволяют рассматривать их в качестве замещающих рассмотренные выше реакторы (КН-3) с чисто урановым ЯТЦ.

С целью исключения образования и накопления в топливной соли тяжелых радионуклидов при стационарном режиме работы КЖСР в активной зоне АЗ-2 должен поддерживаться нейтронный поток на уровне 10^{13} н/см²·с [23].

Для исключения рисков при транспортировании делящихся материалов предпочтительнее создавать АЭС с ядерными реакторами, работающими в конвертерном режиме (с коэффициентом воспроизводства делящихся материалов, равным 1).

Таким образом, реализация предложенного в [23] U-Th ЯТЦ позволяет полностью избавиться от недостатков U-Pu ЯТЦ и приблизиться к таким техническим показателям эффективности работы ЯТЦ, которые ограничены лишь физической природой деления ядер и полностью используют делящиеся материалы без наработки плутония и ТПЭ.

Подземная компоновка АЭС с КЖСР делает такие станции, как указывалось выше, гарантированно безопасными.

На основании предложенных решений можно сделать вывод о том, что уже в настоящее время можно исключить все нерешенные проблемы и недостатки "военного" U-Pu ЯТЦ, использовать дополнительные аргументы, которые позволят склонить мнение общественности к дальнейшему развитию ядерной энергетики и в ближайшее время приступить к созданию замещающих мощностей АЭС на новой основе.

Для Украины эти предложения достаточно актуальны. ПАТЭС с реакторами КН-3 (чисто урановый цикл) Украина, за исключением топливных кассет, может строить своими силами, ориентируясь на свое электро и тепломеханическое оборудование. Корпуса судовых реакторов изготавливались на Николаевском кораблестроительном заводе.

КЖСР вместе с топливным циклом могут быть в перспективе освоены в Украине. Украина для освоения ядерной энергетики без воспроизводства новых делящихся материалов обладает необходимым научным и промышленным потенциалом. В ИТТФ НАН

Украины создана экспериментальная база, которая уже более 30 лет используется для теплофизического обоснования безопасности судовых ядерных энергетических установок [47].

Запасы природного урана и тория для U-Th ЯТЦ в Украине практически неограничены.

Литература

1. XV Конгресс Мирового энергетического совета (МИРЭС).– Теплоэнергетика.– 1993.–№ 6.– С. 2-7.
2. Алексеев В.В., Рустамов Н.А. Три пути развития энергетики и их воздействие на окружающую среду.– Изв. ВУЗ. Энергетика.– № 3-4.– 1997.– С. 57-61.
3. Мазор Ю.Р., Матвеев А.К. Будущее угля// Природа.– 1977.– № 11.– С. 66-71.
4. Иванов Г.А. Наступление века угля, глухая оборона ядерной энергетики// Наука Урала.– 1994.– № 3.– С. 139-143.
5. Александров А.П. Технические аспекты ядерной энергетики на грани веков.– Атомная энергия.– 1984.– Т. 58.– Вып. 6. – С. 339-343.
6. Пономарев-Степной Н.Н. Атомная энергетика в СССР.– Теплоэнергетика.– 1990.–№ 8.–С. 2-6.
7. Ядерная энергетика в третьем тысячелетии.– Тез. докл. Международного симпозиума.– Обнинск.– 1996.– 136 с.
8. Рублевский В.П., Голеницкий С.П., Курдин Г.С. Радиоактивный углерод в биосфере.– М.: Атомиздат, 1979.– 152 с.
9. Alekseev V.V., Rustamov N.A. Global carbon cycle and nuclear energetic// Global Changes and Geography. Abstracts. The IGU Conference/ Moscow, Russia, August, 14-18.– 1995.– М.: 1995.– P. 7.
10. Bolin B., Degens E.T., Kempe S., Ketner P. (eds.) The global carbon cycle.– N-Y.: John Wiley., 1979.– 546 p.
11. Алексеев В.В. Экология и экономика энергетики.– М.: Знание, 1990.– 64 с.
12. Доброхотов В.И., Шпильрайн Э.Э. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Проблемы и перспективы.– Теплоэнергетика.– 1996.– № 5.– С. 2-9.
13. Развитие геотермальной энергетики в мире (Заметки со всемирного конгресса в Италии).– Теплоэнергетика.– 1996.– № 5– с. 76-77.
14. Алексеев В.В. Энергетическая политика и возобновляемые источники энергии// История и методология естественных наук.– М.: Изд-во МГУ.– 1992.– Вып. 37.– С. 47-62.
15. Берман Э. Геотермальная энергия.– М.: Мир, 1978.– 416 с.
16. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах севера.– Л.: Наука, 1989.– 205 с.
17. Доброхотов В.И. Основные направления научно-технического прогресса в энергетике, решаемые в

- рамках Государственной программы России "Экологически чистая энергетика." – Теплоэнергетика. – 1993. – № 6. – С. 39-45.
18. Абубекеров Р.А. Новый взгляд на стратегию производства электроэнергии в Украине. – Деловая Украина. – № 72(324), 13 сентября 1995г.
 19. Банников Ю.А., Абубекеров Р.А., Домашев Е.Д. и др. Парадоксы проекта "Национальной энергетической программы Украины до 2010г." и их возможные последствия для украинской экономики. – Деловая Украина. – № 6(360). – 26 января 1996г.
 20. Банников Ю.А., Абубекеров Р.А., Счастливый Г.Г., Домашев Е.Д. Программа "Частная энергетика Украины". Проблемы и возможности. Сб.: Инвестиционные проекты в электроэнергетике Украины. – Киев. – 1997. – С. 18-41.
 21. Герлига В.А., Киров В.С., Домашев Е.Д. О перспективах тепловой энергетики Украины. Сб.: Стабилизационный потенциал использования угля в электроэнергетике Украины. – Киев. – 1997. – Ч. II. – С. 4-11.
 22. Недин И.В. Спасет ли уголь Украину. – Деловая Украина, 4 марта 1998г.
 23. Карелин А.И. Проблемы и перспективы развития ядерной энергетики. – Радиохимия. – Т. 38. – Вып. 4. – С. 289-299.
 24. Карелин А.И. На основе достижений науки и техники. – Деловая Украина. – № 98 (350). – декабрь 1995г.
 25. Промышленная АЭС Superphoenix-1//Реакторы на быстрых нейтронах за рубежом. М.: ГК ИАЭ, 1985. – Вып. 8. – С. 41-48.
 26. Гладков Г.А.//Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. – № 4. – С. 319-321.
 27. Инвестиционный проект "ПАТЭС в Приморье". – ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Санкт-Петербург. – 1994. – Т. 1, 2. – 109 с.
 28. Петров Э.Л., Хазов Б.С. Подземное пространство для атомных станций// Проблемы радиационной безопасности. Тр. ГНЦ РФ ЦНИИ им. А.Н.Крылова, 1993.
 29. Петров Э.Л., Хазов Б.С. О региональной энергетической стратегии// Тр. III съезда Санкт-Петербургского Союза научных инженерных обществ. – Санкт-Петербург. – 1995.
 30. Proceedings of Int. Symp. on Unterirdische Bauweise von Kernkraftwerken. Hannover, 16-20 March, 1981
 31. Gruner W. Underground siting of nuclear power plants. Review of the state of the art. Paper prepared for IAEA. Desember, 1990. – P. 32-40.
 32. S.Hibino, H.Komada, H. ITO Feasibility Assessment of the Underground Nuclear Power Plant, Int. Conf. on Design and Safety of Advansed Nuclear Power Plants. October 1992, V. 3, r.14-3.
 33. M.Hayano, T.Okawa. Conceptual Study on Deep-Underground Energy Generation Base, Int. Conf. on Design and Safety of Advansed Nuclear Power Plants. October 1992. – r. P6. 4-1.
 34. Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А. Подземные атомные станции. – Апатиты, 1992. – 140 с.
 35. Новиков В.М., Игнатъев В.В., Федулов В.И. Жидкосольевые ЯЭУ: Перспективы и проблемы. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 190 с.
 36. Novikov V.M. Atomkernenergie/Kerntechnik. – 1985. – Vol. 45. – N 1. – P. 45-49.
 37. Novikov V.M., Ignatjev V.V. Proc. ICENES-89. Karlsruhe, July 3-6. – 1990. – P. 35-39.
 38. Gat U. Proc. ICENES-4. Madrid: World Sci. Publ. Co., 1987. – P. 287-290.
 39. Furucava K. Atomkernenergie/Kerntechnik. – 1984. – Vol. 44. – N 1. – P. 42-44.
 40. Furucava K. Atomkernenergie/Kerntechnik. – 1984. – Vol. 44. – N 1. P. 235-243.
 41. Brann I.H., Lecood A. Proc. Int. Conf. Ways out of the Arm Rase (Nov. 14-16, 1986). Hamburg: RFA, 1987. – P. 11-21.
 42. Taube M. Fast and Thermal Molten-Salt Reactor Meeting. – P. 490-498.
 43. Блинкин В.Л., Новиков В.М. Жидкосольевые ядерные реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1978. – 212 с.
 44. Алексеев и др. Жидкосольевая технология в решении проблем ядерной энергетики. Препринт ИАЭ N 5905. – М. – 1995.
 45. Carminati F., Klapisch R., Revol J. P. et al. CERN/AT/ 93-47 (ET). – Nov. 1. – 1993.
 46. Rubbia C. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Gattinburg, Tennessee, USA, May 9-13, 1994.
 47. Домашев Е.Д. Проблемы теплообмена при кипении в ядерных энергетических установках// Промтеплотехника. – 1997. – № 4-5. – С. 151-158.

Получено 21.05.98 г.