

УДК 621.039.5

КАРЕЛИН А.И.¹, ДОМАШЕВ Е.Д.², АБУБЕКЕРОВ Р.А.³¹ НТЦ "Новые технологии" Радиового института им. В.Г. Хлопина, г. Санкт-Петербург² Ин-т технической теплофизики НАН Украины³ Транснациональная промышленно-финансовая корпорация АО "Концерн "Энергия"

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА НА ПОРОГЕ XXI ВЕКА

Приведена коротка історія становлення атомної енергетики та висвітлені основні недоліки її розвитку. Криза в атомній енергетиці пов'язується з проблемами використання та захоронення радіоактивних відходів уран-плутонієвого паливного циклу. Як альтернатива розвитку атомної енергетики пропонується та обґрунтовується уран(233)-торієвий паливний цикл.

Приведена краткая история становления атомной энергетики и вскрыты основные проблемы ее развития. Кризис в атомной энергетике связывается с проблемами использования и захоронения радиоактивных отходов уран-плутониевого топливного цикла. В качестве альтернативы развития атомной энергетики предлагается и обосновывается уран(233)-ториевый топливный цикл.

The short history of the nuclear energetic becoming is presented, and main problems of its development are revealed. The crisis, in nuclear energetic is connected with the problem of utilization and burial of radioactive waste produced in the uranium-plutonium fuel cycle. The uranium (233)-thorium fuel cycle is proposed and grounded alternative of development of nuclear energetic.

Прошло почти 60 лет со дня открытия немецкими учеными Ганом и Штрассманом явления деления нейтронами ядра урана, которое позволило открыто заговорить о реальной практической возможности использования Человеком нового вида энергии - ядерной энергии.

Мировое сообщество предприняло колоссальные усилия и затратило огромные финансовые средства на разработку и создание, в первую очередь, ядерного оружия, а затем и ядерной энергетики. В середине 90-х годов был отмечен сорокалетний юбилей промышленного использования ядерной энергии. К 1997 году в 31 стране насчитывалось более 440 действующих атомных электростанций. Доля ядерной энергетики в мире возросла примерно до 17 %, и годовое производство составляет порядка 2 200 ТВт·час. Доля ядерной энергии в производстве электричества (по состоянию на январь 1997 года) в различных странах неодинакова. Так, ядерной электроэнергии вырабатывается: в Литве - 83,4 %, Франции - 77,4 %, Бельгии - 57,2 %, Швеции - 52,4 %, Швейцарии - 44,5 %, Украине - 43,8 %, Германии - 30,3 %, США - 21,9 %, России - 13,1 %. Международное агентство по атомной энергии - межправительственный орган в качестве глобальной организации "мирного атома" (127 государств - членов МАГАТЭ) - отметило в 1997 году свой сорокалетний юбилей.

Казалось бы, все прекрасно - сбываются надежды 50-х годов о бурном развитии ядерной энергетики. Однако, ряд крупных аварий на атомных станциях - Уиндскейл, Тримайл-Айленд и особенно трагическая катастрофа на Чернобыльской АЭС - повергли международное сообщество в шок. Истекшее десятилетие

явилось серьезным испытанием "на прочность" в развитии ядерной энергетики. В ряде стран прислушались к поэтапному отказу от ядерно-энергетических программ, в других странах строительство и планирование АЭС было приостановлено, а в третьих - отложено на неопределенное время. К середине 90-х годов будущее ядерной энергетики выглядело довольно туманным. По данным МАГАТЭ с 1986 года в эксплуатацию ежегодно вводилось в мире около пяти атомных электростанций - всего 47 АЭС за весь указанный период. Стало ясно, что обеспечение устойчивого развития ядерной энергетики не может быть быстрым, легким и дешевым. Возникла необходимость повышения "культуры безопасности" во всем ядерном топливном цикле. Для того, чтобы снова вернуть утраченное во многих странах доверие общественности в безопасности развития ядерной энергетики, потребуется время и немалые финансовые затраты.

Уроки Чернобыля заставили мировое сообщество в срочном порядке разработать и осуществить мероприятия, обеспечивающие безопасность работы существующих АЭС. Почти на всех АЭС мира, в том числе и так называемого "чернобыльского" типа, степень безопасности повышена на несколько порядков и является достаточной для обеспечения безаварийной работы действующих АЭС. Доверие общественности к безопасному развитию ядерной энергетики, по-видимому можно снова вернуть - появился свет в конце туннеля.

К сожалению, нашлись люди, специалисты и ученые (как правило, далекие от ядерной тематики), которые стали активно нагнетать радиофобию, поднимать различные вопросы, проводить исследования

(зачастую малодостоверные), конференции о воздействии на человека малых доз радиоактивности.

Что такое малая доза радиоактивности и каково ее влияние на человека?

Человек уже живет несколько тысячелетий при воздействии на него определенных доз радиации. В природе имеется достаточно большое количество (не считая тяжелых делящихся элементов) естественных радиоактивных изотопов α -активных и жестких β - и γ -излучателей. Это K^{40} , Rb^{87} , In^{115} , Te^{123} , La^{138} , Nd^{144} , Sm^{147} , Sm^{148} , Gd^{152} , Lu^{176} , Hf^{174} , Ta^{180} , Os^{186} .

Например, калий-40, содержание которого в природном калии составляет 0,0118 %, имеет период полураспада $1,28 \cdot 10^9$ лет, β -излучатель с энергией 1,314 Мэв, γ -излучатель 1,4608 Мэв. Содержание природного калия в разведанной части земной коры равно 2,6 % (по А.П. Виноградову), содержание в морской воде – в среднем 0,038. Ежегодно производится в мире ~ 30 млн. т калийных удобрений (в пересчете на K_2O), которые вносятся в почву. Нетрудно подсчитать, какое количество радиоактивного калия-40 воздействует на человека. Следует отметить, что определенная радиоактивность свойственна самому человеческому организму. Действительно, тело человека содержит около 0,003 г калия-40 и $6 \cdot 10^{-9}$ г радия. Только эти два вида естественно-радиоактивных атомов ежесекундно дают в человеке около 6 тыс. β -распадов и 220 α -распадов.

Кроме того, установлено, что при добыче практически всех руд, сланцев и угля, в сферу деятельности человека вносятся большие количества радиоактивных элементов. Хорошо известно, что при сжигании угля или сланцев с ТЭЦ сбрасывается радиоактивных загрязнений во много раз больше, чем с АЭС равной по мощности.

Человек живет не под защитным колпаком, в его тело постоянно проникают космические лучи, часть которых вызывает образование искусственных радиоэлементов. Из последних, около 2500 β -распадов в секунду дает только один радиоуглерод (содержание которого оценивается в $1:10^{12}$ по отношению к обычному). Таким образом, общее число ежесекундно распадающихся в теле человека радиоактивных атомов составляет не менее 10 тысяч. Человек – сложная биологическая система в природе, и если исключить воздействие на него "малых доз радиоактивности", он не сможет существовать.

В глобальном масштабе, ядерная индустрия середины 90-х годов приблизилась к совокупному сроку эксплуатации всех атомных электростанций, вместе взятых, к восьми тысячам лет! При этом, случаев долгосрочных последствий радиационного облучения у работающего персонала и населения, проживающего вблизи атомных электростанций, не было отмечено, о чем было официально объявлено на экологических саммитах, прошедших в Рио-де-Жанейро (1992 г.) и Нью-Йорке (1997 г.).

Сегодня мы стоим на пороге нового века и нового тысячелетия и не можем не задаваться вопро-

сами: по какому пути пойдет мировое сообщество при производстве энергии, какими будут последующие этапы ядерной энергетики и насколько безопасной и эффективной она будет?

Согласно данным Мирового энергетического совета в ближайшие 25 лет ожидается рост спроса на энергию на 50÷75 % [1]. Политические и экономические изменения последнего десятилетия существенно влияют на направления и философию развития энергетического рынка в мире. Потребление электричества и экономический рост неразрывно связаны друг с другом даже тогда, когда меры по экономии энергии и повышению эффективности ее использования приводят к сдерживанию общих темпов роста энергопроизводства.

Любой такой рост будет тесно связан с объемами сжигания ископаемых видов топлива. Эти энергоносители по-прежнему обеспечивают производство более 80 % всей необходимой коммерческой энергии. При сжигании ископаемого топлива для производства электричества в атмосферу выбрасываются двуокись углерода, другие парниковые газы, а также радиоактивные элементы, особенно при сжигании угля и сланцев.

2500 международных экспертов, принимавших участие в работе Межправительственной группы по климатическим изменениям (МГКИ), опубликовали отчет с осторожным, но недвусмысленным предупреждением: "Если технологии производства энергии останутся без изменений (выбросы CO_2 составляют порядка 23 млрд. т ежегодно, а его содержание в атмосфере превышает 360 частей на миллион, что примерно на 20 % выше, чем сто лет назад), а спрос на нее существенно возрастет, то средняя температура воздуха на нашей планете может повыситься в течение следующего столетия на $1,0 \div 3,5$ °С, произойдет глобальное потепление. Это, в свою очередь, приведет к повышению уровня мирового океана на 50 см и, соответственно, к затоплению прибрежных низин и тропических островов, возрастанию экстремальных погодных явлений и губительному воздействию на леса и сельскохозяйственные угодья." Точка зрения МГКИ некоторыми специалистами оспаривается, но она не меняется. Проблема заключается не только в парниковом эффекте, а и в необходимости изоляции изотопа C^{14} [2, 3]. Нельзя забывать, что время полураспада C^{14} составляет 6000 лет, а коэффициент накопления C^{14} по сравнению с его концентрацией в среде равен нескольким тысячам. Кроме того, углерод является основным строительным материалом живых организмов, в том числе и генетического материала, и радиационный эффект от распада C^{14} превосходит воздействие и стронция, и цезия [4]. Вот что ожидает будущие поколения при увеличении использования органических топлив!

Только 15÷20 % всей энергии приходится на не образующие двуокись углерода АЭС и ГЭС – основные альтернативные источники энергии. Солнечная энергия и другие возобновляемые источники

дают сегодня лишь около 1 % общемирового объема энергопроизводства.

Глава Международного энергетического агентства Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) отметил в своем выступлении в ООН, что именно благодаря ядерной энергии удалось больше всего снизить степень интенсивности поступления углерода в атмосферу с выбросами энергетических предприятий стран ОЭСР за последние 25 лет.

Какова позиция МАГАТЭ на развитие ядерной энергетики в XXI веке?

Она изложена в вышедшей в свет в сентябре 1997 года "Истории Международного агентства по атомной энергии. Первые сорок лет" [5]. Ее автор Давид Фишер пишет, что дальнейшее развитие ядерной энергетики и осуществление связанных с ней программ Агентства будет зависеть от ряда факторов, к числу ключевых он относит – шесть. Не имея возможности подробно обсудить указанные факторы, выражая с ними общее согласие, остановимся подробнее на одном из них, на наш взгляд - спорном. Вот как он сформулирован дословно: "Убеждение общественности в том, что радиоактивные отходы могут быть надежно удалены и не представлять никакой опасности для здоровья будущих поколений. Соответствующие технологии уже разработаны, и теперь требуется лишь доверие общественности". К сожалению, это красивый лозунг и неосуществимая мечта. Противники развития ядерной энергетики обвиняют ядерщиков в том, что они пошли на промышленное производство без отработки одного из главных вопросов: обращение с образующимися в уран-плутониевом цикле радиоактивными отходами. Более сорока лет идет обсуждение этой проблемы на различных международных симпозиумах, конференциях и семинарах, но накопление долгоживущих (с периодом полураспада 10^3 - 10^6 лет и более) радиоактивных элементов продолжается.

По данным МАГАТЭ в 1985 году суммарное инвентарное количество отработавшего топлива в мире составляло около 30 тыс. т тяжелых металлов. Согласно оценочным данным, на рубеже веков этот показатель увеличится в шесть раз и в грядущем столетии будет неуклонно возрастать даже при достигнутом 17 % уровне ядерной энергетики.

К 1990 году в мире накоплено 902 т плутония, в том числе 248 т оружейного плутония, 122 т энергетического плутония выделенного и 532 т невыделенного из отработавшего ядерного топлива. По нашим оценкам, опубликованным в 1996 году [6], при мировой мощности ядерной энергетики в 400 ГВт в период с 1990 по 2050 годы произойдет дальнейшее накопление высокофонового энергетического плутония и трансплутониевых элементов в количествах:

– высокофоновый плутоний-239,240,241,242	4800 т
– америций-241,243	85,2 т
– кюрий-242,244	23,4 т
– нептуний-237	270 т

И эти устрашающие данные не противоречат опубликованным в Бюллетене МАГАТЭ [7].

Все ссылки на необходимость расширения перерабатывающих мощностей для последующей рециркуляции, т.е. повторного использования плутония, и задержки с вводом в коммерческую эксплуатацию быстрых реакторов-размножителей, способных его сжигать, малоубедительны и только усиливают обеспокоенность общественности.

На наш взгляд дело не в частностях, а в принципах. Уран-плутониевый топливный цикл был разработан и осуществлен, в первую очередь, для военных целей. Казалось, что использование уран-плутониевого топливного цикла при развитии ядерной энергетики пойдет гладко, без особых затрат и затруднений. Однако к настоящему времени ни в одной стране мира практически до конца не осуществлено полное замыкание уран-плутониевого топливного цикла в ядерной энергетике. При глубоком и детальном рассмотрении вопроса становится ясно, что уран-плутониевый топливный цикл экологически, экономически и технически не замыкается ни по плутонию, ни по трансплутониевым элементам, ни по урану.

Захоронение и длительное хранение (отработавшего ядерного топлива или долгоживущих продуктов его радиохимической переработки) в специально оборудованных подземных хранилищах (в течение миллионов лет) не может вызвать доверия у общественности к такому методу обращения с радиоактивными отходами, а следовательно и в целом к развитию ядерной энергетики.

Если сама Природа не справляется с "переработкой" все возрастающих количеств двуокси углерода и других парниковых газов при сжигании ископаемого топлива или полученными искусственно долгоживущими радиоактивными элементами (а не только относительно короткоживущими продуктами деления ядра) в уран-плутониевом топливном цикле, такие способы производства энергии будут все больше и больше вызывать обеспокоенность общественности в перспективах своего развития.

Каков же выход из надвигающегося кризиса в общей энергетике и, в частности, в ядерной?

Более 199 атомных электростанций из 440 действующих приближаются к предельному сроку своей эксплуатации, составляющему около 40 лет. Другая часть АЭС находится в процессе переоборудования и модернизации с целью продления срока их эксплуатации примерно на 20 лет. И только в некоторых странах были введены в последнее время в строй ядерные реакторы следующего поколения, которые имеют повышенную надежность, экономичность и обеспечивают большую безопасность.

В 1996 году по оценочным данным МАГАТЭ ежегодные инвестиции в исследования и разработки различных типов усовершенствованных ядерных реакторов возросли до 2 млрд. долл. США. Наибольшее внимание в этой области уделяется

"эволюционным" конструкциям, использующим лучшие характеристики действующих реакторов, к которым добавляются новые.

На наш взгляд, ставка международных рабочих групп и экспертов МАГАТЭ только на разработку конструкций усовершенствованных реакторов с уран-плутониевым топливным циклом явно недостаточна.

С целью решения проблемы обращения с отработавшим топливом следует развивать альтернативные направления получения энергии при делении тяжелых ядер элементов.

Поставленную задачу можно решить на основе давно известного уран(233)-ториевого топливного цикла, внося в его осуществление существенно новые подходы. Такой альтернативой в развитии ядерной энергетики на базе традиционных твердотопливных ядерных реакторов является концепция жидкосольевых реакторов (ЖСР), которая строится на использовании ядерного топлива в расплавах фторидных солей.

Преимущества получения ядерной энергии в каскадном жидкосольевом реакторе с использованием уран(233)-ториевого топливного цикла в, так называемом, "доминирующем режиме распада" с подземным размещением АЭС подробно рассмотрены в [6].

Расчетами было показано, что при нейтронном потоке 10^{13} н/см²·с в топливной соли активной зоны ядерного реактора практически не происходит накопления ядер актиноидов с массовым числом более 235.

Следовательно, при таком режиме работы нет оснований для опасений по накоплению тяжелых актиноидов (U-236, Np, Pu, Am, Cm), которые вызвали бы существенные затруднения при переработке топливной соли фторированием элементарным фтором и с последующим их обращением. И это главное. Кардинально решается проблема обращения с радиоактивными отходами, т.к. они представляют только коротко- и относительно короткоживущие радиоактивные элементы распада тяжелых ядер.

В Окридже была разработана, создана и эксплуатировалась в течение 4-х лет демонстрационная установка с ЖСР мощностью 8 МВт. В СССР в Курчатовском институте были созданы опытные стенды, на которых производились исследования режимов работы ЖСР, изучались вопросы коррозионного воздействия на оборудование, радиационной и нейтронной устойчивости топливных фторидных расплавов и др. [8].

В результате проделанных работ была подтверждена практическая возможность создания АЭС с использованием ядерных жидкосольевых реакторов на основе расплавов фторидных топливных солей.

Однако политические причины и лоббистские действия в пользу уран-плутониевого топливного цикла привели к длительной задержке в разработке и развитии этого перспективного направления в получении энергии делением тяжелых ядер.

Несмотря на практически полное прекращение финансирования разработок по созданию гомогенных жидкосольевых ядерных реакторов, исследования по изучению топливных расплавов фторидных солей продолжают, в основном, на инициативной основе [9].

Топливные расплавы фторидных солей (LiF-BeF₂-UF₄-ThF₄), разработанные в Окридже, обладают рядом преимуществ:

- низкая температура плавления (~500°C), низкая вязкость, высокая теплопроводность;
- низкая упругость паров;
- в расплаве хорошо растворяется фторидное топливо (UF₄, ThF₄) и нелетучие фториды продуктов деления (без выпадения осадков солей);
- хорошее замедление и низкое поглощение нейтронов;
- стойкость в радиационных и нейтронных полях высокого уровня;
- легко отделяются готовые продукты деления (J, C, T, Kr, Xe, Ru, Rh, Pd, Te);
- легко извлекаются при регенерации расплава элементарным фтором протактиний и уран для использования в собственном рецикле;
- отработавшая топливная соль с продуктами деления SrF₂, CsF, (PЗМ)F₃ и частью ThF₄, после извлечения прямым фторированием Pa и U, не требует дополнительной переработки, а является основой фторидных стекол при их хранении.

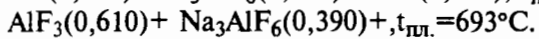
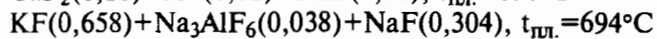
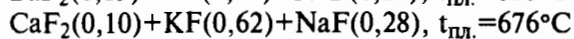
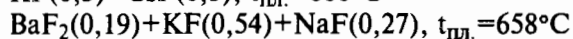
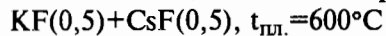
К сожалению, использование в ядерных энергетических установках топливных композиций указанного состава имеет ряд недостатков, существенно затрудняющих их использование в промышленных условиях. К ним относятся:

- дороговизна из-за необходимости использования только фторида лития-7. Требуется создание и эксплуатация дорогих мощностей по разделению изотопов природного лития (Li⁶+Li⁷);
- даже при высоком обогащении по Li⁷ (≥90 %), остающееся количество Li⁶ приводит к повышенному образованию трития в реакторе, что недопустимо;
- использование в топливной композиции фторида бериллия резко усложняет экологическую обстановку всего топливного цикла, т.к. бериллий является исключительно токсичным материалом. Нормы по содержанию бериллия и его соединений в воздухе рабочей зоны и в сбросном воздухе жестче в 130 раз, чем для урана, а предельно допустимые концентрации соединений бериллия (в пересчете на Be⁺²) в воде водоемов жестче в 3000 раз, чем для соединений урана.

Необходим широкий комплекс исследований по созданию топливных композиций и теплоносителей на основе расплавов фторидов легких и тяжелых элементов для ядерных энергетических установок, которые бы обладали указанными преимуществами, но были свободны от приведенных недостатков. Эта очень сложная задача требует проведения фундамен-

тальных исследований физико-химических свойств и строения различных расплавов фторидных солей.

В частности, к изучению рекомендованы топливные композиции на основе фторидов:



Представляют интерес эвтектики на основе фторидов олова, цинка и их комплексных солей $\text{M}_x\text{Sn}(\text{Zn})\text{F}_y$. Указанные фундаментальные исследования по изучению физико-химических свойств и строения топливных композиций на основе расплавов фторидных солей и подбору оптимальных по составу эвтектик для ядерных энергетических установок требуют широкой кооперации, координации, современного приборного, людского обеспечения и постоянного финансирования.

Мы предлагаем вернуться на новой основе к разработке гомогенных жидкосолевых ядерных реакторов с использованием уран(233)-ториевого топливного цикла "в режиме доминирующего распада" и подземным размещением АЭС нового типа [6, 10, 11, 12].

Для этого необходимо под эгидой МАГАТЭ разработать Международную программу, объединить оставшихся ученых для решения указанным способом проблемы по выходу из кризиса в развитии ядерной энергетики. Украина, создающая свою атомную промышленность, могла бы сыграть ведущую роль в разработке и освоении новой, гарантированно безопасной атомной энергетики.

Литература

1. XV Конгресс Мирового энергетического совета (МИРЭС). – Теплоэнергетика. – 1993. – №6. – С.2-7.

2. Рублевский В.П., Голенецкий С.П., Курдин Г.С. Радиоактивный углерод в биосфере. – М.: Атомиздат, 1979. – 152 с.
3. 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.
4. Bolin B., Degens E.T., Kempe S., Kerner P. (eds.) The global carbon cycle. – N-Y.: John Wiley., 1979. – 546 p.
5. Фишер Д. "История Международного агентства по атомной энергии. Первые сорок лет", Вена, 1997, 550 с.
6. Карелин А.И. Проблемы и перспективы развития ядерной энергетики". – СПб. – Радиохимия. – 1996. – Т. 38. – с. 289-299.
7. Ведекинд Л.Х. Энергетика и экология. Безопасность человека и среды как условие развития". – II Бюллетень МАГАТЭ. – 1997. – Т. 39. – №3. – С. 26-36.
8. Новиков В.М., Игнатъев В.В., Федулов В.И. Жидкосолевые ЯЭУ: Перспективы и проблемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Карелин А.И. Низкотемпературные фторидные расплавы для ядерных энергетических установок. – М. – Тезисы докладов. – X Симпозиум по химии неорганических фторидов. – 1998. – с. 71.
10. Петров Э.Л., Хазов Б.С. Подземное пространство для атомных станций//Проблемы радиационной безопасности. Тр. ГНЦ РФ ЦНИИ им. А.Н. Крылова, 1993.
11. Абубекеров Р.А. Новый взгляд на стратегию производства электроэнергии в Украине. – Деловая Украина. – № 72(324). – 13 сентября 1995г.
12. Домашев Е.Д. О возможности развития атомной энергетики в Украине. //Пром. теплотехника. – 1998. – №3. – С. 42-49.

Получено 13.08.98 г.