



# ПЕРСПЕКТИВЫ ТОРИЕВОГО ЦИКЛА

МФПУ "Синергия":

**Андрей Иванович Касьян**, доцент, к.т.н.

**Равгат Явдатович Хамидуллин**, доцент, к.т.н.

**Авария на японской АЭС стимулировала исследования в области более безопасной ядерной энергетики. Вообще, каждый способ производства и преобразования энергии оказывает влияние на окружающую среду и несет определенные риски. Ядерная энергетика не является исключением. На практике существует два ядерных топливных цикла: урановый (уран-плутониевый) и ториевый (уран-ториевый). На заре атомной эры ториевая энергетика не выдержала конкуренции с урановой, поскольку не позволяла получать плутоний, используемый в ядерном оружии. Но, может быть, теперь настало время для реванша? Современная ядерная энергетика оказалась заложницей гигантских государственных вложений в первое направление, что и позволило ей сравнительно быстро появиться на свет и развиваться. Возникает естественный вопрос: могут ли ее структуры эволюционировать дальше в условиях сложных конкурентных рыночных отношений без новых огромных вложений?**

Во время кризисных явлений следует отталкиваться, прежде всего, от экономической составляющей, особое внимание обращая на системообразующую проблему энергетической безопасности России. В январе 2012 г. на заседании Совбеза президент Дмитрий Медведев поручил правительству разработать Доктрину энергетической безопасности. В прошлом году была одобрена Энергетическая стратегия до 2030 года (ЭС-2030). Ясно, что энергобезопасность - одна из ключевых гарантий суверенного развития нашей страны, прямо влияющая на решение социально-экономических задач, конкурентоспособность России на глобальных рынках и рост её международного авторитета.

Применительно к экономике России можно прямо назвать наиболее вероятные серьезные угрозы в средне- и долгосрочной перспективе: неопределенность запасов важнейшего углеводородного сырья и, прежде всего, запасов нефти и природного газа, а также нерациональное использование этих запасов, чему в небольшой степени способствуют высокие цены, неумещающийся экспорт. Следует отметить высокую энергоёмкость нашего валового внутреннего продукта, низкие темпы роста энергосбережения и многое другое.

Ни у кого не вызывает сомнения, что проблемы, стоящие перед топливно-энергетическим комплексом, тесно связаны с атомной энергетикой. В некоторых странах мира (Франция, Бельгия) ядерный сектор вносит существенный вклад в энергетический баланс. Причина продуктивной работы атомных электростанций (АЭС) на конкурентном рынке кроется в низких издержках. Если, например, ориентироваться на среднюю рыночную цену 1 кг ядерного топлива, то при средней глубине выгорания 45 МВт сут/кг этого количества топлива хватит на производство 360 МВт ч электроэнергии стоимостью 0,04 евроцента за 1 кВт ч. [Глубина выгорания топлива определяется как отношение выработанной энергии (МВт) за определенное время (сут) к начальной загрузке (кг) всех тяжелых ядер.] Рыночная стоимость энергии, выработанной АЭС, различается в зависимости от типа станции, государственной политики, месторасположения и т.д.

Важно отметить, что ядерная энергетика включается в "стандарт "чистой" энергетики", решающей серьезные экологические

проблемы [1]. У нас развитие неуглеродной энергетики - атомной, гидроэнергетики, ветровой, солнечной - является одной из важных стратегических инициатив ЭС-2030. В специально созданной при Президенте РФ комиссии по модернизации экономики основными (приоритетными) направлениями объявлены повышение энергоэффективности, ядерные технологии, суперкомпьютеры, космические технологии и др. Следует отметить, что в реализации федеральной программы по инновационным ядерным технологиям роль науки должна быть определяющей. Президент РФ поставил перед учеными и инженерами три конкретные задачи: существенно оптимизировать эксплуатационные характеристики водо-водяных реакторов типа ВВЭР, сформировать новую технологическую базу атомной энергетики на основе замкнутого топливного цикла с реакторными установками на быстрых нейтронах и выйти, в долгосрочной перспективе, на управляемый термоядерный синтез.

И ещё: реальное положение в энергетике таково, что её основой сегодня, к сожалению, является углеводородное топливо. Это в известной мере определяет экономику и политику. Но переработка углеводородов в топливо (в итоге - сжигание), и нецелесообразна, и может привести к серьезным социальным и экологическим последствиям даже в масштабах планеты, т.к. имеет дело с невозобновляемым источником, сопровождается парниковым эффектом и т.д. (Правда, относительно нефти, существует так называемая абиотическая теория её происхождения, основанная на идеях русского ученого Николая Кудрявцева. Их суть заключается в том, что на планете Земля существуют углеводороды абсолютно неорганической природы, которые из глубин поднимаются вверх по сети изломов и трещин в породе и т.д. Эта гипотеза принимается лишь ограниченным числом ученых). Дефицит углеводородов (в первую очередь нефти) по пессимистическим прогнозам станет весьма ощутимым уже к 2030 г. По некоторым сценариям в ближайшие 10-20 лет нефти в мире просто не будет хватать, и цены на неё вырастут во много раз, но нам уже возможно нечего будет продавать, и более того, самим придётся покупать нефть...

В наступившем десятилетии, тем не менее, углеводородная энергетика будет оставаться, несомненно, преобладающей, хотя многие государства понимают, что дальнейшая нещадная эксплу-

атация недр - тупиковый путь, и необходимо развивать альтернативные источники энергии, в том числе, ядерные. После того, как страхи о масштабных последствиях аварии АЭС в Японии улеглись, многие заявили о намерении присоединиться к мировому атомному энергетическому клубу. К 2030-2040 годам примерно три десятка стран собираются ввести в действие до 40 атомных реакторов суммарной мощностью приблизительно 1000 ГВт. Многие из них будут построены по российским технологиям, которые во всем мире признаны передовыми. Россия готова (вместе с МАГАТЭ) заниматься вопросами обеспечения их безопасности и т.п. Международное энергетическое агентство прогнозирует, что доля атомной энергетики в общемировой выработке электроэнергии вырастет до 2035 г. на 70 %. В настоящее время в России эксплуатируется 32 ядерных энергоблока. По итогам прошлого года выработано рекордное количество электричества - 172,4 млрд кВт·ч. Атомная отрасль - одна из передовых у нас. Она включает в себя и добычу урановой руды, и производство ядерного горючего, и эксплуатацию АЭС и многое другое. В настоящее время создаются реакторы нового поколения. Правительство выделило более 100 млрд рублей на программы научных исследований в атомной отрасли и т.д. В отрасли планируется до 2020 г. ввести около 32 ГВт генерирующих мощностей, в результате чего установленная мощность АЭС России должна превысить 53 ГВт. По оценкам специалистов, выполнение программы позволит к 2020 г. увеличить долю производства электроэнергии на АЭС до 20...30 % в целом по стране и до 30...40 % в европейской части России. На международной арене государственная корпорация "Росатом" нарастила почти вдвое количество контрактов на строительство энергоблоков. Кроме энергореакторов, российские атомщики открыли Китаю дверь в клуб владельцев технологии быстрых реакторов, введя в строй экспериментальный реактор на быстрых нейтронах CEFR. Процессы, происходящие в отрасли, достойны рассмотрения, но - это тема другой статьи. Особое внимание мы уделим проблеме "чистой" и "безопасной" энергии.

Ядерный топливный цикл - это совокупность всех технологических операций по добыче руды, изготовлению топлива, использованию топлива в реакторах, переработке отработанного топлива (ОЯТ), обращению с радиоактивными отходами (РАО). Различают два вида топливного цикла: открытый и закрытый (замкнутый). В открытом цикле отработанное топливо считается радиоактивными отходами и вместе с остальными отходами исключается из дальнейшего использования. В закрытом, в отличие от открытого, осуществляется переработка ОЯТ. Поэтому открытый цикл характеризуется низкой эффективностью использования делящихся материалов (единицы процентов). Если быть более точным, то замкнутый урановый цикл подразделяется на цикл с регенерацией урана и с регенерацией урана и плутония. Последний предполагает развитие производства смешанного уран-плутониевого топлива. За прошедшие 30 лет проводилась частичная радиохимическая переработка отработанного ядерного топлива с флотских реакторов, реакторов ВВЭР-440 и некоторых других. Но, в целом, можно констатировать, что для российской ядерной энергетики характерен разомкнутый урановый топливный цикл. Переработка ОЯТ во много раз расширяет сырьевую базу отрасли.

Единственный альтернативный источник энергии определенно не органического происхождения, находящийся в земной коре, - это атомы некоторых элементов (урана, тория), которые сформировались задолго до появления Солнечной системы. Что касается урана, то почти 95 % мировой его добычи идет сегодня в производство электроэнергии. Разведанные запасы оцениваются в 6 млн т (и более 20 млн т в фосфатных месторождениях). К перспективным ресурсам относят уран, содержащийся в морской воде (40 млрд т). По распространенности уран можно сравнить с цинком. В земной коре его примерно 1,5 трлн т. Эти оценки расходятся, но более важен вопрос о способности добывающей промышленности удовлетворить потребности экономики. Самого урана по совокупной массе, более-менее доступного, на Земле хватит примерно на полстолетие. Если же построить замкнутый цикл (реализация которого свя-

зана с реакторами на быстрых нейтронах) - то может хватить на 10 000 лет.

В СССР и России за прошедший период добыто более полутора млн т природного урана. После распада СССР у нас осталось чуть больше одной трети урансодержащих руд. Россия в прошедшем году обеспечила себе объем добычи природного урана свыше 7 тыс. т, что на 35,7 % больше, чем в 2010 г. Но на территории самой России добывается меньше - 4 тыс. т. Конечно мы можем увеличить добычу у себя. Но "Росатом" поступил по-другому и осуществил скупку урановых месторождений за пределами евразийского континента. Самая известная сделка - покупка контроля над канадским добытчиком урана Uranium One, имеющим лицензии на добычу этого элемента во многих странах. В июне прошедшего года "Росатом" приобрел австралийскую Mantra Resources, флагманским проектом которой является освоение месторождения в Танзании. Более того, известно, что ряд ураносодержащих участков в Африке купили и несколько не связанных с "Росатомом" крупных российских компаний. Очевидно, что на фоне очередной "волны" нестабильности в мировой экономике "Росатом" постарается еще более увеличить свои запасы урана за пределами России. В российской корпорации считают, что это даст ей несомненное преимущество перед другими крупнейшими компаниями мира, прежде всего перед канадской Cameco и французской Areva. *"Крупнейшие мировые компании Cameco и Areva после 2024 года ждет спад производства из-за истощения крупнейших рудников "Макартур Ривер", "Сигар-Лэйк", "Акута". Остаточные запасы составят 38 % от первоначальных"*, - считает заместитель генерального директора АРМЗ Александр Бойцов. Наши фирмы стали крупнейшими мировыми поставщиками низкообогащенного урана, поставляя его не только в почти всю Юго-Восточную Азию и Европу, но и в США. (В скобках заметим, что примерно половина топлива на американских атомных электростанциях - это топливо из бывших советских ядерных боеприпасов). В итоге, наша страна сейчас вышла на второе место в мире по запасам урана. Причем мы получили в собственность почти 20 % запасов урана на территории США. Получается, что наши современные суммарные запасы превосходят миллион тонн (плюс несколько миллионов тонн с низким содержанием и трудно извлекаемые). Урановым топливом мы, по-видимому, обеспечили себя на многие годы. Если продолжить эту тему, то нельзя утверждать, что у нас проблема с ураном закрыта, т.к. кроме энергетики уран может потребоваться для транспортных реакторов, космических систем и т.д. К 2020 г. годовая потребность в природном уране у нас оценивается экспертами вплоть до уровня приблизительно в 30 тыс. т и даже больше. Ожидается, что истощение углеводородных источников и другие факторы к середине века в конечном итоге приведут не только к удорожанию энергии и т.п., но и к различным международным конфликтам. Современный урановый рынок сложен и во всем мире является ареной жестких конкурентных столкновений. С этой точки зрения хорошо, что Германия уходит отсюда. Но такие страны как, например, Индия, Китай, наоборот, стремятся на рынок, что стимулирует спрос на уран. Ки-



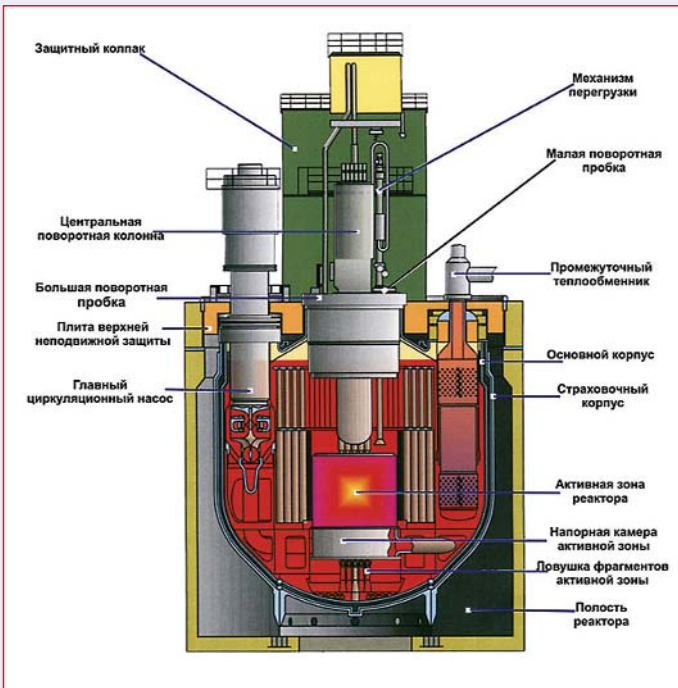


тай планирует четырехкратное увеличение потребления урана к 2020 г. Ему, по мнению экспертов, возможно, предстоит "сложная работа с будущим урановым картелем, созданным по типу ОПЕК на основе казахских и монгольских запасов и во главе с Россией". Особое место здесь занимает Казахстан, против которого начинается сложная политическая игра. Казахстан обладает прекрасными месторождениями (не только урана). На его долю приходится примерно третья часть поставок урана на глобальный рынок. Исторически так сложилось, что значительный объем урана обычно добывался в Казахстане, но перерабатывался в России. В плане обогащения урана Казахстан зависит от России, на долю которой приходится чуть меньше половины всех мировых мощностей по обогащению урана (завод по переработке в Казахстане сейчас строится). Западные эксперты полагают, что Россия и Казахстан стремятся вместе занять такое положение, которое позволит им доминировать на глобальном урановом рынке. Почему же "мировой страж порядка" не противодействует этим тенденциям? Америку, по-видимому, в первую очередь беспокоит вход в атомный клуб новых стран. Впрочем, предпринимаются меры для сдерживания Китая, России и Ирана, создается группировка, куда втягивают такие страны как Узбекистан и Таджикистан. Что же касается непосредственно Казахстана, то, здесь наблюдается странная корреляция "независимых" событий. В прошедшем году в г. Актобе произошел первый из серии терактов. Сразу после этого подписывается соглашение о воздушном транзите военных грузов в Афганистан. За несколько часов до встречи Назарбаева и Лукашенко в Астане взрывается смертник. После того как Президент Нурсултан Назарбаев заявил о стремлении развивать отношения с Россией, вступить в таможенный союз и т.д., террористы опять подняли головы и теракты продолжились. Западная пресса начала кампанию о религиозных притеснениях в Казахстане, о недемократических выборах, о несоблюдении прав и свобод и т.д. А недавно организована попытка дестабилизации в нефтедобывающем регионе Казахстана. Можно предположить, что Жанаозеном дело не ограничится... Обстановка не простая. По мысли западных борцов за демократию "народ Казахстана должен выступить против диктатуры...". Все это должно произойти по образу "демократических преобразований" в Ливии. Не надо думать, что России это не касается. В Казахстане проживает большой процент русскоязычного населения (около 3 млн). Сейчас наблюдается "вторая волна эмиграции" из Казахстана. Если там начнутся междоусобные войны, то и Китай и Россия наверняка будут отрезаны от энергоресурсов, у них появятся серьезные проблемы на границах. Результатом всех этих процессов может стать окончательное вытеснение из Центральной Азии всего русского: и населения, и языка, и культуры. Поэтому надо внимательно присмотреться кому все это выгодно. Что же касается ряда других стран, то мы видим, что они, без оглядки на Америку, стремятся проводить свою собственную политику, в том числе и по урану. Так, например, Иран желает самостоятельно проводить обогащение урана. Но западными средствами информации это преподносится, как разработка ядерного оружия. По этому поводу можно предположить, что если Иран все же де-факто вступит в атомный клуб, то обязательно за ним потянутся и другие. Это в итоге приведет к дальнейшему обострению.

Вернемся в Россию. Из сказанного ясно, что Россия имеет хорошие перспективы для того, чтобы стать ведущим игроком в коммерческой атомной отрасли в XXI веке. Исходным пунктом в этой истории является добыча руды и производство уранового концентрата. Еще во времена СССР для добычи и переработки урана вблизи разведанных месторождений были построены горнодобывающие и перерабатывающие предприятия. Добыча производилась и открытым способом (карьеры) и в рудниках. Все эти предприятия, к сожалению, оказывали неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Заметим, что любое предприятие, добывающее полезные ископаемые, оказывает негативные воздействия. (Так, например, в Канско-Ачинском угольном бассейне 6 тыс. га сельскохозяйственных угодий выведены из оборота). Основными источниками загрязнения являются карьеры и "хвостохранилища" (складированные отвалы переработанной руды и отходы). Лермонтовское ПО "Алмаз" и Новотроицкое рудоуправление осуществляли добычу и обогащение ториевых руд рассыпных месторождений. Здесь также обнаружено загрязнение почвы, подземных и поверхностных вод (причем торий "обгоняет" уран). Из семи крупных уранодобывающих комбинатов Союза в России остался сейчас только один - Приаргунский горно-химический комбинат, находящийся в Читинской области. Открытый (карьерный) метод в России сейчас не применяется, а месторождения разрабатываются шахтным методом (глубина порядка километра). В настоящее время разработаны новые, более совершенные экологически эффективные технологии и операции. Разрабатываются схемы обогащения руды, когда процесс осуществляется на глубине до подъема горной массы на поверхность. Разработаны такие технологии как, например, автоклавное выщелачивание руды в крупных закрытых резервуарах с нагревом, что приводит к превращению серы сульфидов в серную кислоту и т.д. В "Росатоме" не скрывают, что концентрация урана в российских месторождениях крайне низка (порядка 0,3 % и даже ниже, тогда как, например, в Канаде 3...4 %.) а многие месторождения "трудно извлекаемые", однако потребность в сырье не исключает их разработку. На внешних запасах урана "Росатом", видимо, будет держаться до той поры, пока себестоимость их добычи будет ниже российских.

Обогащением урана у нас занимаются четыре предприятия (Ангарский электролизный химический комбинат, ПО "Электрохимический завод", Уральский электрохимический комбинат, Сибирский химический комбинат) которые объединены в компанию "ТВЭЛ" госкорпорации "Росатом". Надо отметить, что в рамках компании консолидированы мощности всего топливного цикла - от обогащения урана до производства ядерного топлива. Предприятия расположены по всей стране: от Санкт-Петербурга до Ангарска, на них занято около 40 тыс. человек. Обогащение осуществляется в газовых центрифугах, где газ (гексафторид урана) раскручивается с огромной скоростью - 1500 оборотов в секунду. При этом более тяжелый изотоп (уран-238) "отжимается" к стенке, тогда как более легкий (уран-235) остается у оси вращения. Таким образом, удается разделить изотопы. Если соединить десятки тысяч центрифуг, то можно добиться высокой производительности.





В итоге мы приходим к тому, что для "заправки" реакторов атомных электростанций используется уран, но не простой, а обогащенный (несколько процентов). Без обогащения уран можно использовать в реакторах на тяжелой воде. В ядерном реакторе протекает управляемая цепная ядерная реакция, сопровождающаяся выделением энергии. А что представляют собой атомные электростанции? По сути - это тепловые электростанции. Выделяемая ядерная энергия (другими словами, тепло) преобразуется в электрическую. Кардинальным отличием от тепловых электростанций, работающих на органическом топливе, является то обстоятельство, что АЭС работает на ядерном горючем (в основном, U-235, Pu-239, но не исключено и применение U-233). При делении 1 г изотопов урана или плутония высвобождается примерно 22 500 кВт ч, что эквивалентно энергии, содержащейся в 2800 кг условного топлива. Классификация АЭС такова (по типу реактора): 1) ВВЭР (PWR) - корпусные водо-водяные реакторы под давлением; 2) BWR (ABWR) - кипящие реакторы; 3) PHWR (CANDU) - реакторы на тяжелой воде; 4) GCR, AGR - газоохлаждаемые реакторы; 5) РБМК - реакторы большой мощности канальные; 6) БН (FBR) - реакторы на быстрых нейтронах; 7) НТР - высокотемпературные. Подавляющее большинство эксплуатируемых реакторов - это реакторы на тепловых нейтронах водо-водяного типа ВВЭР (PWR). Они используют обычную воду в качестве замедлителя и теплоносителя. До Чернобыльской катастрофы наши ученые говорили о том, что в атомной энергетике будут в основном работать реакторы двух классических типов (медленные). Один из них, ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор, а другой - РБМК - реактор большой мощности канальный (ЧАЭС). Далее, если в реакторе образуется новый делящийся материал, отличный от выгорающего, то реактор называется конвертором. Если вторичный нуклид совпадает с первичным, то реактор называется бридером.

Для того, чтобы поподробнее рассмотреть вопросы, связанные с безопасностью, рассмотрим как получается "атомная энергия". Еще раз отметим, что она концентрирована в необычайной степени. При самом экономном использовании угля один килограмм может дать только 7 кВт ч электроэнергии. Для газа в два раза больше. Но с одного килограмма уранового топлива можно получить до 360 МВт ч электроэнергии. Физика процесса основана на цепной реакции деления.

В цепной реакции, происходящей в активной зоне, тяжелые ядра (например, урана) делятся и при этом возникают новые нейтроны, что дает предпосылки к дальнейшим делениям. Эту картину можно представить наподобие биллиарда. Множество маленьких шариков (нейтроны) налетают на более крупные шары (это ядра тя-

желых атомов). При попадании нейтроны рассеиваются как шары, но иногда (с некоторой вероятностью) происходит деление ядер. Если ядро тяжелого атома разделилось, то выделяется энергия и в среднем возникает около двух-трех новых нейтронов. Часть родившихся нейтронов может попасть в соседние ядра и снова вызвать деление. Такой лавинообразный процесс называется цепной реакцией. Самоподдерживающаяся цепная реакция деления идет в реакторе, точнее в среде (активной зоне), в которой обеспечен процесс размножения нейтронов. Нейтроны являются тем "философским камнем", с помощью которого и энергию может выделить и золото получить. Но здесь не обойтись ретортой и горелкой. "Горелка" должна представлять собой фундаментальное сооружение - шедевр человеческой мысли, обеспечивающее успешный процесс. С другой стороны, поскольку цепная реакция обладает определенной "самостоятельностью", нельзя исключить вероятности выхода ее из-под контроля, когда энергии выделится "слишком много". В этом кроется основная проблема безопасности современных реакторов. Сразу нужно отметить, что ядерного взрыва в реакторе невозможно осуществить. Конструкция активной зоны такова, что нейтроны теряют значительную часть своей энергии (даже в случае быстрых реакторов - на порядок). Поэтому аварийный разгон реактора следует рассматривать как неуправляемую вспышку делений. Например, в катастрофической чернобыльской аварии в реакторе 4 блока произошло не более 8 1020 актов делений, что составило в тротиловом эквиваленте около 5 т тринитротолуола. Получается, что для нагрева до испарения активной зоны требуется разделить всего лишь несколько миллиграмм тяжелых ядер, в то время как при ядерном взрыве делится килограмм и более. Катастрофические последствия аварии связаны с выбросом радиоактивности в окружающую среду.

Рассматривая принципы, положенные в основу функционирования реактора, сразу сделаем некоторые замечания. Из материалов, пригодных для применения на практике (уран-235, уран-233, плутоний-239) только уран-235 существует, как мы знаем, в окружающем нас мире: он составляет примерно 0,7 % природного урана. Указанные тяжелые ядра актиноидов делятся любыми нейтронами (с некоторой вероятностью), лишь бы только произошло "попадание" нейтрона в ядро. Поэтому указанные ядра носят название делящихся. Их участие "в игре" обусловлено только одним обстоятельством - доступностью. Некоторые другие ядра также являются делящимися, но они малодоступны. Забегая вперед, скажем, что ядерные реакции с огромным энерговыделением могут происходить и в результате синтеза (слияния) легких ядер, например изотопов водорода - дейтерия и трития. Эти реакции - основа термоядерного синтеза.

Из природного урана чистый радионуклид - уран-235 может быть получен "отделением" от других изотопов, в первую очередь урана-238. В настоящее время наиболее практичным способом разделения изотопов является газоцентрифужный метод. Плутоний-239 и уран-233 в природе не существуют. Они могут быть получены в реакторах в результате захвата нейтронов ядрами того же урана-238 (получается плутоний) или ядрами тория-232 (уран-233). Заметим, что плутоний и уран-233 будут образовываться в любом реакторе, если там содержится уран-238 или торий. В связи с этим ядра урана-238 и тория-232 могут быть косвенно "использованы" в качестве горючего и их называют сырьевыми.

В итоге получаем, что наряду с уран-плутониевым существует еще один цикл - уран-ториевый. Здесь уран упоминается по той причине, что для запуска реакций должен сначала использоваться уран-235, а потом в процессе реакций из тория-232 синтезируется делящийся изотоп урана-233. (Более выгодно для стартовых загрузок использовать плутоний. Особенно это будет сказываться в случае замыкания топливного цикла). К уран-ториевому циклу периодически вспыхивает значительный интерес. Опыт использования в энергетике уран-плутониевого цикла выявил ряд негативных моментов, заставляющих время от времени вспоминать об альтернативах.

(Продолжение следует.)