

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

А.П.Александров, П.Н.Пономарев-Степной

Введение

Создание в Советском Союзе в 1954 году Первой в мире атомной электростанции ознаменовало собой не только начало нового направления в энерготехнике, но и наглядно продемонстрировало реальность использования человечеством огромных ядерных энергоресурсов.

Открытие принципиальной возможности использования энергии, освобождающейся в ходе цепной реакции деления тяжелых ядер и синтеза легких ядер, явилось величайшим даром науки.

Все значение этих открытий проявится позже, в конце нашего столетия, однако уже и сейчас становится очевидным, что широкое применение ядерной энергии деления и синтеза является неизбежным единственным технически и экономически целесообразным путем преодоления недостаточности удобных форм дешевого топлива — нефти и газа.

Благодаря этим открытиям недостаточность энергоресурсов никогда не будет угрожать человечеству, если использование ядерных энергоресурсов будет разумно организовано. Хотя было давно известно, что внутренняя энергия атомных ядер очень велика и, начиная с работ Резерфорда, установлена возможность искусственного расщепления ядер, однако, считалось, что получаемая при этом энергия будет всегда существенно меньше затраченной. По этой причине до тридцатых годов нашего столетия

Физика атомного ядра и астрофизика — изучение возможных источников энергии звезд казались подавляющему большинству ученых областями знания особенно далекими от практического использования. А всего через десяток лет развитие этих областей науки привело к открытию возможности цепного процесса деления, а также термоядерного синтеза, давших в руки человечества возможность использования неисчерпаемых энергоресурсов. Пожалуй, именно эти открытия являются лучшей демонстрацией поразительной рентабельности затрат на развитие науки, фундаментальных ее областей.

Обычное минеральное топливо

В настоящее время еще нельзя говорить о недостатке обычного минерального топлива вообще. Что касается каменного угля и бурых углей, то к 2000 году будет израсходовано по имеющимся оценкам не более 2–3% мировых запасов этого топлива.

Однако размещение богатых ресурсов угля на земле таково, что, как правило, расстояние их от мест энергопотребления составляет несколько тысяч километров. При любых способах транспортировки к местам энергопотребления — в виде перевозки собственно угля, конвертировании его и перевозки или транспортировки по трубопроводам жидкого или газообразного конвертированного топлива, или, наконец, передачи в виде электроэнергии по сверхдальним линиям электропередачи эти энергоресурсы, за счет стоимости приведения в транспортабельный вид и транспортировки экономически неконкурентоспособны по сравнению с природным газом и нефтью, транспортируемым к местам энергопотребления.

Кроме того, капитальные затраты на устройства, потребляющие уголь, например, электростанции, выше, чем станций, потребляющих нефть или газ.

Поэтому за последние 30–40 лет структура потребления мировых энергоресурсов сместилась в сторону преимущественного потребления нефти и природного газа. Так, в 1950 году на общего мирового потребления энергоресурсов уголь составлял 54%,

нефть 23,8% и газ 9%, а в 1970 году уголь составил 30,5%, нефть 40% и газ 19,7% и эта тенденция продолжается до сих пор и в 1973 году из общего энергопотребления на долю нефти и газа пришлось около 73%.

Из освоенных сегодня нефте- и газоносных районов, не считая запасов СССР, около 70% достоверных запасов нефти и 40% газа приходится на страны Среднего и Ближнего Востока. Эти ресурсы удобны для добычи и транспортировки и до последнего времени давали наиболее дешевое топливо, за счет которого удовлетворялось более половины мировых потребностей. Однако эти удобные ресурсы близки к исчерпанию, и, естественно, это заставляет страны, на территории которых находятся эти ресурсы, повышать цены на нефть и газ. В последние годы поиски новых месторождений нефти и газа привели к обнаружению значительных подводных запасов - на шельфах и в глубинах морей и на долю морей в 1970 году пришлось около 17% мировой добычи нефти.

В качестве примера можно указать, что нефтяные ресурсы США возле побережья в четыре раза превосходят имеющиеся на суше ресурсы (6,2 млрд.т). Однако все эти ресурсы, естественно, будут давать топливо по более высокой цене, как и конверсионное из угля жидкое или газообразное топливо. Таким образом, "энергетический кризис", потрясавший западные страны сегодня, не отражает реального исчерпания нефти и газа, а обусловлен их удорожанием. Тенденция удорожания нефти и газа, учитывая не только перспективу истощения дешевых наземных месторождений, но и все большую долю в мировой добыче более дорогой "морской" нефти несомненно будет устойчива и постепенно приведет к коренному изменению структуры потребления энергоресурсов в пользу атомной энергетики, районы рентабельности которой будут систематически возрастать, а экономически доступные запасы урана будут расширяться, так как топливная составляющая стоимости энергии на атомных станциях в два-три раза меньше, чем на станциях с обычным топливом. И поэтому повышение цены ядерного горючего меньше влияет на повышение стоимости электроэнергии.

Однако действительно существенное влияние истощения запасов нефти и газа неотвратимо. Ситуация, складывающаяся к 80 году, при которой крупнейшие индустриальные державы западного мира могут поддержать и развивать свою экономику только при условии импорта более половины, как США, или практически всей — как Япония, Италия, ФРГ, Франция и Англия потребляемой нефти и газа, чревата все более опасными политическими последствиями.

Известно, что нефть, газ и уголь на земле имеют биогенное происхождение и поэтому их распределение на земной поверхности крайне неравномерно. Они образовались лишь в районах Земли с длительным и продуктивным биологическим прошлым, а площадь этих районов очень мала по сравнению со всей земной поверхностью. Поэтому и сложилась обстановка, при которой значительная часть стран не имеет на своей национальной территории собственных ресурсов нефти, угля и газа. Обострение этой обстановки к концу нашего столетия, очевидно, приведет к кризисной ситуации и жесточайшей борьбе за месторождения нефти и газа на суше, шельфах и дне океанов и морей. Единственным фактором, который может снять эту остроту, является быстрое развитие крупномасштабной атомной энергетики.

Особенности атомной энергетики позволяют построить такой путь использования ресурсов ядерного горючего, при котором масштаб энергетики не ограничивается и любой дефицит топливного баланса может быть покрыт природными и искусственными запасами ядерного горючего. Кроме того, в запасе у человечества останется еще не освоенная возможность использования неограниченных термоядерных ресурсов.

Диалектика развития оказалась такой, что открытие наукой ядерной и термоядерной энергии, освоение которых в военных целях создало угрозу самому существованию человечества, в настоящее время может явиться фактором, резко ослабляющим борьбу за ресурсы, фактором длительного ослабления международной напряженности.

Развертывание крупномасштабной атомной энергетики для разных целей: производства электроэнергии, производства тепла

для промышленных целей и отопления городов, тепло- и энерго-снабжения металлургической промышленности и получения восстановителей для нее, энерго- и теплоснабжения многих видов химической промышленности, а также различных видов радиационной стимуляции химических производств позволит экономить нефть и газ для тех целей, где их сложнее всего заменить.

Главной и наиболее рациональной областью использования нефти и газа будет, конечно, промышленность органической химии с ее огромным диапазоном продуктов, получаемых из нефтяного и газового углеводородного сырья: от пластмасс и композиционных материалов до жиров и белка. Конечно, в ближней перспективе использование нефти и газа в энергетических целях неизбежно и особенно трудно заменить нефтепродукты, потребляемые автомобильным транспортом - автомобильным и авиационным.

Впоследствии, возможно, значительная часть автомобильного мелкого транспорта будет использовать в виде топлива не загрязняющий атмосферу, централизованно получаемый водород, особенно если удастся реализовать мечту теоретиков и получить метастабильный достаточно устойчивый металлический водород.

Нашими потомками нефтепродукты будут широко использоваться не только как сырье для химических производств, но и для получения белков (кормовых и пищевых) микробиологическими методами, а также пищевых жиров.

Такого рода изменения, вытекающие из возможности широкого применения ядерной энергии, приведут к существенному сокращению потребления кислорода и снижению выбросов углекислоты, что может оказаться решающим при дальнейшем промышленном развитии. При современном топливном балансе потребление кислорода на сжигание топлива примерно в пять раз превосходит потребление кислорода всем человечеством Земли. На территориях многих промышленно развитых стран воспроизводство кислорода в процессе фотосинтеза уже в несколько раз ниже, чем его потребление и эти страны могут существовать только за счет подтока кислорода из экваториальных районов и океанов, где производство кислорода в результате фотосинтеза сильно превышает его потребление. Проблема кислорода заметно смягчится ядерной энергетикой.

Однако развитие ядерной энергетики принесет с собой и новую для человечества заботу — заботу о безопасном хранении колоссального количества радиоактивных продуктов. Эта задача является общей задачей для всех стран мира и должна решаться с особой тщательностью и ответственностью, так как уже сейчас атомная техника привела к получению такого количества радиоактивных отходов, что их достаточно для уничтожения всего живого на Земле. Но нет никаких оснований считать эту задачу неразрешимой.

Таким образом, ядерная энергетика крупных масштабов, покрывающая подавляющую часть энергопотребления всех видов, является величайшим благом для человечества и разрешит целый ряд острых проблем.

Важно определить, в какой степени масштабы ядерной энергетики могут быть ограничены ресурсами ядерного горючего.

О ресурсах ядерного горючего

Публикуемые сведения о ресурсах урана и тория совершенно не характеризуют истинного положения.

Дело в том, что после нескольких лет ажиотажа в области разведки и разработки урановых месторождений, предложение на мировом урановом рынке превысило спрос. Разработка некоторых месторождений была прекращена, работы по геологической разведке были снижены и касались, главным образом, увеличения запасов уже известных разрабатываемых месторождений. Только в Австралии и в Африке были открыты новые крупные месторождения дешевого урана.

В некоторых странах Европы, США и Канаде ураноносность изучена более подробно, чем в других районах Земли, но и здесь более или менее надежные данные касаются запасов только наиболее дешевого урана, по цене до 22 дол/кг U_3O_8 , а запасы в интервале цен между 22—35 дол/кг U_3O_8 уже совершенно не достоверны и отражают только масштаб затрат на разведку. Из опубликованных данных невозможно установить закономерность возрастания ресурсов по мере увеличения цены урана, хотя

насомненно, что для урана возрастание ресурсов по мере увеличения цены должно быть не менее резким, чем для других металлов сходного геологического происхождения. Так, например, повышение цены урана примерно в 10 раз уже, вероятно, позволит причислить к ресурсам урана, по крайней мере, 10% от $4 \cdot 10^9$ тонн урана, содержащегося в воде океанов. Кроме того, при этом пойдут в дело огромные ресурсы урана в сланцах и в других бедных рудах, во множестве имеющихся практически повсюду. В то же время из публикуемых данных следует неправильное заключение, что по цене до 33 дол/кг урана меньше, чем по 22 дол/кг. Иллюстрировать описанное выше положение о достоверности данных по запасам урана нельзя лучше, чем это сделано в отчете по ресурсам, производству и спросу рабочей группы МАГАТЭ, изданном в августе 1973 года. Считается, что Норвегия не имеет запасов урана, однако, в Швеции вдоль границы с Норвегией в структурах, простирающихся по обе стороны границы, найдены достоверные запасы масштаба 270 тыс. тонн. Дело, видимо, в том, что усилия Норвегии, направляемые на поиски урана, оцениваются половиной человека-года!

Такая неопределенность заставляет сделать попытку по иному подойти к оценке возможных ресурсов урана и их распределения. Известно, что распространенность урана (и тория) в континентальной земной коре достаточно велика — порядка $4 \cdot 10^{-6}$ гр. на 1 гр. породы. Уран распределен, главным образом, в верхних слоях континентальной земной коры, видимо, в слое усредненной толщиной до 20 километров. Это следует из измерений теплового баланса Земли. Прямые измерения показывают, что уран содержится, главным образом, в кислых изверженных породах и продуктах их метаморфизма. В водах океана и в осадочных океанских породах урана сравнительно мало, хотя здесь имеются исключения. Изверженные и метаморфизованные породы составляют более 95% веса земной коры в толще до 20 км и имеют практически повсюду на поверхности материков, поэтому первичный уран довольно равномерно распределен по суше.

Только в малом количестве стран с небольшой территорией, сложенной из осадочных пород, могут отсутствовать урановые рудопроявления в приповерхностных слоях земли.

Известно, что распространенность урана еще не обозначает, что повсюду имеются промышленные месторождения урана. Происхождение большинства первичных урановых руд имеет гидротермальный характер.

В процессе метаморфизма, протекавшего в земной коре, в присутствии углекислоты уран выщелачивался, при повышенных температурах и давлениях, водой, образующейся при метаморфизме, и переносился в сорбционно или химически едкие породы, где и выделялся в виде рудных тел, главным образом, в окисных формах, в сопровождении других элементов. Иногда происходили дополнительные процессы переноса и в результате их также могли появляться значительные переотложенные месторождения урана.

Эти метаморфические и сопровождавшие их гидротермальные процессы имели очень большое распространение в материковой коре. Практически везде на поверхности или под небольшой толщиной осадочных пород находятся метаморфизованные породы и поэтому урановое оруденение должно встречаться довольно часто и довольно равномерно в верхних слоях земной поверхности. Конечно, из таких рассуждений нельзя предсказать промышленного значения уранового оруденения — эти отложения, в зависимости от мощности концентрации и химических форм, могут быть источниками урана в широком диапазоне цен. Однако, в перспективе и дорогой уран будет использован в атомной энергетике.

Видимо, нижняя оценка ресурсов урана может быть сделана, если в основу ее в качестве модели взять большую территорию страны с разнообразными геологическими условиями, в которой поиски урана велись длительно и крупномасштабно. Примем в качестве модели США с ее достоверными запасами на I.I.73 года $259 \cdot 10^3$ т урана и ожидаемыми расчетными достаточно обеспокоенными запасами $538 \cdot 10^3$ т (по цене 22 дол./кг U_3O_8) + $70 \cdot 10^3$ т, пригодных для полутного извлечения по этой цене при добыче меди и фосфатов, т.е. всего $867 \cdot 10^3$ т.

Учитывая, что при малом масштабе ведущая сейчас в США работ по приращению запасов, эта цифра за последние три года выросла почти в 1/4, такая модель, вероятно, приведет к

нижней оценке мировых ресурсов. Ресурсы при грубой оценке должны быть пропорциональны отношению всей поверхности суши к территории США. Не учитывая Антарктиду и не принимая во внимание возможные запасы на шельфах и днел морей, получаем оценку вероятных ресурсов по цене 22 дол/кг U_3O_8 порядка $12 \cdot 10^6$ т.

Если в качестве модели принять Канаду с ее запасами на 1.1.73 года по той же категории цен вместе с ожидаемыми запасами $(185 \pm 190) 10^3$ т, то вероятные мировые ресурсы снизятся примерно до $6 \cdot 10^6$ т, однако следует отметить, что степень излученности ураноносных районов Канады значительно ниже, чем в США, так как добыча в уже известных месторождениях не только полностью покрывает потребности Канады и экспорт на длительный период, но причем часть их мощностей законсервирована. Поэтому Канадская модель заведомо должна приводить к сильно заниженным оценкам.

Атомная энергетика на ее сегодняшнем техническом уровне, даже без учета повышения цен на нефть, не утрачивает экономической конкурентоспособности при повышении цен на уран в 1,5 раза, т.е. до значений 33 дол/кг U_3O_8 в ценах 1972 года, так как это приводит к повышению стоимости электроэнергии примерно на 10%. Поэтому рассматривая ресурсы атомной энергетике, нужно учитывать и уран категории цен до 33 дол/кг U_3O_8 . Сведения о запасах по этой категории еще более скудны. Затраты на приращение запасов в этой категории цен ничтожны, так как имеются значительные достоверные запасы более дешевого урана и предложение пока превышает спрос. Грубая оценка, по аналогии с другими металлами аналогичного геологического происхождения, приводит к тому, что ожидаемые ресурсы в интервале цен от 22 до 33 дол/кг U_3O_8 , по крайней мере, вдвое превысят количества урана категории цен до 22 дол/кг, т.е. составят около $25 \cdot 10^6$ т. Отсюда оценка мировых ресурсов, приемлемая для развития атомной энергетике с использованием реакторов на тепловых нейтронах без учета влияния расширенного воспроизводства ядерного горючего в бродерных системах, приводит к величинам вероятных ресурсов по ценам до 33 дол/кг U_3O_8 порядка 30-40 миллионов тонн, принимая за модель США и порядка 25 миллионов тонн, принимая за модель Канаду.

Нужно отметить, что опубликованные ресурсы западных и развивающихся стран, не включая СССР, социалистические страны и [] достоверные и ожидаемые в уже известных месторождениях составляли в 1973 году около 3 млн. т по цене до 33 дол./кг U_2O_8 , из них около 2 млн. т по цене до 22 дол./кг.

Уже само соотношение запасов этих двух категорий цен указывает на упомянутую выше недостаточность исходных данных. Ежегодное возрастание запасов при современной малой интенсивности работ по их наращиванию составляет около 10%, причем в постоянных ценах производная прирост запасов затраты на разведку пока не имеет тенденции к снижению, что свидетельствовало бы о приближающемся исчерпанию ресурсов. Даже такой низкий темп увеличения запасов приведет к их удвоению через 8 лет.

Первый этап развития атомной энергетики

В ближайшее десятилетие нельзя ожидать, что структура атомной энергетики существенно изменится. До 1985 года будет развиваться первый этап атомной энергетики и потребление урана будет определяться, в основном, реакторами на тепловых нейтронах, хотя дальнейший прирост мощностей будет происходить в большей степени за счет реакторов на быстрых нейтронах. Оценка возможного развития мощностей атомной энергетики в мире может исходить из уже определившейся тенденции роста мощностей. В период 70-75-80 годов каждое пятилетие приведет к росту атомной энергетики в три-два с половиной раза (табл. I).

Таблица I

Ожидаемая установленная мощность АЭ (Гвт)
(без СССР и социалистических стран)

Прогноз раб. гр. МАГАТЭ

1975	1980	1985	1990	1995	2000	Примечания
				экстраполяция		
--94	--264	567	-1068	2000 1500	4000 2000	10 лет

Планирование на 80-85-90 годы ведется с замедлением темпа и намечается в среднем удвоение мощностей за 5 лет. Если эта тенденция продержится до 2000 года, то ожидаемая к 2000 году мощность АЭС в мире достигнет $4 \cdot 10^9$ киловатт (по сравнению с $\sim 1 \cdot 10^9$ кВт в 1990 г.) с потреблением естественного урана около 800000 т/год. Это, по-видимому, максимальная оценка. Если замедление темпа развития атомной энергетики станет более значительным и сравняется со средним темпом роста всей энергетики, то ожидаемая в 2000 году мощность снизится до $2 \cdot 10^9$ кВт, что потребует расхода примерно 400000 т естественного урана в год и, вероятно, это предельно низкая оценка масштаба атомной энергетики.

Учитывая срок работы станций 25-30 лет, мы можем заключить, что уже в первых десятилетиях 21 века дешевого природного урана будет недостаточно для обеспечения дальнейшего развития атомной энергетики с использованием реакторов на тепловых нейтронах. Однако в текущем столетии еще никаких ограничений со стороны ресурсов природного урана при любом реально возможном масштабе развития атомной энергетики ожидать нельзя, если приращение запасов и мощности уранодобывающих предприятий будут развиваться своевременно. Нужно учитывать, что с момента открытия промышленного месторождения урана до полномасштабного развития добычи его проходит 8-10 лет, поэтому при неудовлетворительном планировании возможны серьезные перебои.

Второй этап развития атомной энергетики

Атомная энергетика второго этапа развития - на быстрых бридерах - в принципе, способна преодолеть кризис нехватки природного урана в будущем веке, хотя в текущем столетии сильного влияния на потребление урана бридеры не окажут.

Развитие бридерной программы и атомной энергетики в целом приобретет чрезвычайно важное значение только в том случае, если бридеры будут способны путем наработки плутония с соответствующей скоростью обеспечивать развитие энергетики в необходимом темпе, потребляя только отвалный уран и часть

нарабатываемого в них самих плутония. В этом случае цена природного урана не будет существенно отражаться на стоимости электроэнергии, получаемой от бридеров, а энергоиспользование каждой тонны природного урана возрастет в 20-30 раз. Естественно, при этом, что для энергетики станут экономически доступными те урановые ресурсы, которые сейчас не имеют промышленного значения, например, уран, растворенный в воде океанов. На этих принципах может быть построена атомная энергетика любого масштаба, причем, ресурсы вторичного ядерного горючего будут неограниченны.

На этом этапе практически все страны смогут обеспечивать необходимое для них развитие энергетики за счет вторичного ядерного горючего и национальных ресурсов ядерного горючего, так как цена урана не будет иметь решающего значения. Этих ресурсов хватит на сотни лет. Такой путь развития был намечен в Советском Союзе много лет тому назад. Однако принципиальная важность именно такого пути развития еще недостаточно осознана. Так, например, в США и многих других странах запада бридерная программа многие годы развивалась без учета решающей роли времени удвоения. Считалось, как и при развитии энергетики на обычном топливе, что при развитии строительства бридеров можно будет обеспечивать их начальной топливной загрузкой и пополнением ее в течение нескольких лет до перехода на установившийся топливный режим за счет урана, приобретаемого на мировом рынке. Бридер рассматривался как реактор, который за время своего существования, 25-30 лет, потребит в 2-4 раза меньше природного урана, чем реактор на тепловых нейтронах, но не как средство, создавшее неограниченную топливную базу будущей атомной энергетики. Только в середине 1973 года комиссия Ганса Бете в США, исходя из важности бридерной программы для всей энергетики будущего, выдвинула правильное, но недостаточное требование, чтобы время удвоения делящегося материала в бридерах было не более 10 лет, т.е. соответствовало периоду удвоения энергетики в США. Это, конечно, коренным образом изменит роль бридерной программы.

Однако для того, чтобы открыть перспективу развития

действительно крупномасштабной ядерной энергетики будущего века, необходимо, чтобы бридеры путем наработки плутония не только обеспечивали строительство новых бридеров в темпе, необходимом для страны в соответствии со скоростью ее промышленного развития делившимся веществом. Необходимо также, чтобы они обеспечивали производство добавочного количества плутония для загрузки реакторов на тепловых нейтронах, потребляющих стивальный уран или торий. От 25 до 50% мощностей атомной энергетики будет состоять из высокотемпературных источников тепла, регулирующих станций, станций местного энергоснабжения и т.д., что будет выгодно делать на основе реакторов на тепловых нейтронах. Поэтому необходимое время удвоения, которое необходимо достигнуть к 90 годам, в нашей стране должен быть в пределах 4-6 лет, исходя из нужного для СССР времени удвоения энергетики 8 лет и структуры атомной энергетики, ожидаемой к концу столетия.

Подводя итоги этого важного раздела, следует подчеркнуть, что первый этап развития атомной энергетики, строительство до 1985 года преимущественно существующих типов реакторов на тепловых нейтронах при любом реально осуществимом масштабе не встретит ограничений со стороны ресурсов ядерного горячего в течение всего срока службы этих реакторов первого этапа развития.

При развитии второго этапа ядерной энергетики преимущественного строительства быстрых бридеров не встретится затруднений с обеспечением ядерной энергетики топливными ресурсами только в том случае, если решающая роль в топливном балансе создаваемой энергетики перейдет к вторичному делящемуся плутонию. Его будет необходимо производить в быстрых реакторах в таких масштабах, чтобы обеспечивалось развитие с нужной скоростью не только бридеров, которые составят к 2000 году базу энергетики, а также создание регулирующих высокотемпературных и других реакторов различных назначений на основе реакторов на тепловых нейтронах с плутоний-урановой или плутоний-ториевой загрузкой, с глубоким выгоранием, позволяющим обойтись, возможно, без переработки отработавшего топлива.

Будет ли играть существенную роль сжигание производимого

в реакторах первого этапа вторичного делящегося плутония в тепловых легководных реакторах первого этапа развития? Можно сказать с уверенностью, что это приведет к экономии природного урана не более 10-15% и особых экономических преимуществ не даст. Выгоднее этот энергетический плутоний использовать в качестве начальной загрузки бриддеров, где он приведет к ускорению перехода в стационарный режим и сократит время удвоения делящегося вещества.

Будут ли играть существенную роль тяжеловодные реакторы, заметно более экономно расходующие природный уран? Представляя, что они, при всех физических достоинствах, будут иметь только частное значение, главным образом, для создания энергетики в том случае, когда нежелательно связывать ее развитие с использованием услуг других стран по обогащению урана. Общей проблемы экономии урана они не решают, хотя и являются менее чувствительными к цене природного урана и остаются конкурентоспособными при повышении цены урана в 2-3 раза.

Может ли, наконец, введение тория в топливный цикл реакторов на тепловых нейтронах с добавкой урана-235 заметно изменить ситуацию с энергоресурсами? Введение тория может существенно, примерно вдвое, снизить потребность в природном уране. Однако, учитывая, что к концу нашего столетия атомная энергетика будет удваиваться примерно за 5 лет, применение тория может в лучшем случае отодвинуть начало недостаточности ядерного горючего на те же 5 лет (т.е. примерно также, как и в случае применения тяжеловодных реакторов), поэтому нельзя ожидать существенного влияния ториевого цикла на проблему ресурсов при первом этапе развития атомной энергетики.

Тем более никакого влияния на проблему ресурсов не окажут усовершенствования термодинамического цикла как, например, повышение КПД за счет перегрева пара и поэтому вопрос о внедрении этих усовершенствований будет определяться другими соображениями.

Только реакторы-бриддеры с высоким воспроизводством делящегося вещества и временами удвоения порядка 4-6 лет коренным образом изменят структуру ядерного топливного баланса и обеспечат

возможность неограниченного развития ядерной энергетики. Однако ошибочно было бы считать, что быстрые бридеры вытеснят реакторы на тепловых нейтронах.

Бридеры бессмысленно эксплуатировать с неполной нагрузкой или в режиме регулирования энергосистем, так как при этом время удвоения для них возрастает и они делаются не конкурентоспособными с реакторами на тепловых нейтронах. Оптимальная структура атомной энергетики будет сочетать быстрые бридеры с временем удвоения 4-6 лет и тепловые реакторы. Относительная доля тепловых реакторов будет тем больше, чем меньше время удвоения бридеров. Для нужного нам 8-летнего темпа удвоения энергетики, при бридерах с удвоением топлива в 4 года, доля тепловых и быстрых реакторов будет одинакова.

Расширение сферы влияния атомной энергетики

Как только появилась возможность народнохозяйственного использования энергии деления, сразу же определилось и генеральное направление ее применения - электроэнергетика.

В топливно-энергетическом балансе развитых стран электроэнергетика составляет 25-30%, поэтому развитие атомной электроэнергетики существенно облегчает напряженность, связанную с необходимостью дорогостоящей дальней транспортировки топлива. Однако завоевание атомной энергетикой области электроэнергетики является только первым, наиболее простым шагом. Выработка промышленного и отопительного тепла, участие ядерной энергетики в производстве восстановителей для металлургии и включение ее в химическую промышленность являются задачами такого же масштаба, как электроэнергетика и в ближайшие годы мы, конечно, сделаемся свидетелями и участниками проникновения ядерной энергии в эти новые области.

Обычные задачи теплофикации городов могут быть выгодно решены путем применения легководных реакторов существующих типов.

Однако черная металлургия, а ее энергоёмкость около 20%

топливного баланса, требует особого решения. Требуемый температурный уровень находится около 1000°C , а в ряде случаев и выше. Тепло должно переноситься внутри реакторного контура химически инертным веществом, например, гелием, а в металлургической части установки теплоносителем и восстановителем должен служить водород. Решение этой задачи необходимо, так как традиционная доменная технология черной металлургии в связи с нарастающим недостатком кокса и загрязнением внешней среды постепенно заменяется технологией прямого восстановления руд, и именно этот процесс хорошо сочетается с возможностями атомной энергетики. Уже много лет в различных странах ведутся работы по созданию высокотемпературных реакторов с гелиевым теплоносителем, уже реально осуществлены активные зоны в экспериментальных реакторах с рабочей температурой около 1000°C с выходящим газом при температуре около 900°C . Близки к завершению два реактора мощностью около 350 Мвт каждый.

Более того, уже некоторые фирмы заключили соглашения на пять реакторных установок мощностью по 1000 Мвт с сроком ввода 78-82 г.

Возможность использования этих реакторов для получения одновременно электроэнергии и высокопотенциального тепла обеспечивает их высокую рентабельность.

Разработанное для них микротопливо сравнительно хорошо удерживает осколки деления и допущает очень глубокое выгорание, порядка 100000 Мвсут/тонн, после чего его радиохимическая переработка практически не требуется, во всяком случае для энергетических целей.

Конечно, в этом направлении еще много нерешенных сложных проблем - высокотемпературные надежные теплообменники, пригодные для подогрева водорода, тепловая защита корпусов из напряженного железобетона, жаростойкие системы регулирования, в дальнейшем - газовые турбины замкнутого цикла и т.д.

Однако в этом направлении работа уже далеко продвинута, принципиально нерешенных проблем нет и, кроме того, возможно постепенное развитие реакторов и вспомогательных систем этого типа по мере освоения высокотемпературных теплообменных

устройство. Процесс прямого восстановления окатышей из окисных железных руд на первых порах может осуществляться водородом, предварительно подогретым в теплообменниках и догретым до нужной температурной кондиции за счет частичного сжигания с кислородом или плазменного подгрева.

Преимуществами такого процесса являются отсутствие характерных для доменного процесса выбросов громадных количеств углекислоты и больших количеств сернистого газа и получение железа, чистого по сере и фосфору. Конечно, было бы хорошо в едином процессе производить и выплавку стали. Выплавка потребует для этой стадии температур до 1600°C и такие температуры могут быть получены путем последующего плазменного догрева водорода. Видимо, именно развитие газоохлаждаемых высокотемпературных реакторов наравне с бридерами будет характерной тенденцией изменения структуры атомной энергетики к 90 годам нашего века.

Может оказаться, что развитие бридеров, охлаждаемых натрием, при временах удвоения 4-6 лет окажется сложным или невыполнимым, так как заметное смягчение спектра нейтронов натрием снижает коэффициент воспроизводства. В этом случае несколько лучший по физике газоохлаждаемый бридер может оказаться перспективным, хотя необходимость очень высокой теплонапряженности приведет к высоким давлениям и сложности аварийного расхолаживания. Представляется все же, что это направление заслуживает разработки, особенно если учесть, что сокращение времени удвоения в металлоохлаждаемых бридерах обязательно потребует перехода от окисных топливных композиций к более плотным карбидам, нитридам или металлическим композициям, отойкость которых легче обеспечить в химически инертном гелии, чем в натрии.

Разработка гелиевой технологии для высокотемпературных тепловых реакторов даст большое продвижение проблемы газоохлаждаемых бридеров.

Изменение структуры топливного баланса ядерной энергетики в сторону безусловного преобладания плутония, как отмечалось выше, позволит рентабельно эксплуатировать бедные урановые

руды. При этом главным предметом использования будет 238 изотоп для конвертирования в бридерах в энергетический плутоний. Несомненно, значительная часть энергии деления будет расходоваться на получение водорода как топлива и восстановителя.

Извлекаемый уран-235, количество которого благодаря расширению ресурса экономически доступных для бридеров руд будет велико, найдет применение, главным образом, для расширения Бридлерной программы в начале ее осуществления в 85-95 годах, а также для морского крупнотоннажного транспорта и в разного рода установках с тепловыми реакторами и, вероятно, наравне с плутонием в высокотемпературных реакторах.

Удачное решение проблемы бридеров с временем удвоения 4-6 лет привело бы к тому, что к 2000 году в топливно-энергетическом балансе мира доля атомной энергетики составила бы до 80%, что решило бы энергетическую проблему нашего века и открыло бы дальнейшие пути развития.

Однако решение этой задачи связано не только с ресурсами ядерного топлива, но и с прилегающими задачами: проблемой обогащения урана и проблемой удаления радиоактивных отходов.

Как известно, подавляющая часть атомной энергетики первого этапа развития требует для работы реакторов уран, обогащенный изотопом 235. Быстрые реакторы, в период развертывания их строительства, также не смогут обойтись только накопленным плутонием, а потребуют урана, существенно более высоко обогащенного изотопом 235.

Таким образом, до перехода к коротким временам воспроизводства плутония в быстрых бридерах, развитие атомной энергетики будет определяться не ресурсами урана, а возможностями поставок обогащенного урана.

Конечно, необходимые разделительные мощности могут быть и будут созданы, однако складывающаяся в мире ситуация вызывает определенное беспокойство. Запаздывание с разработкой эффективных методов разделения в Западной Европе, Японии и ряде других стран, уже вступивших на путь развития атомной энергетики, приводит к тому, что создается монополизм США в наиболее чувствительной области промышленного развития всех этих

стран — энергетике. Такой монополизм всегда чреват попытками использования создавшегося преимущества.

При этом, несмотря на достаточность урановых ресурсов в нашем столетии, могут создаваться сложные ситуации развития атомной энергетики, что будет особенно остро ощущаться на фоне надвигающегося кризиса с обычным топливом.

По-видимому, было бы целесообразно вопрос такой большой важности решать через МАГАТЭ или Организацию Объединенных Наций в направлении создания либо международных обогатительных производств, либо международного банка обогащенного урана, который мог бы заключать долгосрочные соглашения с возможными странами-поставщиками и распределять урановую продукцию между странами-потребителями. Это, конечно, не касается стран социалистического лагеря, которые полностью обеспечены Советским Союзом. Чтобы покрыть потребности западных стран в работе разделения, необходимо увеличить производительность раздельных заводов, заявленную на 1980 год, в 3-4 раза в зависимости от реального темпа развития атомной энергетики с доведением ее, примерно, до 100000 ± 25% тонн ЕРР/год.

Однако пока не видно идей рационального решения этого важнейшего для всего мира вопроса.

Чрезвычайно важным вопросом — также, видимо, требующим международного сотрудничества, является безопасное захоронение радиоактивных отходов. В настоящее время наибольшее количество радиоактивных отходов связано с радиохимической переработкой облученного топлива.

По-видимому, также разработки в этой области следовало бы сделать предметом международного сотрудничества, имея в виду, что за последние годы появились новые возможности, например, такие, как связывание радиоактивных газов криптона и ксенона в твердые соединения "выжигание" некоторых изотопов в высокопоточных реакторах и т.д., накопился значительный опыт концентрирования и хранения осколков деления и т.д. Разделение труда в этой области между странами, желающими развивать атомную энергетику, привело бы к значительной экономии средств и дало бы возможность остановиться и повсеместно применить

наиболее эффективные общие решения. Это создало бы известную гарантию от возникновения случайных серьезных загрязнений.

Заключение

Сжимаемые мировые мощности атомной энергетики первого этапа, развиваемые на реакторах на тепловых нейтронах в 2000 г. (с учетом срока службы их 25-30 лет) будут в пределах $2-5 \cdot 10^9$ квт. В текущем столетии развитие мощностей такого масштаба не встретит затруднений со стороны обеспечения относительно дешевыми природными ураном, однако уже в начале XXI века эти ресурсы будут близки к исчерпанию. Изменение типов реакторов и их топливных циклов могут несколько замедлить исчерпание ресурсов, но, учитывая экспоненциальный рост энергопотребления, это не может радикально изменить положение.

Введение с восьмидесятих годов реакторов-бридеров с временами удвоения топлива 15 лет и более также не может решить проблему длительного крупномасштабного развития атомной энергетики.

Только бридинг с временами удвоения 4-6 лет решает проблему создания топливной базы ядерной энергетики любого мыслимого масштаба на сотни или тысячи лет и именно к развитию этого направления должны быть приложены усилия человечества. Конечно, наиболее заманчиво было бы иметь реакторы-бридеры с такими короткими временами удвоения и хорошими тепловыми характеристиками, но, вероятно, что экономически целесообразным окажется раздельное производство энергии (особенно высокотемпературной) и производство горючего. Производство горючего в этом случае могло бы вестись в реакторах-бридерах на быстрых нейтронах, не осложняемых требованиями высоких температур, а в перспективе - на термоядерных реакторах стационарных или импульсных типов за счет утилизации части нейтронов. В этом случае и уран-238, и торий-232 были бы использованы наиболее эффективно.

Термоядерная энергетика, вероятно, войдет в технику

серьезно не раньше 90-х годов, поэтому программа бридеров с короткими (4-6 лет) временами удвоения топлива явится решающей. Представляется, что термоядерная энергетика будет особенно пригодна для энергетических устройств единичной мощности порядка десятков-сотен миллионов киловатт, а потребности от десятка тысяч киловатт до нескольких миллионов киловатт единичной мощности наиболее целесообразно будет покрывать за счет атомной энергетики деления.

По-видимому, правильное развитие атомной энергетики, если будет решена проблема быстрого воспроизводства плутония, к концу нашего века существеннейшим образом изменит общий топливно-энергетический баланс. Можно ожидать, что примерно до 80% полного энергопотребления мира будет обеспечиваться атомной и впоследствии термоядерной техникой. Вклад нефти и природного газа непосредственно в энергопотребление будет относительно снижаться. В крупных стационарных и транспортных установках нефть и газ будут вытесняться термоядерной и атомной энергетикой, а в установках малых мощностей будут использоваться в основном бессерные продукты конверсии угля и, вероятно, водород, особенно если можно будет хранить его при высокой плотности в твердой и.б. металлической модификации. Централизованное получение водорода будет хорошо совмещаться с необходимостью эксплуатации бридеров с полным графиком нагрузки.

В этом случае нефть и природный газ будут применяться главным образом как химическое сырье и сырье для продуктов питания.

Решение проблем топливной базы атомной энергетики, проблем обезвреживания радиоактивных отходов, проблем тепловых сбросов потребует усилий всего человеческого общества и раскроет возможность развития в течение тысячелетий без угрозы энергетической недостаточности. А это основная задача, так как преодоление недостаточности общих ресурсов планеты, возможно, только за счет повышения энерговооруженности общества неистощимых атомных ресурсов.