

P1-99-97

В.И.Субботин *

УСКОРИТЕЛИ МОГУТ СДЕЛАТЬ ЯДЕРНУЮ
ЭНЕРГЕТИКУ БОЛЕЕ БЕЗОПАСНОЙ

Доклад на 85-й сессии Ученого совета ОИЯИ
15 января 1999 г.

*Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва

Субботин В.И.

P1-99-97

Ускорители могут сделать ядерную энергетику более безопасной

Работа посвящена всестороннему обсуждению широкого комплекса проблем мировой энергетики. Анализируются различные аспекты возникновения и развития атомной энергетики, ее экологической безопасности и экономической конкурентоспособности. Рассматриваются основные научные идеи и предложения по созданию предельно безопасной ядерной энергетики XXI века (включая решение проблемы трансмутации высокотоксичных радиоактивных отходов), базирующейся на электроядерном способе получения энергии.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Subbotin V.I.

P1-99-97

Accelerators Promise to Make Nuclear Energy Safer

Wide complex of the problems related to the energy generation is discussed in detail in the paper. Different aspects of the development of nuclear power production, its ecological safety and economical competitiveness are analysed. Main scientific ideas on the development of the safe nuclear power engineering in the XXI century based on the electronuclear method of energy generation are considered including the methods of solving the problem of the high toxical radioactive waste transmutation.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1999

*«Всегда лишь будущему предстоит решить,
избрали ли мы единственный возможный
выход и было ли найдено наилучшее
разрешение всех трудностей».*

А. Эйнштейн.

Человечество всегда должно будет создавать установки, несущие в себе высокую потенциальную опасность. Нельзя сделать какое-либо сооружение абсолютно безопасным. Понятие «абсолютная безопасность» не имеет смысла. Могут быть созданы установки с максимальной безопасностью, предельной безопасностью. Под этими терминами можно понимать, что приняты все доступные научные и инженерные реальные меры по обеспечению высокой безопасности. При самых неблагоприятных условиях может произойти авария, но не может произойти катастрофа. Повышение безопасности всегда сопровождается удорожанием установки.

Для достижения конечной цели можно найти различные основополагающие физические принципы. Так, в настоящее время для получения электроэнергии можно использовать энергию: текущей воды, окисления углеводородного топлива, деления актиноидов. Углеводородное топливо: каменный уголь, нефть, природный газ. Деление актиноидов возможно на тепловых или быстрых нейтронах. Есть из чего выбирать, имея в стране высокопрофессиональные кадры и богатые природные ресурсы.

Проще всего получать энергию от текущей воды и сжигания природного газа; сложнее всего получать энергию при делении актиноидов быстрыми нейтронами. Повышение безопасности решается кардинально, если можно предложить другие физические принципы, обеспечивающие существенный рост безопасности всей установки. Это дорогой, но наиболее правильный путь повышения безопасности.

Повышения безопасности, не меняя сути процесса, можно достичь вводя дополнительные барьеры безопасности. Нужно создать управленческую систему установки, самозащищенную от ошибок оператора и диверсий. Такая управленческая система перестает подчиняться оператору, если его действия противоречат логике управления процессом.

Другой подход — авария считается неизбежным злом. Производится экономическая оценка, что выгоднее — тратить средства на повышение безопасности

за счет введения в процесс новых, более дорогих технологий и увеличения числа барьеров безопасности, или в случае аварии оплатить ущерб и жертвы, понесенные населением. Подход аморальный и для современной крупной энергетики неприемлемый в принципе. Так, например, можно ли для гигантской гидроэлектростанции сделать дешевле плотину, но при этом допускать, что в принципе без принудительного разрушения плотина может аварийно дать крупную течь, и поток воды смывает населенные пункты, расположенные за плотинной?

Катастрофы на крупных АЭС имеют транснациональные последствия за счет заражения радиоактивными продуктами территорий на больших расстояниях от места аварии. Безопасность АЭС приобрела международное значение.

Все энергоисточники после получения от них энергии имеют отходы, как правило, отрицательно действующие на окружающую природу. Так, например, казалось бы самая экологически чистая гидроэнергетика, вызывает негативные воздействия. Сооружение гидроэлектростанции и ее эксплуатация вызывают изменение уровня грунтовых вод, влияет на растительный мир вокруг электростанции. Плотина нарушает естественную миграцию рыб. Часть земельных угодий уходит под воду. После турбин происходит сильное гидродинамическое возмущение потока воды. В зимних условиях это мешает замерзанию воды на больших расстояниях от плотины. Над рекой стоит ледяной туман. Теперь рассмотрим использование углеводородных топлив.

а) Наиболее экологически чистым является использование природного газа, состоящего в основном из метана, в топках энергетических установок разного назначения и различной мощности. Конечными продуктами горения являются H_2O и CO_2 . В ближайшие десятилетия сжигание природного газа не должно привести к непоправимым последствиям в атмосфере. В то же время газ на большие расстояния транспортируется по газопроводам. Под газопроводы изымаются большие территории. Появляется вероятность крупных потерь газа из разрушенных газопроводов, а также загорания газа. Природный газ, попав в атмосферу, оказывает более значительный вклад в парниковый эффект, чем CO_2 . Утечки газа из газопроводов и отопительных приборов вызывают взрывы и пожары. Метан — основное сырье для производства различных углеводородных соединений. Если мы на деле, а не на словах обеспокоены состоянием окружающей среды и бездумным использованием энергоресурсов Земли, то надо сокращать использование природного газа в котлах крупных электростанций, оставив его для бытовых нужд.

б) Нефть — основа энергообеспечения автомобильного и авиационного транспорта. Лучшего энергоисточника для этих целей у человечества нет. На крупных электростанциях нефтепродукты можно использовать только в аварийных ситуациях.

в) Каменный уголь — самый крупный углеводородный энергоресурс Земли. Использование каменного угля на электростанциях значительно сложнее, чем природного газа и мазута. Транспортировка больших масс каменного угля на

большие расстояния не решена. Каменный уголь на месте добычи должен быть максимально освобожден от породы, ему сопутствующей. Это необходимо сделать для удешевления и экономической целесообразности его транспортировки. Порода содержит природные радиоактивные изотопы. Предотвратить попадание угольной пыли, содержащейся в дымовых газах, в атмосферу практически невозможно. Это создает смертельную опасность попадания радиоактивных частиц в легкие.

Тепловая электростанция суммарной мощностью $5 \cdot 10^9$ Вт (э) на каменном угле калорийностью $5,5 \cdot 10^6$ ккал/т при коэффициенте использования мощности 0,9 и КПД = 45% сжигает в год около $14 \cdot 10^6$ тонн каменного угля.

Угли, даже хорошо освобожденные от породы, все равно содержат неорганическую массу. Допустим, что после очистки дымовых газов в них будет содержаться порода в виде золы в количестве 1% по массе от сожженного топлива. Это значит, что ТЭЦ на каменном угле в год выбрасывает в воздух примерно $0,14 \cdot 10^6$ тонн золы, или 380 тонн в сутки. В водоемы и атмосферу в районе такой ТЭЦ ежегодно сбрасывается $1,7 \cdot 10^{17}$ Дж тепла.

В середине XX века во всем мире наступила эпоха создания гигантских гидравлических, тепловых и атомных электростанций. Опыт не подтвердил тех надежд, которые закладывались в эти гиганты. В каждом случае важна оптимизация создаваемого энергетического объекта с учетом всех параметров, а не чисто сиюминутных экономических. Такие станции строятся на десятилетия их эксплуатации. Прежде всего, надо учитывать реальное воздействие на человека и природу. Кроме того, нуждается в существенно более глубоком исследовании транспорт больших потоков электроэнергии на большие расстояния по линиям электропередач.

Человечество за всю свою многовековую историю вошло в контакт с энергией ядра только в середине двадцатого века. Освоив для своих нужд энергию горения углеводородного топлива, ветра, текущей воды, солнца, человечество до наших дней не знало, что природа обладает колоссальной энергией деления урана, синтеза изотопов водорода.

Наука только в середине двадцатого века смогла предсказать существование ядерной энергии и объяснить, что надо сделать, чтобы ядерная энергия была выделена и использована по воле человека.

Уровень жизни людей неразрывно связан с количеством энергоисточников, потребляемых среднестатистическим человеком.

Ядерная энергия — это сегодня и на обозримое будущее единственный энергоисточник, который может обеспечить любым количеством электроэнергии и тепла. Уже в настоящее время в электроэнергетике на долю ядерной энергии приходится: во Франции — 75%, в Бельгии — 60%, в Южной Корее — 49%, в Швеции — 46%, в Испании — 38%, в Германии — 33%, в Японии — 26%, в США — 21%, в России — 14%.

Подавляющее большинство атомных электростанций работает на корпусных водо-водяных ядерных реакторах. Эти энергетические установки являются прямой конверсией военных программ. Все они по существу являются модификацией ядерно-энергетических установок для атомных подводных лодок. Ядерное топливо — природный уран, обогащенный ураном-235. Без наличия разделительных заводов, созданных для получения высокообогащенного урана для ядерного оружия, не было бы ядерной энергетики, работающей на уран-урановом топливе.

Если бы освоение ядерной энергии не прошло через освоение ядерного оружия, человечество, возможно, еще до сих пор не имело бы в своем распоряжении управляемой ядерной энергии. При создании ядерного оружия были мобилизованы гигантские коллективы выдающихся ученых, конструкторов, технологов, инженеров, рабочих, затрачены астрономические суммы денег. Сомнительно, чтобы правительства стран, создавших свое национальное ядерное оружие, пошли бы на такие затраты для любых мирных сверхзадач.

Если все было подчинено созданию ядерного оружия, то создание ядерной энергетики шло по остаточному принципу. Ядерная энергетика не стала сверхзадачей. К ее реализации не было привлечено такое внимание, как к созданию оружия. Созданная ядерная энергетика на тепловых нейтронах, на уран-урановом топливе, с водяным охлаждением не может претендовать на предельно безопасную ядерную энергетику с минимальными радиоактивными отходами, экономически целесообразную, на главенство в электроэнергетике двадцать первого века.

Для создания предельно безопасной ядерной энергетики надо воспользоваться всем накопленным опытом создания и эксплуатации ЯЭУ, но при этом критически рассмотреть все ныне существующие научно-технические постулаты. Мы обязаны сказать себе, что право на существование и перспективное развитие имеет только предельно безопасная ядерная энергетика, исключаящая ядерные и радиационные катастрофы.

Что нужно сделать и можно ли сделать, чтобы ЯЭУ была защищена полностью от тяжелых по своим последствиям реактивностных аварий, от аварий с выбросом радиоактивности, от взрывов, от пожаров, от ошибок оператора, от диверсий? Что нужно сделать, чтобы свести к минимуму радиоактивные отходы и создать невозможность выхода их в окружающую среду?

Безусловно, киловатты установленной мощности и кВт-час произведенной электроэнергии на предельно безопасных ядерноэнергетических установках будут стоить дороже, чем на ныне существующих. За безопасность надо платить. Аварии типа ЧАЭС опрокидывают всякую экономику. Согласится ли человечество иметь ядерные электростанции, если произойдет еще одна авария типа ЧАЭС? Право на существование имеет только предельно безопасная ядерная энергетика.

Возможность создания совершенно новой установки определяется (в приоритетном порядке):

наукой,
техникой,
экономикой.

Наука должна ответить на вопрос: не противоречат ли идеи, заложенные в проект, научно-физическим основам?

Техника отвечает на вопрос: как конструктивно и технологически сделать данную установку?

Экономика — нужно ли создавать данную установку сегодня и в ближайшее время?

В конце сороковых и начале пятидесятих годов в Советском Союзе были открыты огромные залежи нефти и природного газа.

Сооружение первой в мире АЭС не имело никакого экономического смысла. Авторитет научного руководителя урановой программы Советского Союза И.В.Курчатова дал возможность создать небольшую по мощности первую в мире АЭС. Возможно, пуск в 1954 г. первой в мире АЭС опередил время, когда ядерная энергетика стала бы необходимой. Наиболее решительные защитники экологии считают, что ядерная энергетика вообще не нужна. Так ли это?

В конце XX века на Земле проживает $6,6 \cdot 10^9$ человек. В конце XX века добыча углеводородных энергоисточников в мире не превышала $5 \cdot 10^9$ тонн условного топлива (тут). Потребление углеводородного топлива в мире очень неравномерное. В США на 1 человека потребляется 11,0 тут, в Западной Европе 8,0 тут. В экономически развитых странах проживает $\approx 20\%$ населения, они потребляют $\approx 10 \cdot 10^9$ тут, или $\approx 7,6$ тут на одного человека, в остальных странах $\approx 0,95$ тут на одного человека.

Для комфортного проживания всего человечества нужно иметь примерно 3,0 т условного топлива в год на человека, т.е. на $\approx 5,3 \cdot 10^9$ чел. потребуется $\approx 16 \cdot 10^9$ тут. Итого, для всего человеческого рода $\approx 26 \cdot 10^9$ тут. Где взять добавочно $\approx 11 \cdot 10^9$ тут? Невозможно получить их за счет углеводородного топлива. Не обеспечить все человечество минимальным количеством энергоисточников — значит обречь большую часть населения Земли жить у костров, сжигать сельскохозяйственные отходы и деревья.

Только ядерная энергия может обеспечить энергетические потребности человечества в XXI веке.

Глобальная оценка ядерных и термоядерных энергоисточников литосферы и гидросферы Земли дает следующие величины.

Масса земной коры примерно равна $2,8 \cdot 10^{22}$ кг.

Масса гидросферы — примерно $1,4 \cdot 10^{21}$ кг.

Среднее содержание природного урана в земной коре составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ весовых процентов, или примерно $7,0 \cdot 10^{16}$ кг.

Среднее содержание тория — $1,3 \cdot 10^3$ весовых процентов, или $36,0 \cdot 10^{16}$ кг.

При полном делении 1 кг ядерного горючего выделяется $8 \cdot 10^{13}$ Дж тепловой энергии.

При полном делении только урана-235 (примерно $4,9 \cdot 10^{14}$ кг) будет выделено около $0,4 \cdot 10^9$ Дж тепла. При полном делении всего природного урана выделится $0,56 \cdot 10^{31}$ Дж тепла. При полном делении всего тория — $2,9 \cdot 10^3$ Дж тепла.

Энергия синтеза. В природной воде на 5000–7000 атомов водорода содержится 1 атом дейтерия. Таким образом, в 1 кг обычной воды содержится 10^{22} ядер, или примерно $3,3 \cdot 10^{-5}$ кг дейтерия.

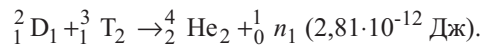
В водах мирового океана содержится $4,57 \cdot 10^{16}$ кг дейтерия (в 1 кг ${}^2_1\text{D}_1$ — примерно $3 \cdot 10^{26}$ ядер). При полном синтезе 1 кг ${}^2_1\text{D}_1$ выделится $\approx 34,0 \cdot 10^{13}$ Дж тепловой энергии. Сжигание всего ${}^2_1\text{D}_1$ даст $1,55 \cdot 10^{31}$ Дж тепла.

Содержание лития в земной коре оценивается в $3,2 \cdot 10^{-3}\%$:

$$6,65 \cdot 10^{16} \text{ кг } {}^6_3\text{Li}_3,$$

$$82,9 \cdot 10^{16} \text{ кг } {}^7_3\text{Li}_4.$$

Реакции синтеза:



1 кг (${}^2_1\text{D}_1 + {}^3_1\text{T}_2$) содержит ($0,4 \text{ кг } {}^2_1\text{D}_1 + 0,6 \text{ кг } {}^3_1\text{T}_2$), что дает $33,8 \cdot 10^{13}$ Дж тепловой энергии.

Для сжигания $6,65 \cdot 10^{16}$ кг ${}^6_3\text{Li}_3$ необходимо $2,22 \cdot 10^{16}$ кг ${}^2_1\text{D}_1$, при этом выделится $2,39 \cdot 10^{31}$ Дж тепла.

Освоив энергию деления тяжелых ядер, человечество приобрело почти безграничный источник энергии. У человечества есть в запасе второй безграничный источник энергии — энергия синтеза легких ядер.

Подведем некоторые итоги по достоверной структуре мировых энергоресурсов, доступных для добычи современной техникой.

Каменные угли

Разведанные месторождения составляют $(0,476–0,59) \cdot 10$ тонн.

При средней калорийности $5,5 \cdot 10^6$ ккал/т ($2,3 \cdot 10^{10}$ Дж/т) это эквивалентно тепловой энергии $(1,1–1,4) \cdot 10^{22}$ Дж.

Возможные месторождения оцениваются в $(3,2-7,6) \cdot 10^{12}$ тонн, или $(7,36-17,48) \cdot 10^{22}$ Дж тепловой энергии.

Природный газ

Разведанные месторождения составляют $(52-78) \cdot 10^{12}$ м³.

Тепловая энергия, которую можно получить, равна $(2,0 + 3,0) \cdot 10^{21}$ Дж.

Возможные месторождения оцениваются в $330 \cdot 10^{12}$ м³.

Тепловая энергия, которую можно получить, составит $12,8 \cdot 10^{21}$ Дж.

При сжигании $50 \cdot 10^{12}$ м³ природного газа в атмосферу будет выброшено $180 \cdot 10^9$ тонн CO₂. В настоящее время в атмосфере Земли содержится $2400 \cdot 10^9$ тонн CO₂. Сомнительно, чтобы когда-либо были созданы экономически целесообразные установки, предотвращающие выброс CO₂ в атмосферу.

Нефть

Разведанные месторождения нефти в мире составляют $(90-100) \cdot 10^9$ тонн.

Тепловая энергия — $(3,4-3,8) \cdot 10^{21}$ Дж (тепловых). При КПД 45% — $(1,5-1,7) \cdot 10^{21}$ Дж (электрических).

Возможные месторождения могут быть оценены в $(200-350) \cdot 10^9$ тонн, или $(7,6-13,3) \cdot 10^{21}$ Дж (тепловых).

Нефть нужно использовать, прежде всего, для автомобильного и авиационного транспорта, а не для электроэнергетики.

Уран

Разведанные месторождения естественного урана составляют $(1,75-2,36) \cdot 10^6$ тонн.

Тепловая энергия — $(1,4-1,9) \cdot 10^{23}$ Дж.

В реакторах на тепловых нейтронах можно сжечь около 1% природного урана, что даст $(1,4-1,9) \cdot 10^{21}$ Дж тепловых. При КПД $\approx 33\%$ — $(0,46-0,63) \cdot 10^{21}$ Дж электрических.

В реакторах на быстрых нейтронах в замкнутом топливном цикле можно сжечь практически 100% природного урана, при КПД = 45% можно получить $(0,63-0,86) \cdot 10^{23}$ Дж электрических.

Советский Союз для своей военной программы добыл большое количество природного урана. На разделительных заводах был получен высокообогащенный уран, на конверторах наработан оружейный плутоний, который после радиохимической переработки выгруженного топлива использовался для оружия. В связи с глобальными изменениями, происшедшими в России в девяностых годах, по оценкам специалистов, страна имеет избыток урана-235 и плутония-239,

которые могут быть использованы в ядерной энергетике, оценочно 100–200 тонн оружейного плутония, 1000–2000 тонн урана, высокообогащенного изотопом 235. Для получения одного килограмма урана-235 нужно иметь примерно 200 кг природного урана. Следовательно, на складах находится $(200–400) \cdot 10^3$ тонн обедненного урана, содержащего 0,2–0,3% урана-235. Т.е. 20% от разведанных месторождений природного урана хранится в России на складах.

Это минимальная оценка по обеднёному урану, т.к. основная масса урана-235 и плутония-239 находится в оружии. Уран-235 используется на обогащение топлива для реакторов на тепловых нейтронах атомных электростанций и атомных подводных лодок. При получении этого урана-235 также остался неиспользуемый обедненный уран.

Что могут дать 1000–2000 тонн высокообогащенного урана-235 в электроэнергетике, если использовать его для обогащения обедненного природного урана?

При получении высокообогащенного урана была затрачена электроэнергия на работу разделения.

В обедненном уране остается 0,2–0,3% урана-235, или 2–3 грамма на один килограмм обедненного урана.

Для оценочного расчета будем ориентироваться на типовой водоохлаждаемый реактор ВВЭР-1000. Примем среднее обогащение ядерного топлива 4,2%. В 1 кг обедненного урана надо добавить 40 г урана-235. Из 1 кг урана-235 можно получить 25 кг ядерного топлива.

Из 1000–2000 тонн урана-235 можно получить $(25–50) \cdot 10^3$ тонн ядерного топлива с обогащением 4,2% по урану-235.

При этом основная масса обедненного урана — $(175–350) \cdot 10^3$ тонн — не будет использована.

$(25–50) \cdot 10^3$ тонн ядерного топлива с обогащением 4,2% по урану-235 может обеспечить работу 25–50 блоков ВВЭР-1000 в течение 40–50 лет. Суммарно в год будет выработано $(1,8–3,6) \cdot 10^{11}$ кВт час электроэнергии.

Что делать с 100–200 тонн оружейного плутония? Продавать плутоний — преступление перед человечеством. Уничтожать — недопустимо, плутоний — лучшее ядерное горючее. Плутоний — дорогостоящий искусственный химический элемент. Страна вынуждена хранить его, применяя все меры ядерной и радиационной безопасности, защиты хранилища от хищений и диверсий.

Можно плутоний использовать как стартовое ядерное горючее в ядерных реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением. В этом случае он будет производить материальную ценность — электроэнергию. Исчезает необходимость в специальных хранилищах.

Коэффициент воспроизводства в реакторе на быстрых нейтронах можно менять от 1,0 до 1,3. Можно работать в режиме самообеспечения: сколько сожгли плутония, столько и наработали. Можно работать в режиме расширенного вос-

производства — нарабатывать плутония больше, чем сжигать. Избыток плутония может быть направлен для стартовой загрузки вновь вводимых ядерно-энергетических установок. В случае необходимости ядерные реакторы могут вернуть кондиционный плутоний для нужд обороны.

100–200 тонн оружейного плутония могут дать старт 100–200 ядерным реакторам типа БН-600 или 60–120 ядерным реакторам электрической мощности 1000 МВт. Суммарно в год будет выработано $(4,2–8,4) \cdot 10^{11}$ кВт·час электроэнергии.

Жидкометаллические теплоносители дают возможность иметь на выходе из активной зоны ядерного реактора более высокую температуру теплоносителя, чем в водоохлаждаемых реакторах, а это приводит к более высокому коэффициенту полезного действия. Для получения одного и того же количества электроэнергии надо сжечь меньше ядерного топлива, а значит — получить меньше радиоактивных продуктов деления.

В легководных реакторах сжигается дорогой уран-235, в бридерах горит дешевый уран-238. Обедненный уран и выгруженное из легководных реакторов топливо можно сжечь практически полностью только в реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, используя замкнутый топливный цикл с радиохимической переработкой выгруженного топлива и многократной рециркуляцией ядерного топлива. Сжигая $(200–400) \cdot 10^3$ тонн обедненного урана, можно выделить $(1,6–3,2) \cdot 10^{22}$ Дж тепла, которое может быть превращено в $(4,4–8,8) \cdot 10^{15}$ кВт час электроэнергии. Для сравнения — в 1985 г. все электростанции Советского Союза выработали $1,5 \cdot 10^{12}$ кВт час электроэнергии.

Уже добытого, лежащего на складах урана столько, что его хватит России на столетия при переводе всей электроэнергетики на ядерное горючее.

Что выгоднее? Потратить дополнительные средства сейчас и через 15–20 лет иметь предельно безопасную ядерную энергетику на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением активной зоны, используя при этом накопленные огромные запасы ядерного топлива? Или, эволюционно улучшая ЛВР, продолжать иметь их основными работающими ядерными реакторами АЭС? Сделать ЛВР из-за специфики легкой воды предельно безопасными невозможно. Увеличение количества барьеров безопасности увеличивает стоимость АЭС и не создает физических основ безопасности. ЛВР могут сжечь не более 1% природного урана. Надо продолжать добычу природного урана. Должны продолжать работать обогатительные комбинаты.

Россия обладает уникальными запасами различных углеводородных энергоисточников, а также гидроресурсами. России никогда не придется делать ставку на один энергоисточник, каким бы хорошим он ни был.

Ядерные энергетические установки с использованием энергии деления ядер актиноидов нейтронами — основа современной ядерной энергетики. В настоя-

щее время подавляющая масса ядерных реакторов работает на тепловых нейтронах. Теплоносителем в таких ядерно-энергетических установках может быть легкая вода, гелий, жидкие металлы. Имея огромный опыт использования легкой воды в теплоэнергетике, естественно было использовать при создании первых энергетических установок легкую воду как теплоноситель, при этом она является и замедлителем нейтронов, что дает ей определенные преимущества.

Идея реакторов на быстрых нейтронах появилась приблизительно в то же время, что и идея реакторов на тепловых нейтронах. В Советском Союзе научным руководителем работ ядерных реакторов на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением был А.И.Лейпунский. В реакторах на быстрых нейтронах легкая вода не могла быть использована в качестве теплоносителя. Для бридеров нужно было с нуля освоить совершенно новый теплоноситель — жидкий металл, не замедляющий нейтроны, способный охлаждать высоконапряженную активную зону.

Делались попытки использовать в бридерах газовые теплоносители (гелий, CO_2 , N_2O_4). Принципиальным недостатком газовых теплоносителей является высокое давление. Разгерметизация приведет к полной потере теплоносителя. Вернуть теплоноситель снова в активную зону для аварийного расхолаживания невозможно. В активной зоне быстрого реактора нет массы, которая могла бы за счет своей теплоемкости взять на себя выделенную энергию. За счет остаточного тепловыделения разрушится даже заглушенная зона. Активная зона бридеров имеет высокое обогащение. Расплавление активной зоны может привести к образованию неконтролируемой критической массы со всеми тяжелейшими последствиями.

Имея высокую температуру кипения, жидкометаллические теплоносители дают возможность снимать энергию при низких давлениях в корпусе ядерного реактора. Решается один из важнейших вопросов безопасности — потеря теплоносителя при разгерметизации. Появляется возможность использовать баковую компоновку, в которой активная зона всегда находится под заливом теплоносителя.

Для атомных подводных лодок и, особенно, для космических кораблей, где весогабаритные характеристики играют решающую роль, жидкометаллические теплоносители оказываются вне конкуренции.

В настоящее время жидкометаллические теплоносители в реакторостроении используются мало.

Чего можно ожидать в будущем?

Была историческая необходимость, а не ошибка, создавать и усовершенствовать для железнодорожного транспорта паровозы, которые в настоящее время практически полностью заменены на тепловозы и электровозы. Это есть естественный процесс развития науки и техники.

Надо понять, что, используя легкую воду, нельзя создать большой ядерной энергетики. При преемственности всей накопленной культуры легководных ре-

акторов они должны уступить место реакторам на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением. Такая замена должна произойти, прежде всего, в электроэнергетике. Нельзя считать, что легководные реакторы были ошибкой. ЛВР выполнили свою задачу, они отвечали своему уровню понимания ядерной энергетики. Однако для будущей ядерной энергетики несравненно лучшими являются реакторы-бридеры на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением.

Высока роль радиохимии в большой ядерной энергетике. Весь поток ядерного топлива будет многократно проходить через радиохимическую обработку. Радиохимические производства должны отвечать самым жестким требованиям ядерной безопасности и не допускать выхода радиоактивности в окружающую среду. Для последующих операций с продуктами деления они должны быть глубоко очищены от актиноидов. Возможно, понадобится радиохимическое разделение актиноидов и продуктов деления.

В ядерном оружии цепная ядерная реакция должна пройти только один раз — во время ядерного взрыва. Все делается для того, чтобы не произошла несанкционированная ядерная реакция.

В активной зоне ядерной энергетической установки контролируемая цепная ядерная реакция идет непрерывно. Топливо при этом накапливает изотопы актиноидов и продукты деления. Металлоконструкции в зоне ядерной реакции и в ближайшем окружении становятся радиоактивными.

Опасность ядерной энергетики заключается в следующем:

1. Выход из-под контроля цепной ядерной реакции, при котором за короткое время выделяется такое количество энергии, с которым не может справиться система охлаждения.

2. Попадание высокорadioактивных продуктов в окружающую среду.

Теплоноситель — неотъемлемая часть ядерных реакторов большой единичной мощности. Теплоноситель — движущаяся среда, перемещаемая или принудительно, или за счет разности плотностей, для передачи тепла от более нагретого тела к менее нагретому.

Теплоноситель — единственный элемент в ядерно-энергетической установке, который постоянно присутствует, как в зоне ядерных реакций — активной зоне, так и вне ее.

Теплоноситель не должен поглощать нейтроны. Для ядерных реакторов на быстрых нейтронах теплоноситель не должен замедлять нейтроны. Для реакторов на тепловых нейтронах желательно иметь теплоноситель, который был бы хорошим замедлителем нейтронов. Реакторное излучение не должно образовывать в теплоносителе высокорadioактивных изотопов с достаточно большим периодом полураспада. Реакторное излучение не должно изменять физические, теплофизические, физико-химические свойства теплоносителя. Теплоноситель не должен быть подвержен в режиме нормальной эксплуатации радиолизу. В режиме рабочих температур теплоноситель не должен изменять физические, тепло-

физические, физико-химические свойства. Теплоноситель не должен быть подвержен пиролизу.

В случае аварии, сопровождаемой резким увеличением радиоактивного излучения и температуры, теплоноситель не должен утяжелять последствий аварии.

Крайне желательно, чтобы теплоноситель обладал низкой химической активностью.

Предпочтение должно быть отдано такому теплоносителю ядерно-энергетической установки, у которого лучшие теплофизические параметры: а) высокая температура кипения, б) низкая температура плавления, в) большая теплота парообразования, г) высокая теплоемкость, д) высокая теплопроводность, е) низкая вязкость, ж) небольшая плотность.

Желательно, чтобы теплоноситель: а) слабо взаимодействовал с реальными конструкционными материалами, б) слабо взаимодействовал с ядерным топливом, в) был совместим с рабочим телом (чаще всего с легкой водой, реже с газом) или веществами, которым надо отдать тепло, воспринятое теплоносителем в ядерном реакторе.

При рабочих температурах теплоноситель, войдя в контакт с воздухом, не должен загореться. Теплоноситель не должен перегреваться по отношению к температуре насыщения, а затем взрывообразно вскипать (при контакте с аварийно перегретым, разрушенным топливом), а также не должен вскипать и покидать активную зону при разгерметизации ядерного реактора и, соответственно, падении давления.

На выбор теплоносителя существенно влияют параметры, при которых предполагается осуществить термодинамический цикл. Теплоноситель, являющийся вполне удовлетворительным при одних параметрах, оказывается совершенно неприемлемым при более высоких параметрах. Естественно стремление в ядерно-энергетических установках иметь максимально высокий термодинамический КПД. Максимально высокая температура теплоносителя на выходе из активной зоны реактора определяет КПД всей ядерно-энергетической установки. Температурный уровень теплоносителя определяется работоспособностью конструкционных материалов в данном теплоносителе за заданное время. Для транспортных установок, где исключительно важными являются весогабаритные характеристики ядерно-энергетической установки, высокий температурный уровень теплоносителя становится решающим.

В результате многолетних исследований в странах, специализирующихся в реакторостроении, список веществ, могущих быть теплоносителями, оказался весьма ограниченным. Ожидать каких-либо чрезвычайно эффективных открытий не приходится. Идеального, универсального теплоносителя в природе нет. Теплоноситель должен соответствовать главной идее, закладываемой во вновь создаваемую ядерно-энергетическую установку.

Теплоноситель может быть химическим элементом, сплавом, смесью химических элементов, но не химическим соединением. Этому требованию не удовлетворяет теплоноситель современной ядерной энергетики — вода. Легкая вода — основной теплоноситель и рабочее тело в традиционной теплоэнергетике. В теплоэнергетике маловероятен пиролиз воды и полностью отсутствует радиолиз. Создавая первые конверторы и энергетические установки для атомных подводных лодок, ядерная энергетика стала использовать легкую воду как теплоноситель, замедлитель нейтронов и рабочее тело.

Вода имеет следующие принципиальные недостатки.

1. Вода — химическое соединение кислорода и водорода. В потоке реакторного излучения происходит радиолиз воды. Частично водород и кислород рекомбинируются. Часть кислорода окисляет металлоконструкции реактора. Часть водорода и кислорода в виде химических элементов остается в воде.

В аварийных ситуациях при достижении чехлами тепловыделяющих элементов температуры выше 800°C водяной пар становится окислителем, отдавая кислород на окисление. Окисленные чехлы тепловыделяющих элементов теряют механическую прочность. Топливо не удерживается в заданном положении и легко может быть обрушено. Образуется свободный водород. Без контакта с кислородом воздуха водород может создать газовый пузырь в активной зоне и тем самым ухудшить теплосъём. В случае выброса водорода в атмосферу почти наверняка произойдет химический взрыв.

2. Высокое давление ($t_{\text{кр}} = 374^{\circ}\text{C}$ при $P_{\text{кр}} = 22,13$ МПа).

Для получения приемлемых термодинамических параметров энергетической установки вода — теплоноситель — должна иметь высокое давление. При разгерметизации корпуса реактора вода под давлением истекает в окружающую среду. Потеря воды из АЗ приводит к осушению АЗ, резкому ухудшению съёма тепла.

Из-за низкой теплопроводности ядерного топлива в номинальном режиме температура топлива высока. Топливо аккумулирует много тепла. Это тепло при отсутствии теплосъёма может разогреть чехлы тепловыделяющих элементов до разрушения. В ядерном топливе, в котором заглушена цепная ядерная реакция, продолжают идти ядерные реакции, убывая со временем. Это остаточное тепловыделение при отсутствии или сильном нарушении съёма энергии может разогреть и топливо, и чехлы ТВЭЛов до аварийных температур.

3. Кризис кипения.

При не очень больших удельных тепловых потоках при нарушении циркуляционного режима теплоносителя по расходу, температуре, давлению может произойти замена интенсивного съёма энергии при пузырьковом кипении на пленочное кипение. Пленка создает дополнительное термическое сопротивление, резко возрастает температура ТВЭЛа. В участках, покрытых паровой пленкой, начнутся окислительные процессы — парциркулиевая реакция.

4. Паровой взрыв.

Контакт высокотемпературного топлива из разрушенных ТВЭЛов с остатками воды на дне корпуса реактора вызовет взрывообразное вскипание воды, ударный рост давления пара. Паровой взрыв может разрушить корпус реактора, трубопроводы, парогенераторы, сорвать крышку реактора со всеми органами, управляющими цепной ядерной реакцией.

5. Низкий КПД.

ЛВР имеет КПД примерно 33% против 45% для реакторов, охлаждаемых жидким металлом. Более низкий КПД ЛВР вызывает необходимость для получения одного и того же количества электроэнергии сжечь больше ядерного горючего, получить больше продуктов деления, приводит к более сильному тепловому засорению окружающей среды в районе атомной станции.

6. Вода — замедлитель нейтронов.

На тепловых нейтронах нельзя сжечь: а) больше 1% природного урана; б) обедненный природный уран, из которого извлечена часть урана-235 для военных нужд, а также для обогащения ядерного топлива работающих ЛВР для АЭС и атомных подводных лодок; в) нарабатываемые в АЗ ЛВР америций, кюрий, нептуний.

7. Проплавление обрушенным энерговыделяющим ядерным топливом dna корпуса ядерного реактора.

В случае потери водяного теплоносителя (что практически неизбежно при разгерметизации первого контура из-за высокого давления воды) и обрушения ядерного топлива вследствие недопустимого перегрева и разрушения ТВЭЛов энерговыделяющее ядерное топливо может проплавить дно корпуса реактора. Температура плавления нержавеющей стали составляет примерно 1500°C. Однако если при взаимодействии ядерного топлива с корпусной сталью образуется эвтектика U-Fe, имеющая температуру плавления около 600°C, то проплавление dna корпуса реактора с выбросом за пределы корпуса высокоактивных актиноидов и продуктов деления становится более вероятным, если не сказать — неизбежным.

Как меру предотвращения такой катастрофы следовало бы иметь внутри корпусов ЛВР в их донной части аварийные сборники под активной зоной, что позволило бы предотвратить прямой контакт обрушенного ядерного топлива и с dnом корпуса реактора.

Любям нужна только предельно безопасная энергетика. Если произойдет второй Чернобыль в любой из стран, владеющих атомными электростанциями, то ядерная энергетика будет на многие годы остановлена.

На теплоэнергетических установках за многие годы их существования были аварии, но не было катастроф. Аварии на тепловых электростанциях носят, во-первых, локализованный в пространстве, во-вторых, разовый характер без растянутого во времени вредоносного воздействия на людей и окружающую природу. Ядерная энергия при всех своих принципиальных преимуществах пе-

ред другими энергоисточниками имеет два присущих ей принципиальных недостатка:

1. Возможность на действующих энергетических установках возникновения неконтролируемой цепной ядерной реакции, при которой взрывообразно выделяется такое количество энергии, что само ядерное горючее, все конструкции, его окружающие, могут не просто разрушиться, а испариться. При химических взрывах возникает температура в несколько тысяч градусов, при ядерном взрыве в пределе — в миллионы градусов. Графитовая пыль, обнаруженная вокруг ЧАЭС после аварии, говорит о том, что температура в зоне аварии, по крайней мере, превышала 4200°C — температуру сублимации графита.

2. При цепной ядерной реакции образуются поток нейтронов, продукты деления актиноидов, радиоактивные актиноиды. Периоды полураспада возникших изотопов составляют от долей секунды до многих тысячелетий. Реакторное излучение создает наведенную радиоактивность в конструкционных материалах реактора и в теплоносителе. При нарушениях регламента эксплуатации и авариях радиоактивные продукты могут попасть в окружающую среду. Радиоактивность губительна для всего живого, и прежде всего для человека.

Особенность радиоактивности — ее нельзя ни уничтожить, ни нейтрализовать химическими методами. Уничтожить радиоактивность можно только ядерными реакциями, переводя радиоактивные изотопы в стабильные, долгоживущие или короткоживущие изотопы, либо разрушая ядро изотопа. Некоторые радиоактивные продукты образуют легкорастворимые в воде соединения, что создает особую опасность.

Предельно безопасной ядерная энергетика может быть только в том случае, если можно в принципе исключить разгон цепной ядерной реакции и решить проблему, связанную с накоплением радиоактивных отходов.

Надо различать радиоактивное наследие, полученное от военной программы, и радиоактивность, непрерывно образующуюся в энергетических ядерных реакторах при их работе. Радиоактивные отходы военной программы — это плата за незнание и вынужденную поспешность при создании ядерного оружия. Столкнувшись с угрожающими масштабами искусственной радиоактивности, не имея ни достаточных знаний и опыта, ни времени на их приобретение, ядерные державы добились успеха в создании ядерного оружия большой ценой.

Созданная радиохимическая переработка облученного топлива была направлена на извлечение оружейного $^{239}_{94}\text{Pu}$, содержащего малое количество продуктов деления и других изотопов плутония.

Для большой ядерной энергетике потребовалось решение следующих глобальных задач:

1. Переработка больших масс выгружаемого из ядерных реакторов ядерного топлива, содержащего большое количество радиоактивных изотопов.

2. Отделение актиноидов от продуктов деления. Актиноиды превращаются в ядерное топливо и вновь поступают в ядерные реакторы.

3. Продукты деления, которые, как правило, имеют сравнительно короткие периоды полураспада, должны быть хорошо очищены от актиноидов, которые имеют большие периоды полураспада. Продукты деления должны быть направлены на захоронение, хранение или трансмутацию. Зоны захоронения должны быть гарантированы от разрушения, как вследствие геологических воздействий и изменений, так и в результате непродуманных либо умышленных вмешательств людей. При хранении продуктов деления возникают вопросы, требующие специальной научной проработки: в чем хранить, как хранить, как в случае необходимости обеспечить эвакуацию хранилищ.

4. Немаловажный вопрос — что делать с большими массами конструкционных материалов и графитом с наведенной радиоактивностью? Может быть, целесообразно продукты деления упаковывать в конструкционные сплавы с наведенной радиоактивностью, извлекаемые из активных зон вместе с отработавшим ядерным топливом.

Основополагающий вклад в создание предельно безопасных ядерно-энергетических установок и в уничтожение радиоактивных отходов для большой электроэнергетики двадцать первого века может внести ускорительная наука и техника.

В основу идеи электроядерной энергетики с использованием мощных ускорителей заряженных частиц закладывается следующий физический процесс. При бомбардировке мишеней из тяжелых элементов (например, из свинца) пучками релятивистских заряженных частиц (в частности, протонов с энергией порядка 1 ГэВ) образуется каскад быстрых нейтронов (до 50 и более нейтронов на каждый протон). Это открывает принципиально новые перспективы как в исключении неконтролируемых ядерных процессов в реакторах деления (т.е. разгона цепной реакции со всеми его катастрофическими последствиями), так и в трансмутации радиоактивных изотопов.

Для практического применения ускорителей для трансмутации должны быть проведены научные исследования и экономические оценки, которые позволят ответить на следующие вопросы.

1. Какая нужна энергия и плотность ионного (протонного) пучка для тех или иных радиоактивных изотопов и сколь реально создание ускорителей требуемой мощности (прежде всего по интенсивности пучков)?

2. Возможна ли трансмутация смеси радиоактивных изотопов или нужно каждый изотоп трансмутировать в своем режиме?

3. Какая нужна очистка от посторонних химических элементов для трансмутации данного изотопа?

4. Энергетический и временной режим трансмутации. Глубина трансмутации.

5. Технология и принципы изготовления мишени из высокорadioактивных изотопов.

6. Какова будет наведенная radioактивность в элементах конструкции мишени?

7. Гарантированный съём энергии с мишени, чтобы мишень ни в коем случае не была расплавлена, чтобы radioактивность не попала в окружающую среду.

8. Мишени должны отвечать всем требованиям радиационной безопасности.

9. Пути утилизации энергии, выделяемой в мишенях при трансмутации больших масс продуктов деления.

10. Как выгоднее уничтожать Np , Am , Cm — в АЗ ядерных реакторов на быстрых нейтронах или облучая их потоком ионов (протонов)?

Для большой ядерной энергетики с большими массами ядерного топлива, загружаемого и выгружаемого из ядерных реакторов, необходимо свести к минимуму радиоактивные продукты, подлежащие хранению или захоронению. Хранение и захоронение не могут полностью снять вопрос аварийного попадания радиоактивности в окружающую среду. Только трансмутация — уничтожение радиоактивных продуктов — может решить вопрос уничтожения радиоактивных отходов (если не в полном объеме, то хотя бы подавляющих количеств).

Теперь рассмотрим второй аспект обеспечения предельной безопасности ядерной энергетики.

Для возможности выделять контролируемую энергию в течение достаточно длительного времени в современных гетерогенных ядерных реакторах изначально загружается избыток ядерного горючего, который компенсируется стержнями — поглотителями нейтронов. При нарушении нейтронного баланса ядерный реактор может или заглохнуть, или пойти в разгон.

Для полной гарантии невозможности реактивной аварии в АЗ должно загружаться меньше ядерного горючего, чем требуется для возникновения самоподдерживающейся цепной ядерной реакции. АЗ становится критичной только за счет потока нейтронов, получаемого извне от постороннего источника.

Таковыми источниками нейтронов могут быть:

1. *Импульсный реактор деления.*

Предполагается импульсное введение в подкритическую АЗ добавочного количества делящегося материала, которое само также подкритично.

Впервые в мире такой исследовательский реактор в 60-х годах был создан в Дубне под руководством Д.И. Блохинцева.

2. *Двухзонный ядерный реактор деления.*

Основная часть АЗ — реактор на тепловых нейтронах — подкритична. Подсветка быстрыми нейтронами осуществляется от небольшого ядерного реактора на быстрых нейтронах. Все меры реактивной безопасности, включая самогашение при повышении температуры теплоносителя, осуществляются на реакторе на быстрых нейтронах.

3. *Подсветка нейтронами, полученными от реакции синтеза* на термоядерном реакторе с инерциальным удержанием плазмы.

Такой гибридный ядерный реактор, очевидно, наиболее реальный путь к использованию в энергетике энергии синтеза. Накопленный в реакторостроении опыт обеспечивает создание подкритичного ядерного реактора деления.

4. *Подсветка нейтронами, полученными от реакции взаимодействия ионного (протонного) пучка с мишенью.*

Ионный пучок нужной энергии частиц и интенсивности получают на ускорителе заряженных частиц.

Ядерно-энергетическая установка с нейтронной подсветкой от ускорителя состоит из:

1) ускорителя заряженных частиц, работающего в энергетическом режиме — тысячи часов непрерывной работы с изменением заданной энергии частиц (порядка 1 ГэВ для протонов) в пределах не более 5–10% и с достаточно высокой интенсивностью пучка (исходя из комплексных задач энергетики и трансмутации плотность протонов должна составлять не менее 10^{13} – 10^{14} р/ск).

2) мишени для преобразования ускоренных частиц в нейтроны.

3) подкритичной активной зоны из делящегося вещества (например, естественного или обедненного урана).

4) системы циркуляции теплоносителя, осуществляющей съём энергии в АЗ (в заданных температурных режимах) и отдающей тепло преобразователю энергии.

В ядерно-энергетической установке с нейтронной подсветкой появляются два совершенно новых дополнительных агрегата: ускоритель элементарных частиц и мишень — преобразователь ионного потока в нейтронный. Мировая практика не имеет опыта создания таких ядерно-энергетических установок. В то же время исчезает механическая система управления органами регулирования мощности и аварийной остановки — процесс управляется и контролируется включением и отключением электропитания ускорителя.

Режим работы ускорителя подчиняется сигналам, получаемым от датчиков, управляющих энерговыделением в АЗ и съёмом энергии в АЗ. Пуск и остановка ускорителя, энергия ионного пучка подчинены режиму работы АЗ.

Должна быть обеспечена гарантия, что аварийный сигнал гашения цепной ядерной реакции, полученный от датчиков АЗ, будет однозначно выполнен с нужной скоростью.

Недопустимо, чтобы АЗ, находящаяся в предаварийном и аварийном состоянии, продолжала получать нейтронную подсветку.

Пуск всех звеньев энергетической установки должен быть подчинен строгому регламенту и осуществляться как оператором вручную, так и в автоматическом режиме под контролем оператора.

Работоспособность конструкционных материалов, из которых сделана ЯЭУ, лимитирует температурный уровень теплоносителя на выходе из АЗ. В совре-

менных ЯЭУ существует четкая зависимость между выделяемой в АЗ за счет цепной ядерной реакции энергии и интенсивностью её съёма теплоносителем. Не допустимо: превышение заданного уровня выделяемой энергии; уменьшение расхода теплоносителя и повышение его температуры на входе в АЗ при зафиксированной мощности.

В обычных ЯЭУ механическое перемещение в АЗ органов регулирования обеспечивает заданное энерговыделение. Насосы осуществляют циркуляцию теплоносителя, обеспечивают на заданном температурном уровне съём энергии в АЗ и передачу тепла преобразователям энергии.

В ЯЭУ с нейтронной подсветкой циркуляция теплоносителя остается такой же, как и в ныне существующих ЯЭУ. АЗ должна быть на протяжении всей работы, при изменении изотопного состава ядерного топлива, подкритичной. Гарантированная подкритичность и невозможность несанкционированного увеличения энергии, подаваемой нейтронным потоком в АЗ, создает гарантию невозможности возникновения самой тяжелой аварии — реактивностью.

Мощность ЯЭУ с нейтронной подсветкой регулируется нейтронной подсветкой, поступающей от мишени.

В такой установке нет необходимости иметь в АЗ стержни-поглотители нейтронов для регулирования мощности и аварийной остановки, хотя из-за отсутствия опыта на первых образцах таких ЯЭУ на всякий случай можно предусмотреть аварийные стержни гашения цепной ядерной реакции с механическим приводом. Управление цепной ядерной реакцией не механическим перемещением стержней-поглотителей, а электрической схемой дает возможность увеличить быстродействие, что очень важно при аварийном разгоне реактора. Электронное управление ядерным реактором снимает вопросы возможного нарушения геометрии стержней и их заклинивания, а также возможность несанкционированного вывода стержней-поглотителей из АЗ. Вместе с тем ЯЭУ с нейтронной подсветкой становится более сложной по сравнению с традиционными ЯЭУ.

Ни при каких обстоятельствах ускоритель не должен выделить больше энергии, чем это предусмотрено регламентом, не должен продолжать выдавать энергию, если в АЗ аварийно нарушен расход теплоносителя или температурный режим.

Ускоритель элементарных частиц должен плавно, с заданной скоростью, осуществлять набор мощности ЯЭУ или плавную остановку. В зависимости от спектра нейтронов реактивность может уменьшаться или увеличиваться. Подсветка должна отслеживать изменение реактивности. При всех режимах выработки энергии цепная реакция не должна ни заглохнуть, ни пойти в разгон. В подкритичной АЗ запас подкритичности должен быть оптимизирован во времени.

Ионный ускоритель и мишень, входящие в ЯЭУ, повышают безопасность ЯЭУ. За безопасность надо платить. Стоимость кВт установленной мощности и стоимость кВт часа электроэнергии, конечно, повысятся по сравнению с ныне су-

ществующими ЯЭУ. Работа ускорителя потребует увеличения затрат электроэнергии «на собственные нужды». Чем больше будет подкритичность, тем больше придется тратить электроэнергию — более дорогой энергии, чем тепловая.

Мишень — это по сути малая по мощности, всегда подкритичная энергетическая установка со всеми требованиями по ядерной и радиационной безопасности. Мишень должна иметь съём энергии. Тепло, снимаемое с мишени, необходимо утилизировать. В процессе работы мишень становится высокорadioактивной. Необходимо решить вопрос — что делать с отработанными мишенями?

Должна быть оптимизирована энергия нейтронов, получаемых в мишени. Авария на мишени не должна приводить к радиоактивным выбросам. Авария мишени должна гасить цепную ядерную реакцию в некритической АЗ.

Ускоритель и мишень — два элемента, никогда ранее не использовавшиеся в ядерной энергетике.

Ускорители, как экспериментальные установки, широко используются в физических институтах для научных исследований. Ускорители с самого начала изучения ядерной энергии и физики ядра внесли основополагающий вклад.

1. Первые микрограммы нового химического элемента, отсутствующего в природе, — плутония, ставшего основой ядерного оружия и ядерной энергетики, были получены из ${}_{92}^{238}\text{U}$ с помощью ускорителя заряженных частиц.

2. С помощью ускорителей изучаются ядерно-физические константы элементов, находящихся в зоне цепной ядерной реакции.

3. Ускорители производят изотопы, нужные для науки, медицины, техники.

Для энергетики нужны ускорители, непрерывно работающие в режимах ядерной энергетики и обеспечивающие заданные параметры — энергию заряженных частиц и их плотность — на выходе из ускорителя. Такой ускоритель еще нужно создать.

Главный смысл создания ядерно-энергетической установки с нейтронной подсветкой — полностью исключить самые опасные у современной ядерной энергетики — реактивностные — аварии, которые по тяжести не идут ни в какое сравнение с самыми тяжелыми авариями в теплоэнергетике.

Низкие цены на углеводородное топливо в настоящее время — явление временное. Когда начнут работать АЭС с нейтронной подсветкой, цены на углеводородное топливо будут значительно выше ныне существующих.

Если будут созданы ускорители нужных параметров, способные работать в энергетическом режиме, то они смогут решить 3 очень важных вопроса.

1. Нейтронная подсветка всегда подкритичной АЗ.

В таком реакторе при фиксированной мощности нет избыточного количества нейтронов, которые надо удалять из цепной ядерной реакции. Управление цепной ядерной реакцией осуществляется не перемещением стержней, поглощающих избыточные нейтроны, а потоком нейтронной подсветки всегда подкри-

тичной АЗ. Управление осуществляется электрической схемой, значительно менее инерционной и более надежной.

2. Сжигание продуктов деления, используя ускорительную технику. Это может свести к минимуму количество радиоактивных отходов со всеми их проблемами. Ядерная энергетика с минимальным количеством радиоактивных отходов оказывает принципиально другое воздействие на окружающую среду.

3. Наиболее короткий путь к освоению управляемой термоядерной энергии лежит, очевидно, через осуществление обжата ($D + T$)-мишени пучком ионов.

В восьмидесятых-девяностых годах в России и за рубежом проводились не в очень большом объеме научно-исследовательские работы по использованию лазерных лучей, обжимающих мишень из ($D + T$) для инициирования термоядерного синтеза. Отсутствие финансирования и организационная неразбериха в стране не дали возможности создать лазерные установки нужных параметров. Работы по созданию пилотной гибридной энергетической установки были прекращены.

Идея инерционного удержания термоядерной плазмы может быть осуществлена использованием для обжата мишени пучка ионов нужной энергии и плотности, получаемого на ускорителе заряженных частиц. Пучок ионов может быть как протонный, так и из более тяжелых ионов. Это дает возможность оптимизировать процесс сжатия плазмы и ее удержания.

Признать, что можно сделать более безопасную, а в будущем более экономически целесообразную ядерную энергетiku, тем организациям и людям, которые много сделали для ныне существующей энергетики, очень не просто. Надо в двадцать первом веке создать другую ядерную электроэнергетику, учитывающую все плюсы и минусы ныне существующей; создать новую ядерную энергетiku, базирующуюся на других научных, технологических, инженерных и конструкторских принципах. Создание предельно безопасной ядерной энергетики должно стать национальной задачей. Основные научные принципы такой энергетики:

1. Деление актиноидов осуществляется быстрыми нейтронами.

2. Активная зона всегда гарантированно подкритична. Слишком глубокая подкритичность понижает КПД ядерно-энергетической установки, т.к. больше придется тратить электроэнергию на ускорителе. Слишком малая подкритичность не допустима в принципе, т.к. может появиться возможность неконтролируемой цепной ядерной реакции.

3. Нейтронная подсветка активной зоны осуществляется от постороннего источника. Необходима оптимизация энергии нейтронов подсветки.

4. Мощность ядерного реактора изменяется не перемещением стержней поглотителей нейтронов, а изменением энергии нейтронного потока подсветки.

5. Энергия подсветки меняется с изменением подкритичности активной зоны в процессе эксплуатации.

6. Нейтронная подсветка однозначно реагирует на температуру и расход теплоносителя.

7. Аварийное уменьшение расхода теплоносителя и рост температуры теплоносителя должны приводить к аварийному отключению нейтронной подсветки.

8. Аварийная остановка осуществляется не введением с конечной скоростью аварийных стержней поглотителей, а прекращением нейтронной подсветки.

9. Аварии в системе нейтронной подсветки не должны приводить к аварии ядерно-энергетической установки. В принципе не допустимо неконтролируемое увеличение нейтронной подсветки от заданной режимом эксплуатации энергетической установки.

10. Для съёма энергии используется жидкометаллический теплоноситель.

11. Используются баковая компоновка ядерного реактора и трехконтурная схема передачи тепла от активной зоны к преобразователю энергии. В баке находится достаточная масса теплоносителя для аварийного расхолаживания.

12. Возможно использование тепловых труб на цезии ($t_{\text{кип}} = 670^\circ\text{C}$) для аварийного расхолаживания. В режиме нормальной эксплуатации тепловые трубы не сбрасывают тепло. При достижении 700°C они начинают интенсивно работать.

13. Ядерное топливо обогащено высокофоновым плутонием.

14. Осуществляется оптимизация сжигания малых актиноидов с использованием быстрых нейтронов активной зоны или ускорительной техники.

15. Производится трансмутация максимального количества продуктов деления.

16. Осуществляется замкнутый топливный цикл.

17. Обеспечивается максимальное сокращение потерь радиоактивных продуктов в замкнутом топливном цикле.

18. Осуществляется многократное использование жидкометаллического теплоносителя в ядерно-энергетических установках следующего поколения.

19. Прорабатывается многократное использование конструкционных материалов с высокой наведенной радиоактивностью в металлоконструкциях активной зоны ядерных реакторов.

20. Обеспечивается самозащитенность системы управления ядерно-энергетической установки от команд, противоречащих логике управления.

В будущем возможны такие ядерно-энергетические установки с нейтронной подсветкой, когда ионные пучки будут направлены прямо в активную зону, если она охлаждается эвтектикой свинец-висмут. Исчезнет необходимость иметь мишень. Если можно будет иметь от ускорителя несколько ионных пучков разной мощности, то можно будет выравнять по радиусу энергосвечение в активной зоне.

Противники ядерной энергетики видят в ней только отрицательное, доходят до требования отказаться от атомной электроэнергетики, закрыть все работающие АЭС. Закрытие всей ядерной энергетики во всех странах невозможно без необходимости в течение длительного времени охранять и наблюдать за выгруженным ядерным топливом. Ядерная и радиационная опасность в выгруженном то-

пливе не исчезают в течение длительного времени. В этом отрицательная специфика ядерной энергии. Сохраняются большие материальные затраты. Энергия не вырабатывается — отсутствуют прибыли. Возникнет энергетический и финансовый кризис во всех странах, имеющих в настоящее время атомные электростанции.

Человечество в погоне за сверхоружием вошло в ядерный туннель, и выход есть только один — сделать ядерную энергетику максимально безопасной.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 апреля 1999 года.