

ДВАДЦАТЬ ПЕРВЫЙ ВЕК — ВЕК ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В. И. Субботин

Российская Академия наук, Москва

ВВЕДЕНИЕ	334
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ	336
ГЛОБАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ	340
СТАНОВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	342
РЕАКТОРЫ ДЕЛЕНИЯ	344
ЯДЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	346
АВАРИИ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	349
ЗАДАЧИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	352
ЛЕГКАЯ ВОДА КАК ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ	357
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОСТИ	359
ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ЯЭУ	360
ОРУЖЕЙНЫЙ ПЛУТОНИЙ	371
РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ	374
МАКСИМАЛЬНО БЕЗОПАСНЫЕ ЯЭУ	376
РЕАКТОРЫ ДЕЛЕНИЯ С НЕЙТРОННОЙ ПОДСВЕТКОЙ	378
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	384

ДВАДЦАТЬ ПЕРВЫЙ ВЕК — ВЕК ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В. И. Субботин

Российская Академия наук, Москва

Для нормальной жизнедеятельности развивающегося человеческого общества требуется все большее количество источников энергии. В настоящее время существует значительная разница в потреблении энергии странами, находящимися на разном уровне экономического развития. Угледородное топливо — основной источник энергии в XX веке — не сможет удовлетворить потребности XXI века. Реально человечество в XXI веке может рассчитывать на солнечную энергию, энергию деления тяжелых ядер (атомная энергия) и синтез легких ядер (термоядерная энергия).

Все эти энергетические источники практически неиссякаемы. Везде, где это возможно, нужно использовать солнечную энергию, но на ней большую энергетику создать нереально. Для развития солнечной энергетики нужно решить глобальный вопрос об аккумуляции больших количеств энергии с хорошим коэффициентом полезного действия.

Реальным источником энергии, который может покрыть все потребности, является энергия тяжелых ядер. Существующие во всем мире атомные электростанции — конверсия военных программ — это реакторы на тепловых нейтронах, охлаждаемые легкой водой. По ряду причин, изложенных в данной работе, они не могут стать основой энергетики будущего.

В обзоре рассматриваются пути создания ядерной энергетики, использующей деление тяжелых ядер. Имеется реальная возможность создать следующее поколение атомных электростанций, лишенных недостатков ныне действующих АЭС. Эти атомные электростанции будут максимально безопасными, имеющими минимальное количество радиоактивных отходов, сжигающими почти весь природный уран, а при необходимости и торий, экономически целесообразными и защищенными от терроризма*.

Normal activity of developing human society demands constant growth of energy sources. Currently, essential difference in energy consuming exists between countries at different levels of economic development. Hydrocarbon fuel — basic energy source of the 20th century — will be unable to satisfy the necessities of the 21st century. In fact in the 21st century the humanity may rely on such sources as solar energy, energy of heavy nuclei fission (atomic energy) and energy of light nuclei fusion (thermonuclear energy).

All these power sources are practically inexhaustible. Solar energy could be used everywhere, where it is possible, but it does not permit one to create the Great Energetics: the global problem of massive energy accumulation with high efficiency should be solved first.

In reality it is the atomic energy that is capable to cover all the energy necessities. The atomic power stations existing all over the world are the product of military programmes. Most of them are

*Настоящая статья отражает личные взгляды академика В. И. Субботина, известного специалиста по ядерным реакторам, на проблемы современной ядерной энергетики. (Редакция журнала ЭЧАЯ).

thermal reactors with light water coolant. By some reasons discussed in the present work they cannot be looked upon as the basis of energetics of future.

The ways of future energetics creation based on heavy nuclei fission are considered in the paper. There is real possibility to develop the next generation of atomic power plants free from nowadays station defects. These stations will possess such advantages as: maximum safety, lowest radioactive wastes, deepest natural uranium (and thorium, if necessary) burn up, protection against terrorism.

*Здесь нужно, чтобы душа была тверда,
Здесь страх не должен подавать совета.*

А. Данте.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для современного общества источники энергии играют особо важную роль. Чтобы иметь высокий жизненный уровень, страна должна иметь в достаточном количестве разнообразные источники энергии для электроэнергетики, промышленности, сельского хозяйства, автомобильного, авиационного, морского транспорта, отопления и бытовых нужд. Многие развитые страны, не имея в достаточном количестве своих национальных источников энергии, вынуждены покупать их на мировом рынке. Спрос на углеводородное топливо во всем мире непрерывно растет. Ряд стран покупают для своей атомной электроэнергетики природный уран и ядерное топливо. Страна, которая не имеет в достаточном количестве источников энергии и не имеет средств покупать их, обречена на нищету.

Автомобильный и авиационный транспорт оказывают сильное воздействие на образ жизни современного человека. За время менее суток можно очутиться на другом континенте. Расстояние в сотни километров не является преградой для ежедневного общения людей.

Нефть, как источник энергии для транспорта, приобрела особое значение. В принципе, используя другие источники, можно сократить потребление нефтепродуктов. Так, например, электроэнергетика может в ряде случаев прямо заменить нефтепродукты, используя электроэнергию вместо жидкого топлива (например, электрификация железных дорог), и косвенно, вырабатывая аккумулирующие энергию вещества и, прежде всего, водород из воды. Для получения таких энергоносителей потребуется тратить первичную энергию с коэффициентом полезного действия меньше единицы.

Если современные люди за несколько десятилетий исчерпают все запасы нефти и природного газа, то это будет проявлением высшего эгоизма. Современное общество не на словах, а на деле должно подумать об обеспечении людей в недалеком будущем нефтью и природным газом — уникальными природными источниками энергии, на которые ориентирована большая часть энергопотребляющей деятельности человечества конца двадцатого века.

Очевидно, не правомочно при определении запасов нефти и природного газа рассматривать эти запасы до полного их изъятия. Надо обязательно оставлять неприкосновенный запас, которого хватило бы на достаточное количество лет, необходимых для коренной переориентации по источникам энергии. Если человечество извлечет нефть из Земли до конца, то оно поставит себя перед катастрофой более значительной, чем любые экологические катаклизмы.

Полезные ископаемые, запасов которых, при самом высоком темпе потребления, хватит на тысячелетия (как это имеет место с природным ураном и торием в литосфере), имеют принципиальные преимущества перед полезными ископаемыми (нефть и природный газ), которых хватит на десятилетия. Ошибки в прогнозировании запасов во втором случае критичны. В первом случае ошибки в прогнозировании даже на порядки величины не носят принципиального характера, т.к. запасы энергии в ядерном топливе колоссальны.

В конце XX века появились серьезные работы по экологии и законодательной защите природы. Культура добычи, транспортировки и использования источников энергии — основная составляющая часть защиты природы. Настоящие природоохранные мероприятия стоят очень больших денег. Чем ближе мы будем подходить к моменту исчерпания нефти, тем острее станут приоритеты ее использования. В старых нефтеносных районах добывать нефть, оставшуюся в недрах Земли из-за несовершенных методов извлечения, пока сложно технологически, а экономически не всегда целесообразно.

В самое ближайшее время станет жизненно важным сократить расход ценнейшего углеводородного топлива в электроэнергетике, осуществляя на деле жесткую энергосберегающую политику. Надо не затягивать переход электроэнергетики на большую, максимально безопасную во всех звеньях ядерную энергетику с замкнутым топливным циклом и экологически чистую электроэнергетику на каменном угле.

Средства, которые нужно затратить на большую ядерную энергетику, вполне соизмеримы с тем, что придется тратить при исчерпании нефти и переходе на другие источники энергии, прежде всего для транспорта. Разница только в том, что в первом случае деньги нужны сегодня, но мы сэкономим нефть для первоочередных потребителей; во втором случае деньги понадобятся через 20—30 лет и при этом нефть станет раритетом.

Переход с нефтепродуктов на вещества, аккумулирующие энергию, затронет большинство энергопотребителей, а для получения таких веществ все равно придется создавать большую ядерную энергетику.

Человечество, после ядерных взрывов и аварий на АЭС и радиохимических заводах со страхом и недоверием относящееся к ядерной энергетике, все-таки будет вынуждено максимально широко использовать ее в электроэнергетике, а в будущем (при создании максимально безопасных ядерных энергетических установок) и в других областях, потребляющих энергию. Дру-

гих таких концентрированных источников энергии в природе нет. Заключенная в ядерном горючем энергия может обеспечить потребности человечества на тысячелетия.

При всей сложности настоящего времени следует внимательно отнестись к вопросам обеспечения страны источниками энергии в будущем. Россия имеет уникальные запасы углеводородного топлива, но и им когда-то придет конец.

2. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

При всем многообразии освоенных методов получения энергии электрические станции, вырабатывающие электроэнергию и тепло в промышленных масштабах, используют в настоящее время следующие источники энергии:

- 1) углеводородные — каменный уголь, природный газ, мазут;
- 2) гидроэнергию;
- 3) атомную энергию.

Ядерная энергетика должна стать главным источником энергии в XXI веке. В конце XX века этого не произошло по ряду причин, прежде всего из-за наличия достаточного количества нефти и природного газа на мировом рынке по умеренным ценам, аварий на атомных станциях, вызвавших недоверие к АЭС, а также из-за отсутствия убедительных концепций ядерной и радиационной безопасности.

Получение тепловой энергии при сжигании углеводородного топлива в тепловых машинах в силу простоты физических принципов таких процессов всегда будет дешевле, чем в ядерных и термоядерных реакторах, осуществляющих преобразование ядерной энергии в тепло. Самые тяжелые аварии на тепловых станциях не идут ни в какое сравнение по возможным последствиям с даже средними по тяжести авариями на атомных станциях. Современная ядерная энергетика оставляет после себя радиоактивное наследие, но не потребляет кислород из атмосферы и не усиливает парниковый эффект.

Сжигание углеводородного топлива в паровых котлах, автомобилях, самолетах влияет на увеличение содержания парниковых газов в атмосфере, и прежде всего углекислого газа. Возможны локальное снижение содержания в воздухе кислорода в плохо проветриваемых местах, выбросы в воздушный бассейн пыли, окислов серы и азота, не сгоревших углеводородов. Удержание, в пределах безопасной концентрации для людей и природы, пыли SO_2 , NO_x , не сгоревших углеводородов сильно повышает стоимость энергетических установок на углеводородном топливе. Использование углеводородного топлива без природоохранных мероприятий недопустимо. Удержание углекислого газа из-за его количества нереально.

Увеличение стоимости углеводородных источников энергии, их добычи и транспортировки, затрат на защиту окружающей среды может в экологическом плане сделать безопасную ядерную энергетику более выгодной, чем углеводородная. Уже в настоящее время в мире есть районы, где экономически выгоднее использовать атомную энергетику.

Нужна ли атомная энергетика? Можно ли ее сделать безопасной? Эти вопросы задают сегодня профессионалы, прямо или косвенно связанные с энергоресурсами, энергетикой, экологией и экономикой. Эти вопросы задают обыватели — потребители электроэнергии, тепла, моторного топлива, получающие хлесткую информацию из газет, по телевидению и радио.

У людей, живущих в конце XX века, имеется целый набор источников энергии. Одни из них привычны и хорошо освоены, например, нефть, природный газ, каменный уголь, энергия текущей воды. Другие, например, энергия деления тяжелых ядер, получили уже значительное применение. Солнечная энергия — в виде прямого использования — завоевывает свое место. Строго говоря, органическое топливо — это аккумуляция солнечной энергии предыдущих геологических эпох. В стадии научного поиска находится синтез легких ядер. Нет неизбежной необходимости иметь один источник энергии.

Начало XX века характеризуется глобальным использованием нефти. Нефть — лучший из всех известных человечеству источников энергии, ее легче, чем другие источники энергии, добывать из земли, и легко транспортировать на любые расстояния, используя танкерный флот и трубопроводный транспорт. Транспортировка нефти происходит при нормальных температурах и низких давлениях.

В середине XX века природный газ стал использоваться как источник энергии. Природный газ легко добывать из Земли. Под высоким давлением по газопроводам его можно транспортировать на большие расстояния. Природный газ — экологически самое чистое углеводородное топливо. При нормальном горении конечными продуктами являются пары воды и углекислый газ. Природный газ широко используется в быту, в городских котельных, тепловых электростанциях в черте крупных городов.

Магистральные газопроводы служат 25—30 лет, после чего они должны быть заменены новыми. Относительная эффективность в создании парникового эффекта CO₂ — 1; природный газ — 27. Потери газа при добыче, транспортировке по трубопроводам и использовании по месту назначения, так же, как и продукты сгорания, влияют на парниковый эффект. При авариях на газопроводах и газоперекачивающих станциях в атмосферу выбрасываются большие массы природного газа.

Каменный уголь, запасы которого значительно превосходят запасы нефти и природного газа, снова выходит в лидеры среди углеводородных источников энергии. Каменный уголь на месте добычи должен быть максимально освобожден от породы, ему сопутствующей. Это необходимо делать для це-

лесообразности его транспортировки на большие расстояния, а также исходя из экологических соображений. Породы содержат природные радиоактивные изотопы. Уловить пыль из дымовых газов котлов, если ее много, практически невозможно.

Нормально работающая современная атомная электростанция выбрасывает в окружающую среду меньше радиоактивных продуктов, чем нормально работающая тепловая электростанция той же мощности на каменном угле, содержащем много породы.

Остановимся на свойствах используемых энергетических ресурсов и объемах таких ресурсов в природе. В табл. 1 приведены значения энергии, выделяющейся при сжигании (для ядерного топлива — делении) единицы массы используемых веществ. Некоторые источники энергии остались за рамками табл. 1, как, например, ветер, солнечная радиация и др.

Таблица 1. Удельная теплота сжигания различных веществ

Материал	Теплота сгорания, Дж/кг
Условное топливо	$2,926 \cdot 10^7$
Каменный уголь	$(1,67 - 2,926) \cdot 10^7$
Нефть-сырец	$3,80 \cdot 10^7$
Природный газ	$3,89 \cdot 10^7$
Метан	$5,00 \cdot 10^7$
Водород газообразный	$1,20 \cdot 10^8$
Деление урана или тория	$\approx 8 \cdot 10^{13}$
Дейтерий и тритий при синтезе	$3,36 \cdot 10^{14}$
Дейтерий при синтезе	$3,46 \cdot 10^{14}$

Разумеется, распределение широко применяемых источников энергии географически крайне неоднородно. Оставляя этот вопрос открытым, рассмотрим объемы этих источников. Мировые запасы энергетических ресурсов представлены в табл. 2.

Для полного сжигания 1 кг углерода нужно 2,67 кг кислорода и при этом образуется 3,67 кг двуокиси углерода (CO_2). При полном сжигании 1 кг метана, состоящего из 0,75 кг углерода и 0,25 кг водорода, требуется 2 кг кислорода для сжигания углерода и 2 кг кислорода для сжигания водорода; в результате образуется 2,75 кг CO_2 и 2,25 кг воды. При получении 10^6 Дж тепла от сжигания углерода в атмосферу выбрасывается 0,109 кг CO_2 , а метана — 0,056 кг CO_2 .

Окислы азота (NO_x) образуются в зоне горения из азота воздуха; SO_2 образуется в углеводородном топливе, если имеются примеси серы. Продукты сгорания CO_2 , SO_2 , NO_x попадают в окружающую среду. При этом SO_2 и NO_x , перемещаясь с воздушными массами на большие расстояния, вызывают закисление почв, водоемов и рек, приводящее к гибели флоры и фауны.

Таблица 2. Мировые запасы энергоресурсов

Источник энергии	Известные запасы и тепловая энергия	Возможные запасы и тепловая энергия
Уголь, т	$(4,80 - 5,90) \cdot 10^{11}$	$(3,20 - 7,60) \cdot 10^{12}$
Дж	$(9,50 - 11,8) \cdot 10^{21}$	$(6,40 - 15,2) \cdot 10^{22}$
Нефть, т	$(90,0 - 100) \cdot 10^9$	$(20,0 - 35,0) \cdot 10^{10}$
Дж	$(3,40 - 3,80) \cdot 10^{21}$	$(7,60 - 13,3) \cdot 10^{21}$
Газ, м ³	$(52,0 - 78,0) \cdot 10^{12}$	$330 \cdot 10^{12}$
Дж	$(2,00 - 3,00) \cdot 10^{21}$	$12,8 \cdot 10^{21}$
Уран, т	$(1,75 - 2,36) \cdot 10^6$	—
Дж	$(1,4 - 1,9) \cdot 10^{21 \ 1)}$ $(8,4 - 11,4) \cdot 10^{22 \ 2)}$	—

Примечание:

¹⁾ При сжигании 1 % природного урана в реакторах на тепловых нейтронах.

²⁾ При сжигании 60 % природного урана в реакторах-бридерах с замкнутым циклом.

Франция сегодня экологически самая чистая промышленно развитая страна вследствие самого широкого использования атомной энергии на электростанциях. В этой стране около 75% электроэнергии вырабатывается на АЭС, и выбросы CO₂ составляют в год 1,7 тонны на одного человека. Выбросы NO_x во Франции сократились в 5 раз. В Германии, где АЭС вырабатывают около 30% электроэнергии, выбрасывается 3,0 тонны CO₂. В США АЭС производят примерно ~21% электроэнергии, а на дорогах движется огромный автомобильный поток, выбрасывающий 5,0 т CO₂.

Парниковый эффект, как известно, это свойство земной атмосферы, содержащей CO₂ и пары воды, пропускать на Землю ультрафиолетовую компоненту солнечной радиации и задерживать инфракрасную компоненту земного излучения. Увеличение содержания CO₂, потери метана при добыче, транспортировке и сжигании природного газа могут вызвать нарушение теплового баланса Земли. Повышение ее температуры увеличивает испарение воды, увеличение содержания паров воды в атмосфере усиливает парниковый эффект. Вокруг парникового эффекта во всем мире ведутся большие политические и научные спекуляции. В то же время флуктуации климата Земли не дают однозначного ответа об истинном влиянии на парниковый эффект антропогенной составляющей.

С развитием науки, технологии и техники люди стали использовать новые источники энергии, имеющие больше потенциальной энергии в единице массы. Для высвобождения этой энергии надо было сооружать более сложные установки.

В XX веке наука открыла человечеству энергию деления и синтеза ядер, и в принципе вопрос об энергетическом кризисе снят. Но бездумное расхо-

дование энергии недопустимо. В развитых странах много делается для сбережения энергии, и там достигнуты существенные результаты. России в этом направлении предстоит еще пройти большой путь. Энергосбережение может скорректировать потребление энергии, сделать его более рациональным, но никакое сбережение не может заменить собственно источники энергии.

3. ГЛОБАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Входящие в состав ядер нуклоны (протоны и нейтроны) находятся в связанном состоянии, что изменяет их массу (энергию) на некоторую величину, называемую дефектом масс. Поэтому слияние легких ядер в новое более тяжелое или получение двух более легких ядер из одного тяжелого всегда сопровождаются выделением части внутриядерной энергии.

В ядерных энергетических реакторах деление актиноидов осуществляется регулируемым потоком нейтронов, получаемым при делении. Возможна управляемая цепная ядерная реакция деления в подкритичной активной зоне, которую подсвечивают внешним источником нейтронов. Этот добавочный поток нейтронов управляет энерговыделением ядерного реактора.

Синтезу ядер препятствуют быстро увеличивающиеся при их сближении силы кулоновского отталкивания, поэтому исходным ядрам требуется сообщить значительную начальную энергию.

3.1. Реакции деления ядер. В природе уран встречается в виде трех изотопов: $^{238}_{92}\text{U}$, составляющий по весу 99,2745%, $^{235}_{92}\text{U}$ — 0,720% и $^{234}_{92}\text{U}$ — 0,0055%. Масса земной коры составляет примерно $2,8 \cdot 10^{22}$ кг, а масса гидросферы около $1,37 \cdot 10^{21}$ кг. Используемые в реакторах деления вещества составляют чрезвычайно малую часть земной коры и воды. Так, уран в земной коре содержится в количестве $(2,5 - 3,0) \cdot 10^{-4}$ вес. % или около $7,0 \cdot 10^{16}$ кг (урана-235 около $4,9 \cdot 10^{14}$ кг); в морской воде и того меньше — $3,4 \cdot 10^{-8}$ вес. %.

Содержание урана в мантии Земли не рассматриваем из-за малой доступности этого урана для техники обозримого будущего.

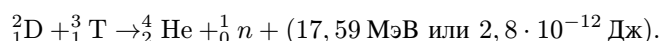
Природный торий имеет только один изотоп ^{232}Th и в земной коре составляет $1,3 \cdot 10^{-3}$ % по весу или $3,6 \cdot 10^{17}$ кг. При полном делении только урана-235 (без наработки из урана-238 плутония и прямого деления урана-238) в количестве примерно $4,9 \cdot 10^{14}$ кг выделится $3,9 \cdot 10^{29}$ Дж тепловой энергии, а всего природного урана $\approx 5,6 \cdot 10^{30}$ Дж. Полное деление содержащегося в земной коре тория равносильно освобождению $2,88 \cdot 10^{31}$ Дж тепловой энергии. Максимальная энергия при полном делении природного урана и тория $\approx 3,44 \cdot 10^{31}$ Дж.

3.2. Синтез легких ядер. В этих реакциях выделяется больше энергии на единицу массы реагентов, чем в реакциях деления. Рассмотрим те реакции

синтеза легких ядер, реализация которых наиболее доступна в обозримом будущем.

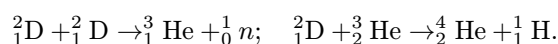
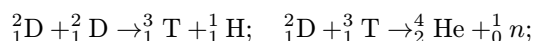
1. Водород имеет три изотопа, которые получили собственные имена: это протий (${}^1_1\text{H}$), дейтерий (${}^2_1\text{D}$) и тритий (${}^3_1\text{T}$). Первые два изотопа стабильны и содержатся в природной воде, тритий получают искусственно в ядерных реакциях.

При энергиях свыше 1 кэВ ($11,6 \cdot 10^6$ К) идет реакция



Около 80 % энергии уносят нейтроны — 14,07 МэВ, а остальные 20 % — энергия α -частицы (3,52 МэВ). В одном килограмме дейтерий-тритиевой смеси содержится 0,4 кг (${}^2_1\text{D}$) и 0,6 кг (${}^3_1\text{T}$) или $1,2 \cdot 10^{26}$ пар ядер; при этом 1 кг смеси может выделить $3,36 \cdot 10^{14}$ Дж тепла.

2. Синтез при более высоких энергиях — свыше 10 кэВ ($116 \cdot 10^6$ К) — может быть осуществлен с использованием только (${}^2_1\text{D}$) в следующей цепочке реакций:



Около 38,2 % энергии несут нейтроны (14,07 и 2,45 МэВ), 40,9 % энергии — протоны (14,67 и 3,0 МэВ) и 16,6 % энергии α -частицы (3,52 и 3,68 МэВ). В итоге два ядра ${}^2_1\text{D}$ выделяют 14,41 МэВ ($2,3 \cdot 10^{-12}$ Дж). В 1 кг ${}^2_1\text{D}$ содержится $1,5 \cdot 10^{26}$ пар ядер, следовательно, 1 кг дейтерия может дать $3,46 \cdot 10^{14}$ Дж, а в водах мирового океана находится $4,57 \cdot 10^{16}$ кг дейтерия.

Следующий легкий элемент — природный литий — имеет два стабильных изотопа: ${}^7_3\text{Li}$ составляет 92,58 % и ${}^6_3\text{Li}$ — 7,42 %. В земной коре $3,2 \cdot 10^{-3}$ вес.% природного лития или $\approx 8,96 \cdot 10^{17}$ кг, в том числе ${}^6_3\text{Li} \sim 6,65 \cdot 10^{16}$ кг, а ${}^7_3\text{Li}$ — $8,29 \cdot 10^{17}$ кг.

Для сжигания такого количества ${}^6_3\text{Li}$ потребуется около $2,22 \cdot 10^{16}$ кг ${}^2_1\text{D}$. Такая литий-дейтериевая смесь общим весом $8,87 \cdot 10^{16}$ кг способна выделить $2,39 \cdot 10^{31}$ Дж. В принципе можно сжечь один дейтерий гидросферы в количестве $\approx 4,57 \cdot 10^{16}$ кг, выделив при этом $1,58 \cdot 10^{31}$ Дж тепловой энергии.

От Солнца на Землю поступает $6,6 \cdot 10^{24}$ Дж/год лучистой энергии. Около 20 %, т.е. $1,32 \cdot 10^{24}$ Дж/год, солнечной энергии поглощается Землей, осуществляя цикл испарение — конденсация воды, перенос масс в атмосфере и гидросфере, фотосинтез в океане и на суше. Оценки антропогенного теплового засорения окружающей среды не допускают превышения значения 10^{22} Дж/год, т.е. около 1 % от поглощаемой лучистой энергии.

При таком темпе потребления энергии и при полном сжигании только одного урана-235 земной коры, считая, что других источников энергии нет, урана хватит примерно на $3,9 \cdot 10^7$ лет. При полном сжигании всего природного урана, как единственного источника энергии, его хватит на $5,6 \cdot 10^8$ лет, а тория — примерно на $2,88 \cdot 10^9$ лет. При полном сжигании лития-6 и части дейтерия гидросферы — $2,39 \cdot 10^9$ лет, а всего дейтерия гидросферы — $1,58 \cdot 10^9$ лет. Для сравнения заметим, что Земля существует примерно $4,6 \cdot 10^9$ лет.

Освоив деление тяжелых ядер, человечество приобрело безграничный источник энергии, но у него в запасе есть второй безграничный источник — энергия синтеза легких ядер.

4. СТАНОВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Проще всего получить тепловую энергию, сжигая природный газ. Сложнее всего осуществить управляемый синтез легких ядер для энергетики. Природный газ не может быть источником энергии на большие отрезки времени. Использование природного газа в энергетике может дать время, за которое надо будет создать максимально безопасную ядерную энергетику сначала на основе деления тяжелых ядер, а затем — синтеза легких.

При экономических оценках энергетики, очевидно, надо как-то учитывать тот научный потенциал, который приобретает страна при освоении значительно более сложных технологий. Высокий научный потенциал есть достояние нации. Сегодня он в экономике не учитывается. Что будет, если остановить научный поиск максимально безопасной атомной энергетики и освоение реакции синтеза, а также закрыть все АЭС? Перевести всю энергетику на природный газ?

Ученые Европы, США, Англии, Франции и Советского Союза создали научные основы освобождения и регулирования ядерной и термоядерной энергии. Если бы освоение ядерной энергии не прошло через создание сверхразрушительного оружия, возможно, человечество до сих пор не имело бы в своем распоряжении управляемой ядерной энергии. Создавая ядерное оружие, страны, овладевшие этим оружием, потратили астрономические средства, которые для любых мирных сверхзадач правительства этих стран, конечно, не выделили бы.

В США и Советском Союзе были созданы крупные научные и конструкторские коллективы, которые вели широким фронтом теоретические, экспериментальные, технологические, конструкторские и инженерные исследования, направленные на создание ядерного и термоядерного оружия. Ранее общество не имело опыта по созданию и управлению такими крупными

коллективами, направленными на решение одной задачи. Подавляющее большинство исследований проводилось впервые.

Путь в неведомое дал свои результаты. В декабре 1942 г. Э. Ферми осуществил впервые в мире самоподдерживающуюся ядерную реакцию и затем остановил ее. В июле 1945 г. в США была взорвана первая плутониевая бомба. В конце 40-х годов в США и Советском Союзе появляются идеи по использованию энергии деления актиноидов для энергетики. Первые энергетические установки разрабатывались для атомного подводного флота. Графитовые каналные, охлаждаемые легкой водой конвертеры для получения оружейного плутония послужили основой для создания реактора первой в мире АЭС и реакторов РБМК. Легководные корпусные реакторы под давлением, впервые использованные на атомных подводных лодках, послужили основой для современных энергетических ядерных реакторов с водой под давлением.

Разделительные заводы для получения урана-235 для ядерного оружия из природного урана стали основой получения обогащенного топлива современных энергетических реакторов. Радиохимическая переработка облученных блоков, выгружаемых из конвертеров, для извлечения кондиционного плутония стала основой современной переработки облученного топлива из энергетических реакторов. Созданная совершенно новая промышленность для производства ядерного горючего уже в 50-х годах в США и Советском Союзе заработала на полную мощность. Появилось большое количество расщепляющегося материала, и стало возможным часть его использовать не для ядерного оружия, а для зарождающейся ядерной энергетики.

Создание ядерного оружия, а затем ядерной энергетики и промышленности самого разного назначения способствовало развитию многих разделов науки, технологии, техники. Физические идеи, ранее не известные человечеству, в рекордно короткие сроки были воплощены в технику. Получили развитие такие разделы науки, как ядерная физика, физика элементарных частиц, физика плазмы, электродинамика, физика твердого тела, физическая химия, электроника и многие другие.

Созданы научные основы и получили практическое воплощение новые технологии: разделение изотопов, радиохимия, синтез химических элементов, отсутствующих в природе, радиационная медицина и биология. Извлечение из облученного нейтронным потоком урана хорошо очищенного плутония-238 (α -излучатель) дало возможность иметь безопасный долгоживущий источник энергии для стимуляторов сердца. Эти приборы уже спасли во всем мире жизнь тысячам людей.

Общество получило и освоило большое количество новейших достижений науки, технологии и техники, инициированных овладением ядерной энергией.

5. РЕАКТОРЫ ДЕЛЕНИЯ

Для реакции деления необходимо получать в достаточном количестве высокообогащенный природный уран-235 или производить полученный в результате ядерных реакций высокообогащенный изотоп плутоний-239, не встречающийся в природе.

В природном уране содержится 0,72 % урана-235. На основе разных физических принципов были созданы производства по выделению концентрированного урана-235, потребляющие большое количество электроэнергии.

Для получения плутония-239 нужно было осуществить управляемую цепную ядерную реакцию, используя как ядерное горючее природный уран, замедлитель нейтронов — специального качества графит, а легкую воду в качестве теплоносителя и одновременно замедлителя. Алюминиевые сплавы применялись как конструкционные материалы с минимальным поглощением нейтронов, борные стержни — интенсивные поглотители нейтронов — для регулирования нейтронных процессов, а значит, и мощности конвертера. В первых конвертерах тепловая энергия, выделяемая при цепной ядерной реакции, не использовалась, и горячая вода из них сбрасывалась в водоемы.

Природный уран после облучения нейтронным потоком в конвертере выжигался и направлялся на радиохимическую переработку. Радиохимическая обработка облученного топлива давала возможность выделить изотопы плутония. Наличие изотопных примесей в плутонии-239 определялись временем нахождения природного урана в нейтронных полях. Путь к ядерной бомбе лежал через создание разделительных производств, конвертеров и радиохимии. Исследования, выполненные для создания ядерного оружия, были использованы при создании ядерной энергетики.

Судьба у реакции синтеза принципиально другая. Синтез легких ядер (тритий плюс дейтерий) был впервые осуществлен в ядерной бомбе. Энергия, полученная от взрывного деления тяжелых ядер, создавала условия для возникновения реакции синтеза. Получить управляемый термоядерный синтез для целей энергетики оказалось значительно труднее, чем управляемую реакцию деления.

Для осуществления синтеза дейтерий-тритиевой смеси необходимо прогреть плазму до температуры более $1,16 \cdot 10^7 \text{K}$ (1 кэВ), для чисто дейтериевой плазмы — выше 10 кэВ. В кинетической энергии конечных продуктов — нейтронов и ядер гелия — заключена вся освобождаемая энергия синтеза. Для того чтобы цепная ядерная реакция осуществлялась, тепловые потери не должны охлаждать плазму.

Цепная реакция деления в актиноидах происходит практически при любых освоенных техникой температурах. В режиме нормальной работы основная часть кинетической энергии деления содержится в твердом топливе, а теплоноситель снимает эту энергию с топлива. Сброс нейтронов с периферии

активной зоны может служить основой регулирования мощности ядерного реактора. Бесполезная потеря нейтронов из активной зоны реактора деления может быть сведена к минимуму с помощью различных приемов.

Управляемая реакция синтеза может быть осуществлена, когда используется магнитное или инерциальное удержание плазмы. Именно по магнитному удержанию плазмы проведено больше всего исследований. Для обжигания мишени из дейтерий-тритиевой смеси предполагается использовать лучи лазера или потока ионов, для чего необходимо иметь лазерную установку большой единичной мощности в луче или ускоритель большой единичной мощности в потоке ионов высокой энергии. И лазерная, и ускорительная установки должны стабильно работать сотни часов. В настоящее время таких лазерных установок и ускорителей пока нет.

Таким образом, создать энергетическую установку с использованием управляемого термоядерного синтеза оказалось значительно труднее, чем с использованием реакции деления. За последние сорок лет, несмотря на усилия больших коллективов высокопрофессиональных специалистов в разных странах (в том числе и России), не удалось еще осуществить управляемую реакцию синтеза, приемлемую для создания даже пилотной энергетической установки. У нас в России, несмотря на все трудности, исследования по управляемому термоядерному синтезу нельзя останавливать.

Наличие в природном уране изотопа уран-235 дает возможность осуществить цепную ядерную реакцию. Для реальной термоядерной реакции нужен тритий, которого в природе ничтожное количество. Тритий научились получать, облучая литий-6 нейтронами в реакторе деления. Если бы в природе не оказалось урана-235, смогли бы ученые осуществить цепную ядерную реакцию деления и синтеза?

Создав ускоритель ионов (для работы которого нужна только электрическая энергия), можно, облучая потоком ионов уран-238, наработать минимально необходимое количество плутония-239. Используя идеи реактора-бридера на быстрых нейтронах с коэффициентом воспроизводства выше единицы (на уран-плутониевым топливе), можно начать промышленное производство плутония-239, т.е. создавать большую ядерную энергетику.

Ускорители дают возможность прямо из лития-6, облучая его потоком ионов, нарабатывать тритий, хотя энергетически это невыгодно. Как только появляются реакторы деления, так сразу в них можно нарабатывать тритий в любых количествах. После получения потока ионов нужной энергии появляется возможность осуществить целый ряд ядерных реакций.

Ядерная энергетика на базе деления актиноидов — это не только ядерный реактор, ядерная энергетическая установка, но и радиохимические заводы, заводы по производству ядерного топлива, обогащенного ураном-235, а в будущем и высокофононым плутонием, изготовлению тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок, а также транспортировка радиоак-

тивных продуктов по стране, обращение с радиохимическими отходами и с деталями ядерных реакторов с наведенной радиоактивностью, хранилища радиоактивных отходов от эксплуатации и ремонтных работ и хранилища отработанных тепловыделяющих сборок. Ядерная энергетика будет вне конкуренции по сравнению с другими источниками, если все звенья топливного цикла будут предельно безопасными, если они не будут оставлять будущим поколениям опасность выхода радиоактивности из-под контроля, поражения радиоактивностью окружающей среды.

6. ЯДЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

На начало 1993 г. в 28 странах работало около 423 ядерных энергоблоков с общей электрической мощностью порядка 330 ГВт. В настоящее время строится еще около 70 ядерных блоков в 19 странах.

Основа современной ядерной энергетики во всем мире — это реакторы ВВЭР (PWR), имеющие различную единичную мощность; всего их насчитывается около 239 общей электрической мощностью примерно 210 ГВт(э). На втором месте по численности кипящие корпусные реакторы BWR, их около 89 с электрической мощностью ≈ 73 ГВт. В Советском Союзе реакторы типа BWR не строились, а сооружались каналные водографитовые реакторы РБМК.

Научные идеи, заложенные в советские ВВЭР и иностранные PWR, одни и те же. Атомные станции на базе водо-водяных реакторов под давлением могут отличаться качеством изготовления оборудования и строительно-монтажных работ, электронными системами управления процессами, профессионализмом, дисциплинированностью и тренированностью эксплуатационного персонала.

По данным МАГАТЭ лучшими атомными станциями в мире являются АЭС Пакшт в Венгрии и АЭС Лавиза в Финляндии. На обеих станциях работают реакторы ВВЭР-440 советского производства, и Венгрия хочет построить еще одну АЭС. Однако сооружать эту станцию собирается Франция, а не Россия. Идет многолетняя дискуссия, какие реакторы лучше — корпусные или каналные. В 1979 г. на АЭС ТМА в США была тяжелая авария на корпусном реакторе. В 1986 г. на канальном реакторе Чернобыльской АЭС была катастрофа. Атомная энергетика стала предметом крупных международных политических интриг.

В настоящее время остро стоит вопрос о том, можно ли продавать АЭС в страны, желающие иметь свое ядерное оружие. Нельзя продавать (передать) науку и технологию радиохимической переработки облученного ядерного топлива для извлечения плутония и науку и технологию изотопного разделения урана-235 от урана-238. Топливом для зарубежных АЭС может

быть только уран — урановое топливо, а обогащенное плутонием топливо продавать нельзя, т.к. достаточно простыми химическими методами из него можно извлечь плутоний. Нельзя также передавать науку и технологию реакторов на быстрых нейтронах, которые хорошо выполняют двухцелевые задачи выработки электроэнергии и наработки кондиционного плутония.

Выгруженное из реакторов топливо должно возвращаться поставщику свежего топлива. Топливо поступает на радиохимический завод. Продукты деления для захоронения возвращаются стране, купившей АЭС. Радиоактивные актиноиды остаются в стране-поставщике ядерного топлива для использования его в своих ядерных реакторах. При невозврате отработанного топлива поставка свежего топлива немедленно прекращается.

Возникает вопрос, можно ли вообще гарантировать нераспространение ядерного оружия? Очевидно, нельзя, если не проводить самое тщательное наблюдение за любыми работами, прямо или косвенно связанными с ядерными реакциями. Немедленно и жестко принимать решительные меры по уничтожению созданных установок.

Один из возможных сценариев создания своего ядерного оружия следующий:

- 1) создать свою высокопрофессиональную научную интеллигенцию, для чего направлять талантливую молодежь в лучшие университеты мира;
- 2) нанять за большие деньги на 5—7 лет небольшую группу иностранных высокопрофессиональных ученых, технологов, инженеров, имеющих конкретный опыт работы в ядерной науке и технике;
- 3) заказать отдельные узлы будущих установок в самых развитых странах.

Самая главная задача — получить расщепляющиеся материалы уран-235, плутоний-239 или уран 233. Для сооружения нескольких экземпляров ядерного оружия с целью шантажа нужно иметь не так много ядерного горючего.

В настоящее время имеются два принципиально разных подхода к выгрузке из ядерных энергетических реакторов топлива.

Замкнутый топливный цикл. Выгруженное ядерное топливо после временной выдержки, необходимой для распада короткоживущих радиоактивных изотопов, поступает на радиохимическую переработку для отделения актиноидов от продуктов деления. Актиноиды поступают в цех приготовления ядерного топлива для повторного использования в ядерном реакторе. Продукты деления должны иметь в качестве примесей минимальное количество актиноидов, которым присущи периоды полураспада, значительно большие, чем у продуктов деления. Продукты деления после обработки, необходимой для длительного удержания радиоактивных отходов в заданном объеме, направляются на захоронение или хранение под наблюдением. Замкнутый топливный цикл позволяет сжечь не только весь добытый природный уран, но и обедненный уран, оставшийся от военной программы. В замкнутом топливном цикле будут работать бридеры на быстрых нейтронах и реакторы на тепловых ней-

тронах. Замкнутый топливный цикл может обеспечить любые потребности в электроэнергетике человеческого сообщества на практически неограниченное время. В настоящее время, когда в электроэнергетике преобладает углеводородное топливо, для военных программ добыто много природного урана, разведаны месторождения природного урана и разработана достаточно совершенная технология добычи природного урана, ядерное топливо, обогащенное ураном-235, дешевле топлива, обогащенного высокофоновым плутонием.

Обладание уран-урановым топливом не дает возможности, не имея разделительной техники, создать ядерное оружие. Такое топливо слабо радиоактивно и позволяет обращаться с ним, не вводя специальной дистанционной технологии.

Работая в **разомкнутом топливном цикле**, надо хранить до будущих времен отработанные тепловыделяющие сборки. Нарботанный высокофоновый плутоний остается запакованным в ядерном топливе, помещенном в металлические чехлы тепловыделяющих элементов. Такое хранение не может продолжаться до бесконечности, и, конечно, отработанное ядерное топливо со временем будет подвергнуто радиохимической переработке. Разомкнутый топливный цикл может быть использован только как временная мера и в небольшой по масштабам ядерной энергетике, при отсутствии радиохимической переработки, доведенной до уровня максимальной безопасности обращения с радиоактивными продуктами, а также как защита от хищения плутония террористами.

Современное отношение правительства США к ядерной энергетике базируется на опасении, что плутоний, в том числе и выгружаемый из энергетических водоохлаждаемых реакторов, может быть использован для создания ядерного и радиологического оружия. В США еще в 1962 г. была создана и испытана на полигоне в Неваде ядерная бомба, где расщепляющимся материалом был высокофоновый плутоний. Плутоний смертельно опасен и в случае использования его в бомбах с обычной взрывчаткой в качестве рассеиваемого радиоактивного вещества. Радиологическая война может уничтожить все живое в районах, где будет осуществлено рассеивание изотопов плутония. Особо опасно попадание плутония в легкие. Учитывая большой период полураспада изотопов плутония, пораженная территория будет оставаться мертвой в течение очень большого отрезка времени. Собрать или нейтрализовать рассеянный плутоний практически невозможно. Плутоний можно уничтожить, облучая мишени из плутония (без природного урана) нейтронным потоком.

Плутоний понадобится для обогащения стартового ядерного топлива при создании большой ядерной энергетике, работающей в замкнутом топливном цикле. В ближайшее время можно избыток плутония не хранить в специальных хранилищах, а получать от него энергию в ядерных реакторах с максимально большой глубиной выгорания, умеренным объемным выделением энергии, умеренными термодинамическими параметрами, оптимизированной

единичной мощностью с жидкометаллическим теплоносителем, т.е. в реакторе, отвечающем требованиям максимальной безопасности. В таком реакторе плутоний недостижим для злоумышленников и вырабатывает тепло и электроэнергию.

На позицию США в отношении использования высокофонового плутония на атомных электростанциях оказывают воздействие следующие факторы:

1. Низкие цены на природный уран на мировом рынке, которые формируются невысокими темпами внедрения ядерных энергетических установок в электроэнергетику и большими разведанными месторождениями природного урана.

2. Высокая стоимость радиохимической переработки, изготовления топлива, обогащенного высокофоновым плутонием, обращения с продуктами деления. В итоге в настоящее время в США нет экономической заинтересованности в переходе с хорошо освоенного уран-уранового топлива на уран, обогащенный высокофоновым плутонием.

3. Радиационная и ядерная опасность радиохимической переработки. Возможность хищения плутония в процессе его выделения из отработанного топлива и изготовления тепловыделяющих элементов. Вечное хранение отработанного ядерного топлива в виде тепловыделяющих сборок бессмысленно. США при необходимости в любой момент могут направить эти сборки на радиохимическую переработку.

4. Обилие своего и дешевого привозного углеводородного топлива побуждают США не торопиться с переходом на замкнутый топливный цикл в ядерной энергетике.

Правительства России, Франции, Англии, Японии, Индии в долгосрочном плане считают, что ядерная энергетика рано или поздно (в зависимости от темпов ее внедрения в электроэнергетику) должна будет перейти на ядерное топливо, обогащенное высокофоновым плутонием.

7. АВАРИИ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Начиная с декабря 1942 г., когда Э. Ферми осуществил первую в мире цепную ядерную реакцию, появилась неизвестная до тех пор смертельная ядерная и радиационная опасность для всего живого. Э. Ферми сам стал одной из первых жертв радиации. США и Советский Союз, участвуя в гонке по созданию ядерного оружия и не имея в начальный период должной информации о воздействии радиации на живые организмы, грубо нарушали условия безопасной работы и проживания людей вблизи объектов.

От воздействия радиации пострадали население Хиросимы и Нагасаки, жертвы испытаний ядерного оружия на земле, в атмосфере и океане, воен-

ных маневров армий с использованием ядерного оружия. В разные годы произошли аварии в Виндскейле (Англия), на ТМА (США) и катастрофа на ЧАЭС (Советский Союз). Менее громкие аварии происходили на атомных подводных лодках, следствие которых — тяжелая лучевая болезнь и гибель эксплуатационного персонала и ликвидаторов ядерных аварий. Эксплуатационный и научно-исследовательский персонал облучался при авариях на критических сборках, исследовательских реакторах, конвертерах, энергетических реакторах, радиохимических производствах, а также при ремонтно-восстановительных работах.

На начальной стадии создания ядерного оружия на жизнь и здоровье людей повлияло отсутствие должной дозиметрии и упрощенное обращение с плутонием и тритием. За прошедшие годы осуществлен сброс больших масс радиоактивных продуктов в озера, реки, океан, и радиоактивными продуктами загрязнены участки земли. Подземные ядерные взрывы для целей народного хозяйства иногда сопровождались выбросом радиоактивности на поверхность. Все аварии, катастрофы, взрывы привели к тому, что у людей (для пользы которых, собственно, все должно делаться), живущих в разных странах мира, появился свой взгляд на эту непонятную ядерную энергию. Смертельная опасность воздействия ядерной энергии стала для них очевидной, а в чем польза ядерной энергии — непонятно.

На естественный вопрос о том, что же положительного дает ядерная энергия человеку, ответ состоит в следующем.

1. Безграничный, концентрированный источник энергии прежде всего для производства электроэнергии.

Содержание энергии в единице массы у ядерного горючего в миллион раз превосходит лучшее углеводородное топливо, создает независимость производства энергии от расстояния до урановых рудников. Уже имеющиеся научные разработки дают основание сделать следующее поколение атомных электростанций вместе с топливным циклом максимально безопасными и экономически целесообразными.

Ядерная энергетика имеет возможность стать главным источником энергии для электроэнергетики и тем самым экономно использовать такие уникальные природные углеводородные источники энергии, как нефть и природный газ, запасы которых конечны и без которых современное человеческое общество в принципе не сможет обойтись. В будущем ядерная энергетика во всех своих звеньях сможет оказывать менее вредоносное воздействие на человека и окружающую среду, чем энергетика на углеводородном топливе. Ядерные электростанции не будут выбрасывать в воздух огромные массы углекислого газа. Большая доля автомобильного и авиационного транспорта может быть переведена на водородное топливо, если для получения дешевого водорода использовать ядерную энергию. Весь железнодорожный транспорт может быть переведен на электротягу.

2. Подводный и надводный флот с атомным двигателем станет флотом с безграничным радиусом плавания для мирных и оборонных задач.

3. Энергетические установки для космических полетов к дальним планетам Солнечной системы, создание на этих планетах баз обитания возможны только с использованием ядерной энергии, т.к. солнечная радиация на этих планетах не может быть источником энергии.

4. Современное ядерное и термоядерное оружие предотвращает нападение потенциального врага, обеспечивает независимость и территориальную целостность страны, а наличие ядерного оружия возмездия уменьшает вероятность возникновения мировых войн.

5. В принципе не исключена встреча Земли с космическим телом значительной массы. Такое столкновение может уничтожить все живое на Земле. Своевременное обнаружение такого тела и ядерные взрывы на нем могут изменить траекторию полета и спасти Землю.

Если в Советском Союзе мало кто считался с населением при размещении вблизи мест его обитания любых объектов мирного и военного назначения, то в современной России ядерная энергетика может быть востребована только в том случае, если можно будет убедить людей в том, что атомная энергетика во всех звеньях будет максимально безопасной и менее вредной для здоровья людей и природы, чем тепловая станция на каменном угле. При сооружении АЭС люди получают престижную, хорошо оплачиваемую работу, современное бесплатное специализированное медицинское обслуживание, будут созданы условия для комфортного проживания.

Следует принципиально изменить подход к сооружению АЭС. Нужно иметь технико-экономическое обоснование мощности и времени ввода в эксплуатацию АЭС. Жители региона должны получить разъяснение всех вопросов, связанных с работой АЭС, и выразить свою заинтересованность. Реальная связанная с ядерной энергией опасность, усиленная секретностью и слухами, привела к объединению людей самых разных профессий, религий и убеждений, выступающих не только против ядерного оружия, могущего уничтожить все живое, но и против ядерной энергетике. Против нее зачастую выступают группы людей и отдельные личности, плохо разбирающиеся в ядерной энергетике. С оппонентами ядерной энергетике надо говорить на языке фактов, а не общих соображений. Надо обязательно вести корректное обсуждение, не переходя на тон диктата. Есть большой смысл в этих оппонентах, они способствуют работе мысли у профессионалов, т.е. сокращают путь создания предельно безопасной ядерной энергетике. Более опасны "лжепатриоты" атомной энергетике, следуя за которыми, можно снова прийти к катастрофам типа Чернобыля.

Дискуссии с противниками ядерной энергетике должны основываться на следующих положениях.

1. Высокoproфессиональное обоснование возможности создания макси-

мально безопасной ядерной энергетики во всех звеньях замкнутого топливного цикла.

Радиоактивные отходы ядерной энергетики во всем возможном диапазоне изотопов должны быть подвергнуты ядерным превращениям для перевода их или в короткоживущие, или в изотопы с очень большим периодом полураспада, либо необходимо полное разрушение ядер высокорadioактивного изотопа. Те отходы, которые не удастся трансмутировать, должны быть упакованы таким образом, чтобы ни при каких условиях не могли попасть в среду обитания людей. Ядерно-энергетические установки и весь топливный цикл должны быть гарантированно защищены от ошибок персонала, стихийных бедствий и терроризма. В установках в принципе не должно возникать опасности пожара, химического или парового взрыва. Радиохимическая переработка не должна давать никаких выбросов радиоактивности в окружающую среду.

2. Обоснование, что в данном регионе, начиная с такого-то времени, АЭС такой-то мощности экономически и экологически целесообразнее, чем любые другие электростанции на углеводородном топливе.

Должен восторжествовать принцип, согласно которому только в самых крайних, безвыходных ситуациях можно создавать сооружения, обладающие высокой опасностью для здоровья и жизни обслуживающего персонала и окружающей среды. Надо искать безопасные альтернативные решения, которые могут выполнить те же задачи. Если нельзя будет сделать ядерную энергетику во всех звеньях безопасной, то надо ориентироваться на самое широкое использование каменного угля, форсирование работ по использованию солнечной радиации и создания аккумуляторов больших количеств энергии.

8. ЗАДАЧИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В настоящее время перед наукой в области ядерной энергетики стоят следующие задачи.

Необходимо продолжать эволюционное улучшение уже созданных ядерных энергетических установок с целью обеспечить их безаварийную работу до планового вывода из эксплуатации. К таким установкам относятся охлаждаемые легкой водой реакторы на тепловых нейтронах. Ядерное топливо в таких реакторах работает в разомкнутом топливном цикле, без радиохимического передела выгружаемого топлива и возврата в топливный цикл высокофоновых актиноидов.

Но на реакторах с тепловыми нейтронами невозможно создать большую ядерную энергетику, т.к. в них сжигается меньше одного процента добываемого природного урана. На начальном периоде развития ядерной энергетики лишь отдельные развитые страны могли позволить себе иметь ядерную энергетику только на тепловых нейтронах.

В реакторах-бридерах на быстрых нейтронах в результате ядерных реакций происходит превращение природного сырьевого ядерного горючего урана-238 в искусственное — плутоний. При работе бридера в энергетическом режиме нарабатывается плутония больше, чем его сгорает, и в выгружаемом из бридера топливе плутония больше, чем его было при загрузке. В активной зоне таких реакторов должно происходить как можно меньшее замедление нейтронов, поэтому замедляющая нейтроны легкая вода в принципе не может быть теплоносителем, снимающим энергию в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах.

Максимальное сжигание урана-238 — основа большой ядерной энергетики. Современные тепловыделяющие элементы, в которых находится ядерное горючее, по своим ядерно-физическим, физическим и тепломеханическим параметрам не могут сжигать все загруженное в них горючее. После максимально допустимого выгорания топлива тепловыделяющие элементы поступают на радиохимическую переработку, которая освобождает их от поглощающих нейтроны продуктов деления и возвращает ядерное горючее в виде новых тепловыделяющих элементов. Чем дольше облучается нейтронами уран-238, т.е. чем дольше в активной зоне стоят тепловыделяющие элементы, тем больше рождается тяжелых изотопов, тем выше радиоактивность выгружаемого топлива и тем большие сложности возникают при радиохимической переработке. Возможности радиохимической переработки должны учитываться при определении глубины выгорания ядерного топлива. На разных этапах развития ядерной энергетики существовало различное отношение к замкнутому топливному циклу.

Было бы очень заманчиво, если бы в тепловыделяющих элементах достигалась такая глубина выгорания, что выгруженное топливо не нуждалось бы в переработке, т.к. в нем оставалось бы слишком мало горючих и сырьевых изотопов. Такое топливо, не подвергая разрушению тепловыделяющие элементы, можно было бы хранить под наблюдением, а при промышленном освоении трансмутации — облучать высокоэнергетическими ионами для уничтожения радиоактивных изотопов. Исчезла бы необходимость в радиохимической переработке. Это настолько заманчивая цель, что рано или поздно должны быть проведены комплексные научно-исследовательские работы, теоретические и экспериментальные, в ходе которых следует получить оптимальные параметры тепловыделяющих элементов для реакторов на тепловых и быстрых нейтронах по топливной композиции, конструкционному материалу, температурному режиму, выделению энергии, глубине выгорания и пр.

Большая ядерная энергетика должна работать в замкнутом топливном цикле с радиохимической переработкой ядерного топлива, имея в своем составе значительное количество реакторов-бридеров на быстрых нейтронах. Теплоносителем в таких реакторах могут быть только жидкие металлы. Для увеличения надежности работы реакторов-бридеров энергонапряженность ак-

тивных зон таких аппаратов должна быть меньше, чем это предполагалось ранее, когда боролись за высокие коэффициенты воспроизводства. Это значит, что для получения того же количества плутония их должно быть достаточно много. Большая энергетика (если мы хотим ее иметь) без реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением в принципе обойтись не может. Для того, чтобы не рухнула вся инфраструктура, создающая и эксплуатирующая ядерно-энергетические установки, в умеренных масштабах надо продолжать создавать новые водоохлаждаемые реакторы с обязательным учетом всех основных замечаний по их совершенствованию.

Водоохлаждаемые ядерные реакторы из-за специфики воды как теплоносителя не могут стать основой безопасной ядерной энергетики, какие бы ухищрения ни предпринимали конструкторы. Повысить надежность и безопасность работы водоохлаждаемых реакторов можно, если выполнить следующие условия:

- 1) оптимизировать единичную мощность реактора;
- 2) максимально уменьшить объемное выделение энергии;
- 3) иметь значительный запас до выхода на кризис кипения при всех режимах работы;
- 4) перейти на естественную циркуляцию (безнасосная система) в номинальном режиме по мощности;
- 5) защитить парогенератор от больших течей;
- 6) внутри корпуса реактора под активной зоной разместить чашу сборки разрушенного топлива с рассекателями падающих фрагментов и поглотителями нейтронов;
- 7) разместить в критических точках по два датчика контроля, работающих на разных физических принципах;
- 8) создать самозащищенность управленческих систем от ошибок персонала и диверсий;
- 9) вести непрерывный автоматический контроль за качеством воды первого и второго контуров. Во втором контуре в районе парогенераторов вести непрерывный контроль за появлением радиоактивности.

Под действием радиолиза в высокотемпературных реакторах в режиме нормальной работы установки происходит разрушение химических соединений, в результате чего появляются химические элементы в атомарном состоянии с высокой химической активностью. Если имеется реакторное излучение, то ничего нельзя сделать, чтобы радиолиз не происходил.

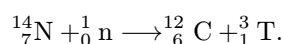
Воздействие продуктов радиолиза на материалы первого контура может быть различным в зависимости от химического соединения, выбранного в качестве теплоносителя, и энергии реакторного излучения. В аварийных режимах, когда температура может достигать высоких значений, кроме радиолиза в разрушение химических соединений вступает пиролиз.

Непонимание ограничений, накладываемых радиолизом и пиролизом, привело к не оправдавшим себя попыткам использовать в качестве теплоносителя углеводороды и газы CO_2 и N_2O_4 . Попытка использовать N_2O_4 в реакторе на быстрых нейтронах в одноконтурной схеме несла в себе принципиальные ошибки.

1) При развале молекул N_2O_4 , который закладывался в проект как прогрессивная идея интенсификации съема энергии в активной зоне, не учитывалось, что атомарный кислород создает сверхтяжелую коррозионную обстановку. Окислы конструкционных материалов забивали проходные сечения в активной зоне, что резко уменьшало расход теплоносителя. Никакие технологические приемы очистки газа N_2O_4 успеха не дали и дать не могли. Создать конструкционные материалы, имеющие удовлетворительные ядерно-физические характеристики и остающиеся стойкими при высоких температурах в атомарном кислороде, проблематично; это делало бы установку слишком дорогостоящей. Наиболее широко используемое в настоящее время ядерное топливо — диоксид урана — подвержено окислению в среде кислорода до U_3O_8 . Окисленное топливо разрушает оболочку тепловыделяющего элемента, т.к. при окислении увеличивается его объем, поэтому негерметичность в тепловыделяющих элементах в среде N_2O_4 ведет к их разрушению. Нужно было разрабатывать специальное топливо, стойкое в атомарном кислороде. Для реактора-бридера, который должен работать в замкнутом топливном цикле, это сильно бы усложнило радиохимическую переработку.

2) Ядерно-физические характеристики азота и кислорода в принципе давали возможность создать активную зону на быстрых нейтронах, т.е. создать бридер на быстрых нейтронах — конкурент натриевому реактору. Но в реакторах на быстрых нейтронах — высоконапряженных по выделению энергии системах с малой теплоемкостью активной зоны и высоким обогащением ядерного горючего — использовать газовый теплоноситель, который в аварийных ситуациях может покинуть активную зону, в принципе недопустимо.

3) Если бы произошло чудо, и ядерный реактор на быстрых нейтронах с теплоносителем N_2O_4 все же заработал, то он стал бы наработчиком трития, который легко бы диффундировал через горячие стенки за его пределы:



Заметим, что природный азот состоит на 99,635 % из изотопа ${}^{14}_7\text{N}$ и 0,365% — ${}^{15}_7\text{N}$.

С 1947 г. английские ученые начали вести научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию ядерных реакторов, в которых в качестве замедлителя был графит, а теплоносителя — углекислый газ CO_2 . Несмотря на все усилия высокопрофессиональных специалистов, работы зашли в тупик. Другого и не могло быть, т.к. газ CO_2 не может быть тепло-

носителем в ядерно-энергетических установках, где одновременно действуют радиолиз и пиролиз.

В пятидесятых — шестидесятых годах в ряде стран проводились работы по использованию углеводородных соединений в качестве теплоносителя в ядерно-энергетических установках. Побудителем этих исследований было желание иметь теплоноситель при низких рабочих давлениях, что легкая вода дать не могла. Под действием пиролиза и радиолиза исходные углеводородные соединения разрушались, образовывались новые соединения, обладающие другими химическими и теплофизическими свойствами. На поверхностях тепловыделяющих элементов — самом горячем месте контакта теплоносителя с теплоотдающими поверхностями — появлялась прочная пленка с низкой теплопроводностью, состоящая из продуктов радиолиза, пиролиза и продуктов коррозии. Отложения повышали температуру топлива, уменьшали проходные сечения теплоносителя. Ядерные установки в таком режиме работать не могли. Работы с органическими теплоносителями были прекращены.

Физические основы всех модификаций водоохлаждаемых реакторов во всем мире одни и те же. Повышения безопасности АЭС в настоящее время добиваются путем улучшения и увеличения числа защитных барьеров, совершенствования измерительной аппаратуры и систем, управляющих нейтронными и тепловыми процессами, создания управленческих систем, самозащищенных от ошибок оператора и диверсий, повышения качества эксплуатации. Все эти меры, безусловно, нужны, но они не могут дать принципиального повышения безопасности АЭС. Легкая вода как теплоноситель ЯЭУ может в экстремальных условиях стать источником тяжелых аварий. Нет таких инженерных приемов, которые могли бы сделать воду вполне безопасной.

К моменту создания первых ядерно-энергетических установок человечество накопило богатый опыт использования легкой воды в теплоэнергетике. Создавая ядерно-энергетические установки, естественно было использовать легкую воду. Ее ядерно-физические параметры таковы, что она может быть хорошим замедлителем нейтронов и тем самым выполнять две функции — теплоносителя и замедлителя в реакторах на тепловых нейтронах. Вода в теплоэнергетических установках не подвергается радиолизу и, практически, пиролизу. С повышенной коррозионной активностью воды столкнулись, когда теплоэнергетика вышла на высокие термодинамические параметры. Как поведет себя вода при авариях на ядерно-энергетических установках, было неизвестно. Строго говоря, на начальной стадии создания ядерной энергетики авариям не уделялось должного внимания. Других теплоносителей, кроме воды, в теплоэнергетике не было. Начинать создание первых ЯЭУ с поисков совершенных теплоносителей означало сильно задержать создание таких установок.

Для реакторов на быстрых нейтронах, где вода в принципе не может быть использована, начали искать теплоносители. Первым теплоносителем

в реакторах на быстрых нейтронах была ртуть, затем эвтектика натрия — калий и, наконец, остановились на натрии. Легкая вода стала теплоносителем в большинстве современных ядерно-энергетических установок на атомных электростанциях и военно-морском флоте.

С накоплением опыта стало ясно, что легкая вода может создавать в ядерно-энергетических установках аварийные ситуации и не может смягчить аварию, если таковая уже началась, что при авариях на ядерно-энергетических установках в экстремальных режимах скоростей протекания процессов, температур и давлений, ранее не известных теплоэнергетике, может оказаться, что вода — химическое соединение кислорода и водорода — станет работать как окислитель.

9. ЛЕГКАЯ ВОДА КАК ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ

Остановимся на свойствах легкой воды, не позволяющих при использовании ее в качестве теплоносителя создать максимально безопасную ядерную энергетику.

1. Низкая температура кипения воды при атмосферном давлении заставляет при создании ядерно-энергетических установок повышать рабочее давление. Максимальная температура воды в дотермодинамическом кризисе $+374\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении в 225 атм. Нарушение герметичности в любом месте первого контура приводит к потере теплоносителя, а аккумулированная тепловая энергия активной зоны и остаточное тепловыделение в ядерном топливе при заглушенном реакторе приводят к испарению воды. В водо-водяных реакторах потеря воды в результате разгерметизации приводит к прекращению ядерных цепных реакций, т.к. исчезает замедлитель. Но при этом исчезает и теплоноситель, и нечем снять остаточное тепловыделение и аккумулированное тепло ядерного топлива.

Особенно опасны для реакторов типа ВВЭР течи в парогенераторах. При появлении достаточно большой течи и несрабатывании отсечной аппаратуры можно потерять всю воду, и никаких запасов воды не хватит на аварийное охлаждение. Радиоактивная вода выйдет из-под контеймента реактора и упадет в машинный зал.

2. Кризис кипения. При изменении одного или нескольких параметров, влияющих на интенсивность теплосъема (удельный тепловой поток, скорость протекания воды, давление, недогрев воды до температуры насыщения или паросодержание), пузырьковое кипение может исчезнуть. Горячая поверхность окажется покрытой паровой пленкой, которая не только не будет интенсифицировать теплосъем, что происходит при пузырьковом кипении, а наоборот, создаст дополнительное термическое сопротивление, и температура топлива резко повысится.

В настоящее время широко используют циркониевые сплавы для оболочек тепловыделяющих элементов. Они имеют хорошие ядерно-физические

параметры и при температуре до 400 °С слабо реагируют с водой. Температура начала и интенсивность химического взаимодействия зависят от энергии, которая выделяется при этом взаимодействии и теряется в окружающую среду. Энергия, поступающая в зону реакции со стороны от других источников энергии, интенсифицирует реакцию взаимодействия.

Через оболочки тепловыделяющих элементов к теплоносителю проходит тепловой поток от ядерного топлива. При температуре оболочки свыше 800 °С начинается интенсивное взаимодействие циркония с парами воды. Выделяющийся кислород идет на окисление циркония, а водород попадает в объемы, занятые теплоносителем. Окисление оболочек приведет к их разрушению, т.к. окислы циркония не обладают механической прочностью. Находящееся внутри циркониевых трубок ядерное топливо оказывается нефиксированным, что ведет к его обрушению. Контакт диоксида урана, из которого состоит ядерное топливо, с парами воды при высоких температурах приводит к его окислению до U_3O_8 . Свободный водород, выделившийся в процессе окисления циркония и диоксида урана, образует газовый пузырь, который становится взрывоопасным при контакте с воздухом и еще более ухудшает охлаждение ядерного топлива.

Кризис кипения может привести к такому ухудшению теплосъема, что тепловыделяющие элементы достаточно быстро расплавятся.

3. Паровой взрыв. Используемое в настоящее время ядерное топливо UO_2 в нормальном режиме работы из-за низкой теплопроводности имеет высокую температуру и аккумулирует много тепловой энергии. Остаточное тепловыделение в заглушенном ядерном реакторе также вносит свой вклад в разогрев топлива с ненормальным охлаждением. Резкое увеличение поверхности контакта фрагментов ядерного топлива с остатками воды в активной зоне и под ней приводит к взрывоопасному вскипанию воды.

Ситуация может ухудшиться, если разрушение тепловыделяющих элементов произошло в результате аварийного увеличения выделения энергии в реакторе. Вследствие парового взрыва может произойти следующее.

— Срывается крышка реактора вместе с органами аварийной защиты и регулирования мощности. Вся вода покинет активную зону, и может произойти ядерная вспышка в остатках ядерного топлива.

— Разрушение корпуса ядерного реактора и трубопроводов первого контура. Вода начнет интенсивно покидать активную зону, испаряясь под контактом реактора. Трещины, закатанные в процессе изготовления корпуса реактора и не обнаруженные существующими дефектоскопами, при ударном повышении давления могут содействовать разрушению сосуда.

— Разрушение парогенераторов.

— Разрушение органов регулирования и аварийной защиты без потери герметичности первого контура.

— Разрушение активной зоны.

Возникает естественный вопрос, а можно ли сделать АЭС в принципе максимально безопасными, или возможности повышения безопасности практически уже исчерпаны?

10. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Принципы, обеспечивающие максимальную безопасность ядерных реакторов, основываются на научных и практических решениях по созданию АЭС.

1. В активной зоне ядерного реактора должно происходить самогашение цепной ядерной реакции при аварийном росте температур в ее элементах без воздействия органов аварийной защиты.

2. Выделяемая ядерным горючим энергия обязательно должна соответствовать возможностям ее съема, и с гарантией созданы условия, при которых даже в аварийных ситуациях не происходит недопустимого разогрева топлива и не происходит разрушение твэлов.

3. Необходимо использовать теплоноситель с соответствующими ядерно-физическими свойствами, причем реакторное излучение не должно изменять его физические и физико-химические свойства, и при высоких температурах в случае аварии теплоноситель не должен становиться химически активным. При рабочих температурах ЯЭУ теплоноситель при контакте с воздухом не должен возгораться, и ни при каких аварийных ситуациях не должен произойти паровой взрыв теплоносителя в активной зоне, что может быть обеспечено за счет высокой температуры кипения и высокой теплоты парообразования. Теплоносителями ЯЭУ могут быть химические элементы, но не химические соединения, т.к. все химические соединения в большей или меньшей степени подвержены радиолизу и пиролизу.

Тепло, накопленное в ядерном топливе, при работе на мощности и остаточное тепловыделение за счет ядерных процессов даже в заглушенном аппарате при потере теплоносителя может разрушить твэлы. Теплоноситель ядерного реактора в рабочем режиме должен находиться под давлением, которое не приведет к его истечению или вскипанию при разгерметизации контура охлаждения.

Имеются инженерные возможности сделать ядерный реактор, у которого активная зона никогда не будет осушена, а теплоноситель даже при самых тяжелых авариях не покинет активную зону.

4. Для сведения возможности возникновения аварийной ситуации к минимуму необходимо для каждой вновь создаваемой ЯЭУ провести оптимизацию по следующим параметрам:

- единичной мощности реактора,
- объемному выделению энергии,

- термодинамическим параметрам,
- количеству загруженного топлива и его обогащению,
- глубине выгорания,
- теплофизическим параметрам ядерного топлива,
- ядерно-физическим, физико-химическим и теплофизическим параметрам теплоносителя,
- количеству теплоносителя в первом контуре,
- ядерно-физическим, физико-химическим и тепломеханическим свойствам конструкционных материалов ядерного реактора,
- количеству конструкционных материалов для создания ЯЭУ.

При такой оптимизации должны быть учтены экономические и экологические требования к ЯЭУ.

11. ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ЯЭУ

В 60-х годах во всем мире предполагалось интенсивное развитие ядерной энергетики, для чего было необходимо иметь достаточное количество ядерного горючего. Для этого предполагалось получать уран-235 на разделительных заводах и нарабатывать плутоний в ядерных реакторах.

Требовалось создать ядерные реакторы-бридеры на быстрых нейтронах и получать в них как можно больше плутония, поэтому в таких реакторах активные зоны были высоконапряженными. Выделяемая тепловая энергия, приходящаяся на единицу массы ядерного топлива, лимитируется возможностью сьема тепла теплоносителем. Определяющей является максимально допустимая температура топлива при приемлемой для производства электроэнергии температуре теплоносителя на выходе из реактора.

Теплосъем в режиме нормальной эксплуатации, в режиме пуска и остановки ЯЭУ, в режиме возможных аварий — главный критерий при выборе теплоносителя для реакторов на быстрых нейтронах. На начальной стадии создания бридеров в качестве теплоносителей рассматривались натрий, литий-7, гелий. Эвтектика свинец — висмут и свинец для большой ядерной энергетики не рассматривались, т.к. уступали натрию и литию по теплофизическим параметрам. Поведению теплоносителя при тяжелых авариях в то время должно было уделяться внимание.

Рассмотрим свойства ряда веществ, которые могут быть использованы в ЯЭУ в качестве теплоносителей.

Гелий обладает прекрасными ядерно-физическими параметрами, не активизируется в полях реакторного излучения, в силу его химической инертности не возникает проблем взаимодействия с ядерным топливом, продуктами деления, конструкционными материалами. Гелий не взаимодействует с кислородом воздуха и водой, и с ним невозможны паровые взрывы. Можно сделать одноконтурную ядерно-энергетическую установку, где гелий, нагретый в ядерном реакторе, будет набирать энергию в газовой турбине.

Главным недостатком гелия является высокое давление, при котором он становится хорошим теплоносителем. Разгерметизация контура может привести к полной потере теплоносителя. При разгерметизации охлаждаемого гелием реактора воздух начнет поступать через отверстие внутрь активной зоны, а кислород воздуха — окислять ее разогретые элементы.

Для гелий-графитового реактора на тепловых нейтронах оптимизированной единичной мощности полная потеря гелия не катастрофична, т.к. такие реакторы имеют низкие удельные выделения энергии. Для больших масс графита характерна сублимация при высокой температуре, высокая термостойкость, теплоемкость, теплопроводность. При разогреве графита происходит и самогашение нейтронных цепных реакций. Все это дает возможность такому аппарату не разрушиться при полной потере гелия. Разогревшись до равновесной температуры, цепные ядерные реакции погаснут, и в реакторе будет только остаточное тепловыделение, при котором сброс тепла в окружающую среду стабилизируется.

Гелий-графитовый реактор на тепловых нейтронах отвечает требованиям предельной безопасности. Но для реакторов на быстрых нейтронах применение гелия недопустимо, хотя в таком реакторе с гелиевым теплоносителем можно достичь максимального коэффициента воспроизводства. В реакторах на быстрых нейтронах при потере гелия только за счет остаточного выделения энергии расплавится даже заглушенная зона. В активной зоне быстрого реактора нет массы, которая могла бы за счет своей теплоемкости взять на себя выделенную энергию. Активные зоны быстрых реакторов — высоконапряженные зоны, и в них высокообогащенное топливо имеет высокую температуру при рабочих режимах. Расплавление активной зоны такого реактора приведет к катастрофическому выбросу радиоактивности, а расплавление высокообогащенного топлива — к образованию неконтролируемой критической массы со всеми тяжелыми последствиями. Бессмысленно создавать реактор-бридер на быстрых нейтронах с газовыми теплоносителями.

Литий обладает удовлетворительными ядерно-физическими и рекордными теплофизическими свойствами, приведенными в табл. 3.

Использование лития было связано с наработкой из него трития в нейтронных полях. Удержать тритий в объемах при высоких температурах металлических стенок практически невозможно, поэтому для стационарной энергетики литий неприемлем.

Таблица 3. Теплофизические свойства лития

Температура плавления, °С	180,50
Температура кипения, °С	1347
Теплота испарения, Дж/кг	$19,6 \cdot 10^6$
Теплопроводность при 1000 °С, Вт/М·°С	53,6

В бланкетах гибридных термоядерных реакторов можно будет рационально использовать литий в качестве прекрасного теплоносителя и наработчика трития для термоядерных реакций.

Литий — самый легкий металл с плотностью $\rho = 0,44$ кг/л при температуре 1000 °С, поэтому для космических аппаратов большой мощности литий — лучший теплоноситель; потери трития через горячие стенки в космосе, очевидно, допустимы.

Жидкометаллические теплоносители дают возможность иметь теплоноситель при низком давлении, т.е. давлении, развиваемом циркуляционными насосами для прокачки теплоносителя. Уже освоены температуры жидкометаллических теплоносителей 500—600 °С. Используя литиевый теплоноситель, можно иметь рабочую температуру около ~ 1000 °С. При этом должен быть решен главный вопрос — создание конструкционных материалов, работающих при этих температурах в литии.

Жидкометаллические теплоносители дают возможность построить ЯЭУ с термоэлектрическим или термоэмиссионным преобразованием. Можно сделать паровую турбину, работающую на парах калия (температура кипения 760 °С) или цезия (670 °С).

В транспортных установках жидкие металлы дают возможность иметь рекордные весовые и габаритные характеристики при практически любой единичной мощности.

В большой ядерной энергетике должно быть разумное сочетание реакторов на быстрых и тепловых нейтронах. В большой ядерной энергетике монополия водоохлаждаемых реакторов на тепловых нейтронах, работающих в разомкнутом топливном цикле, в принципе исключается. Не нужно цепляться за водоохлаждаемые реакторы на тепловых нейтронах. Они свой полезный вклад в атомную энергетiku сделали и должны еще какое-то время просуществовать, спокойно уступив место предельно безопасной ядерной энергетике.

Жидкие металлы в качестве теплоносителей дают возможность иметь высокий коэффициент полезного действия для стационарной энергетики. Современные водоохлаждаемые ядерные реакторы имеют КПД около 33 %, а реакторы с натриевым охлаждением имеют КПД ~ 40 %. Это значит, что для производства одного и того же количества энергии надо будет меньше сжигать ядерного горючего и меньше нарабатывать радиоактивных продуктов деления, а в большой ядерной энергетике, ориентированной на атомную, будет меньше тепловое засорение окружающей среды.

Натрий. Натриевый теплоноситель — наиболее изученный жидкометаллический теплоноситель — может обеспечить съём тепла при высоком объёмном энерговыделении и тем самым, если понадобится, обеспечить высокий коэффициент воспроизводства плутония. Впервые жидкий натрий как теплоноситель для реакторов-бридеров на быстрых нейтронах был использован в Советском Союзе при пуске в 1959 г. исследовательского ядерного реактора БР-5.

Существующий мировой опыт создания и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем получен на таких установках, как реакторы EBR-2 (США), BOR-60, БН-350 и БН-600 (СССР), ПФР (Англия), “Феникс” и “Суперфеникс” (Франция). Реактор БН-350 был спроектирован в петлевом варианте, т.е. по образцу и подобию водоохлаждаемых аппаратов, где теплоноситель находится под высоким давлением и поэтому большие объёмы теплоносителя в первом контуре исключаются, но не используются специфические свойства жидкометаллического теплоносителя — высокие температуры при низком давлении. Реактор БН-600 был спроектирован в баковом варианте, когда в большом объёме натрия размещалась активная зона, насосы и теплообменники металл-металл, что позволило полностью использовать свойства жидких металлов.

Природный натрий (табл. 4) состоит из одного стабильного изотопа $^{23}_{11}\text{Na}$, который в нейтронных полях образует два радиоактивных изотопа — $^{22}_{11}\text{Na}$ с периодом полураспада 2,6 года и $^{24}_{11}\text{Na}$ — 15 час.

Таблица 4. Теплофизические свойства натрия

Температура плавления, °С	97,8
Температура кипения, °С	886
Теплота испарения, Дж/кг	$3,9 \cdot 10^6$
Теплопроводность при 700 °С, Вт/М·°С	58,9
Плотность при 700 °С, кг/л	0,75

Натрий чрезвычайно химически активен, бурно реагирует с водой и пожароопасен.

Оксидная пленка на поверхности нержавеющей стали определяет стойкость стали в агрессивных средах. Натрий более активен, чем компоненты нержавеющей стали. Нержавеющая сталь в жидком натрии теряет оксидную пленку. Стойкость стали определяется растворимостью компонентов нержавеющей стали в натрии при рабочих температурах.

В потоке жидкого натрия присутствует “грязь”, состоящая из натрия, его окислов и гидридов, продуктов коррозии, продуктов деления и актиноидов из дефектных тепловыделяющих элементов. Ядерный реактор имеет зоны высоких и низких температур, высоких и малых скоростей, застойные зоны. С

изменением мощности реактора меняется температурный и гидродинамический режим. Охлаждающий контур имеет "холодную ловушку" для очистки натриевого теплоносителя и индикатор "грязи" периодического действия. Нет уверенности, что вся "грязь" сосредотачивается только в "холодной ловушке", возможно, она находится и в других местах натриевого контура или в движении и может при неблагоприятных условиях ухудшить прохождение теплоносителя в активной зоне. В системах с параллельными каналами закупорка отдельных каналов не может быть обнаружена. После загрязнения контура даже длительная очистка натрия с помощью "холодной ловушки" не гарантирует полного удаления "грязи" из активной зоны. Изучение поведения "грязи" в потоке натрия тем более важно, что на специальном аппарате был зафиксирован срыв накопившейся неконтролируемой "грязи" с забиванием части проходного сечения активной зоны.

Возможно интенсивное образование окислов натрия при неконтролируемом — аварийном — попадании в контур кислорода воздуха, что, например, имело место на реакторе "Суперфеникс". Отсутствие индикатора кислорода непрерывного действия и большие массы жидкого натрия привели к значительному попаданию воздуха в первый контур реактора до того, как это было обнаружено индикатором периодического действия. Создать индикатор кислорода в натрии — задача не простая, и соответствующего мирового опыта нет. Такой индикатор должен быть создан для безопасной работы натриевых контуров.

Очень опасно попадание машинного масла в натрий, и такая авария была на английском реакторе ПФР. Масло, попав в жидкий натрий, образует кокс и газообразные углеводороды, кокс может забить проходные сечения активной зоны, отложиться на трубках твэлов, создавая дополнительное термическое сопротивление. Прохождение же достаточно большого количества углеводородного газа через активную зону может вызвать положительный пустотный эффект в реакторе. Поэтому оборудование, работающее в контакте с натрием, не должно в принципе иметь масляных систем.

Опасным для реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением является образование по тем или иным причинам пустот (объемов без натрия) в активной зоне. Появление пустоты влияет на реактивность активной зоны, при этом может возникнуть положительный пустотный эффект реактивности — локальный всплеск выделения энергии, при том, что охлаждение тепловыделяющих элементов в зоне пузыря резко ухудшится. В результате температура тепловыделяющих элементов может достичь уровня разрушения.

Рабочая температура натрия на выходе из кассет активной зоны — около 550°C , а запас температуры до начала кипения натрия невелик и составляет $300\text{—}350^{\circ}\text{C}$. При аварийном уменьшении расхода натрия в кассете начинается вскипание и паровой пузырь так влияет на расход натрия, что он еще

уменьшается, а это вызовет увеличение пузыря и изменение реактивности активной зоны.

Если в результате аварийного расплавления (разрушения) твэлов случится обрушение топлива, то может произойти следующее.

1. Паровой взрыв натрия, причем взрыв даже небольшой интенсивности на реакторе с баковой компоновкой, не рассчитанной на высокое давление, может иметь тяжелейшие последствия.

2. Обрушение значительного количества высокообогащенного топлива может привести к образованию неконтролируемой критической массы ядерного горючего. Чтобы своевременно обнаружить рост температуры натрия, а значит, и возможность образования пустоты в кассетах, необходимо над каждой из них иметь температурные датчики (не менее двух), работающие на разных физических принципах. Датчики температур предупредят о росте температуры натрия, выходящего из кассеты, и оповестят о возможности возникновения парового пузыря до оповещения реактиметром.

Ядерно-физическая оптимизация реактора может в принципе снять вопрос о возможности возникновения положительного пустотного коэффициента реактивности. Возможно также сделать аппарат слабочувствительным к пустотам.

Взаимодействие натрия с водой. Натрий бурно взаимодействует с водой, выделяя свободный водород. Должны быть приняты меры, чтобы водород не вошел в контакт с кислородом воздуха. Продукты взаимодействия натрия с водой вызывают коррозию сталей, находящихся в зоне взаимодействия. На начальной стадии энергетического пуска реактора БН-350 из-за некачественных трубок парогенераторов были большие течи воды в натрий второго контура (нерадиоактивного). Персонал, принимавший участие в пуске АЭС, с честью справился с течами, были отремонтированы парогенераторы и реактор выведен на проектную мощность.

В принципе попадание воды в активную зону реактора на быстрых нейтронах недопустимо, а попадание водяного пара или продуктов взаимодействия натрия с водой вызовет забивание проходных сечений активной зоны, а возможно, и ядерную вспышку. Для реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем обязательным является промежуточный контур, отделяющий активную зону от воды.

У ядерных реакторов с натриевым теплоносителем стоимость установленной мощности, в основном из-за трехконтурной схемы, выше, чем у водоохлаждаемых двухконтурных ядерно-энергетических установок. В трехконтурной схеме даже самая тяжелая авария с парогенераторами не приведет к ядерной аварии. Более высокая стоимость трехконтурной схемы есть плата за безопасность. Всякие изобретения по замене трехконтурной схемы для реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем на двухконтурную недо-

пустимы. Авария на парогенераторе водоохлаждаемого реактора, которая может привести к обезвоживанию активной зоны, не менее безобидная, чем авария на реакторе с натриевым охлаждением. Однако кардинальных мер по защите активной зоны от обезвоживания при аварии парогенератора для аппаратов типа ВВЭР до сих пор нигде в мире не создано. Платой за меньшую цену установленной мощности ВВЭР по сравнению с БН является повышение риска аварий для реакторов ВВЭР.

Идеи, заложенные в ЯЭУ с водяным охлаждением для подводных лодок, послужили основой при создании реакторов для атомных станций. ЯЭУ подводных лодок должны были удовлетворять жестким весовым и габаритным требованиям. Трехконтурная схема вызвала появление теплообменников вода-вода. Как следствие, понижалась и так невысокая температура воды, отдающей тепло в парогенераторах. Появились дополнительные циркуляционные насосы. Весовые и габаритные характеристики парогенераторов ухудшались. Прямой перенос двухконтурной схемы на стационарные установки создал определенный аварийный риск при работе АЭС. Реакторы на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением не имели военного прототипа, они изначально сооружались в трехконтурном варианте для стационарной ядерной энергетики.

Натриевые пожары. Когда натрий горит, выделяется $1,9 \cdot 10^7$ Дж/кг энергии; для сравнения, если горит бензин, то выделяется $4,39 \cdot 10^7$ Дж/кг. В боксах, где начинает гореть натрий, повышается температура. Как следствие, там повышается давление, что может привести к разрушению боксов. При горении натрия образуется едкий дым. Самым опасным является пожар радиоактивного натрия, в котором, помимо радиоактивных изотопов натрия, всегда присутствуют элементы с наведенной радиоактивностью, продукты деления и актиноиды из негерметичных тепловыделяющих элементов. Если натрий выливается в пространство, где есть даже небольшое количество воды, то возникают микровзрывы с разбрасыванием горящего натрия. Взрывается водород, образовавшийся от взаимодействия натрия с водой.

В декабре 1995 г. на ядерном реакторе "Манжу" — первом реакторе на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением в Японии — появилась течь натрия во втором (нерадиоактивном) контуре, и вытекший в бокс натрий объемом 2-3 м³ загорелся. В Советском Союзе, Франции, Англии, США были натриевые пожары на лабораторных стендах и ядерных реакторах, но сгорания такого количества натрия, как в Японии, не было.

Натриевые пожары тушить опасно и неэффективно. Пожары сопровождаются выделением на единицу массы такого же количества тепла, как и при сгорании каменного угля, взрывами, разбрасывающими горящий натрий, появлением едкого натрия, обжигающего легкие, слизистую и кожу людей, попавших в зону пожара. Для локализации и предотвращения сгорания больших масс натрия надо иметь возможность слить натрий из аварийного контура в

специальные герметичные емкости и тем самым прекратить истечение натрия из контура в зону пожара.

Ядерный реактор "Манжу" выполнен по петлевой схеме, аналогичной схеме водоохлаждаемых реакторов под давлением. Масса натрия в первом контуре невелика, и она одна не может обеспечить съема тепла, накопленного ядерным топливом при работе на мощности, и тепла, выделяемого в топливе ядерными процессами, идущими после прекращения цепной ядерной реакции. В петлевом реакторе выделяемое в активной зоне тепло теплоносителем первого контура передается в теплообменниках металл-металл теплоносителю второго контура, обеспечивается рассеивание тепла у остановленного петлевого реактора.

Бактовая компоновка дает возможность иметь большие массы натрия при высоких температурах и низких давлениях, поэтому если даже произойдет осушение второго контура, то даже после работы на 100% мощности в активной зоне не произойдет аварийного перегрева. Это полностью подтвердили уникальные опыты в США на реакторе EBR-2. Реакторы-бридеры на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением — установки более высокого научно-технического уровня по сравнению с реакторами на тепловых нейтронах, охлаждаемых легкой водой.

Пожаров натрия можно полностью избежать, если во всех помещениях, в которых находится оборудование с жидким натрием, иметь вместо воздуха азот. Разумеется, это дорого, но зато полностью исключаются натриевые пожары.

В мире имеется большой положительный опыт эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Реактор-бридер на быстрых нейтронах — это будущее большой энергетики. На сегодняшний день нет нигде реально работающих реакторов на быстрых нейтронах с ненатриевым теплоносителем. Создание энергетических реакторов-бридеров на быстрых нейтронах с ненатриевым теплоносителем потребует целевой государственной программы, больших материальных затрат и работы больших высокопрофессиональных коллективов в течение 10—15 лет. С другой стороны, не имея веских данных о том, что с натриевым теплоносителем можно создать предельно безопасную ядерную энергетическую установку, а также учитывая, что Англия, США и Германия практически прекратили работы с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, что программы Франции в этом направлении также сильно сокращены, а работы по сооружению на паритетных началах европейского реактора остановлены, надо внимательно, непредвзято, с учетом мнения ученых Франции, Англии, США рассмотреть и решить, можно ли и нужно ли в России сооружать реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, работающие в замкнутом топливном цикле. При этом надо иметь в виду, что Россия — единственная в мире страна, обладающая уникальными исследованиями и реально

работавшими ядерно-энергетическими установками со свинцово-висмутовым теплоносителем, значительно более стойким ко всяким аварийным ситуациям.

Свинцово-висмутовая эвтектика. В Советском Союзе, как и в США, при создании ядерных энергетических установок для подводных лодок пошли по двум направлениям: водоохлаждаемые реакторы на тепловых нейтронах и реакторы на промежуточных нейтронах с металлическим охлаждением.

Американская атомная подводная лодка имела натриевый теплоноситель, что было ошибкой. Небольшие течи в воздух жидкого натрия создают сильное задымление, а в атомной подводной лодке, где в малых объемах живут и работают люди, такое задымление весьма опасно.

В результате очень внимательного, критического рассмотрения жидкометаллических теплоносителей (натрий, эвтектика натрий-калий, литий, ртуть, свинец, эвтектика свинец-висмут) А. И. Лейпунский, научный руководитель ядерных реакторов с жидкометаллическим охлаждением, остановился на эвтектике свинец-висмут. К этому времени в Советском Союзе уже работали лабораторные стенды с перечисленными теплоносителями. Эвтектика свинец-висмут содержит 43,5 % Pb и 56,5 % Bi и ее тепловые параметры приведены в табл. 5.

При рабочих температурах 500—600 °С она не горит на воздухе и слабо взаимодействует с водой. Освоена физхимия и технология работы со сплавом при температурах до 600 °С, подобраны подходящие конструкционные материалы. Даже при самых тяжелых авариях вскипание эвтектики маловероятно. На свинцово-висмутовой эвтектике можно строить реактор с любым спектром нейтронов, т.к. она слабо взаимодействует с нейтронами, поэтому в большой ядерной энергетике сплав свинец-висмут может быть в принципе универсальным теплоносителем.

В институтах и конструкторских бюро Советского Союза были выполнены уникальные расчетно-теоретические, экспериментальные и опытно-конструкторские работы, накоплен многолетний опыт эксплуатации лабораторных стендов, пилотных установок и реальных ядерно-энергетических установок. Масштабное сооружение водоохлаждаемых реакторов во всем мире, отсутствие на начальной стадии главного критерия — ядерной и радиационной безопасности, необычность теплоносителя, ошибочная небоязнь воды как теплоносителя ЯЭУ, и ссылки на то, что в США, стране, создавшей первое ядерное оружие и первые ядерные реакторы, создают только водоохлаждаемые реакторы, технологические недоработки на начальной стадии по поддержанию сплава на уровне заданной чистоты — все это затрудняло широкое использование эвтектики.

Конструкционные материалы в сплаве свинец-висмут в интервале рабочих температур 300÷600 °С лишаются оксидной защитной пленки, а растворимость компонентов конструкционных материалов в сплаве значительно выше, чем в жидком натрии при тех же температурах. Нужно было со-

здать стабильное подкисление сплава, чтобы все время поддерживать наличие пленки на стали, ”залечивая” обнажившиеся участки. Продукты коррозии и шлам необходимо удалять из потока для того, чтобы они не забивали проходные сечения каналов охлаждения. Избыток кислорода может образовать столь большое количество окислов, с которым не справятся ”ловушки”, и они накопятся в неконтролируемых местах, а при изменении теплового и гидравлического режимов забудут активную зону и приведут к тяжелой аварийной ситуации. Все испытанные конструкционные материалы могли лучше или хуже работать безопасно в узком интервале стабильного содержания кислорода. Удалось добиться того, что стали работали в сплаве многие тысячи часов. С этой весьма сложной задачей ученые России успешно справились.

Таблица 5. Теплофизические свойства эвтектики свинец-висмут

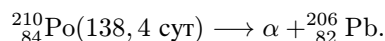
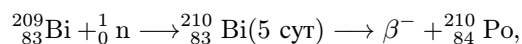
Температура плавления, °С	125
Температура кипения, °С	1670
Теплопроводность при 500 °С, Вт/М·°С	13,9
Плотность при 500 °С, кг/л	10

Проводились работы по созданию на стальных поверхностях защитных покрытий, стойких в сплаве свинец-висмут. Легководный теплоноситель не требовал такой сложной технологии и сложной аппаратуры для поддержания режимов. Все это послужило сильным препятствием для широкого внедрения в ядерную энергетику свинцово-висмутового теплоносителя.

Для жидкометаллических теплоносителей нужно было создать полностью герметичные циркуляционные контуры. Успешному решению этой в определенной степени непростой задачи способствовали специфические теплофизические параметры жидких металлов: низкое давление и высокая по сравнению с водяным теплоносителем температура. Температура плавления всех реальных жидкометаллических теплоносителей выше 100 °С, поэтому все участки циркуляционного контура должны обогреваться, и их температура должна не менее чем на 100 °С превышать температуру плавления теплоносителя. С этими задачами конструкторы успешно справились.

Применение свинцово-висмутового теплоносителя сопряжено с реальными трудностями.

1) Висмут, находящийся в нейтронных полях, образует полоний, опасный для жизни радиоактивный элемент, в результате реакции:



Здесь в круглых скобках указаны периоды полураспада соответствующего изотопа.

Наиболее опасно попадание полония в легкие и пищевой тракт. Однако α -активность полония дает возможность легко защищаться от его воздействия.

Температура плавления полония всего 254 °С, а упругость паров полония, находящегося в сплаве свинец-висмут, значительно ниже, чем у чистого полония. Сравнительно высокая температура 125 °С плавления эвтектики свинец-висмут создает условия для застывания пролитого сплава, в котором находится полоний. Накопленный опыт показывает, что покрытие не очень толстым слоем лака застывшей лужи из сплава защищает воздух от попадания в него полония. Резиновые перчатки защищают кожу рук от воздействия полония. Если потребуется очищать сплав свинец-висмут от полония, то это можно сделать без больших усилий, т.к. имеются технологии, позволяющие очищать сплав свинец-висмут от полония и концентрировать его в заданных объемах.

2) Высокая коррозионная активность сплава свинец-висмут. На современном этапе этот серьезный недостаток хорошо изучен, разработаны методы его нейтрализации, и есть научные идеи повышения стойкости конструкционных материалов в сплаве свинец-висмут при более высоких температурах. Для этого необходимо продолжить поиск технологичных стойких покрытий, а также других материалов, стойких в сплаве свинец-висмут при уже освоенных и более высоких температурах.

3) Дороговизна висмута из-за малого содержания его в земной коре. Можно ожидать, что, если появится большой спрос на висмут, геологи найдут промышленные месторождения.

Жидкометаллический теплоноситель в процессе эксплуатации не теряется. Одна из особенностей всех жидкометаллических теплоносителей — это возможность использовать их многократно, перегружая после очистки из установки, закончившей свое существование, во вновь создаваемую. Имея опыт сооружения АЭС, трудно себе представить, что будет задан такой темп ввода АЭС, что добыча висмута будет сдерживать развитие атомной энергетики.

Свинец. Теплофизические параметры свинца приведены в табл. 6.

Для того чтобы испарить один литр свинца или сплава свинец-висмут, нужно втрое больше энергии, чем на один литр натрия, что очень важно при тяжелых авариях.

Свинец в качестве теплоносителя для ядерно-энергетических установок подводных лодок рассматривался еще в 50-х годах, однако из-за более высокой, чем у эвтектики свинец-висмут, температуры плавления он был исключен из дальнейших проработок. Для реакторов на быстрых нейтронах — прото-

типов большой энергетики — свинец не рассматривался, т.к. он уступает натрию по теплофизическим параметрам. Интерес к свинцовому теплоносителю как гаранту безопасности в ядерной энергетике возник в 80-х годах после аварии в Чернобыле.

Таблица 6. Теплофизические свойства свинца

Температура плавления, °С	327,4
Температура кипения, °С	1725
Теплопроводность при 500 °С, Вт/М·°С	33,5
Плотность при 500 °С, кг/л	11,3
Теплота парообразования, Дж/л	$0,859 \cdot 10^6$

При освоении свинца как теплоносителя многое можно позаимствовать в физхимии и технологии, уже разработанных для сплава свинец-висмут и натрия. Опыта работы со свинцом как теплоносителем пока нет, а каждый теплоноситель имеет свои особенности, и надо научиться управлять свинцовым теплоносителем не хуже, чем мы можем сегодня это делать со свинцово-висмутовым.

Работы в области физической химии и технологии жидких металлов как теплоносителей в ЯЭУ и паров металлов как рабочих тел выполнялись крупными высокопрофессиональными коллективами в течение многих лет. В разной степени в настоящее время изучены: натрий, эвтектика натрий-калий, литий, цезий, калий, эвтектика свинец-висмут, ртуть. Выполненные комплексные исследования — это крупный успех отечественной науки. По многим металлам научные исследования доведены до реальных конструкций. Действующие ЯЭУ в России, в которых применяются жидкие металлы, созданы с прямым использованием этих исследований. В мировой прессе на эту тему было мало публикаций и они лаконичны. Создавать науку и технологию жидкометаллических теплоносителей нужно было самим. Конечно, не все исследования завершены, и много еще надо сделать. Эти исследования должны стать одним из главных слагаемых максимально безопасной ядерной энергетики. У России на сегодняшний день есть преимущество в глубине и полноте исследований одного из основных слагаемых безопасной ядерной энергетики — жидкометаллических теплоносителей.

12. ОРУЖЕЙНЫЙ ПЛУТОНИЙ

В России и США накоплен огромный арсенал ядерного оружия. Разоружение, которое невозможно без демонтажа ядерного оружия, ставит вопросы о том, что делать с изымаемым из ядерных бомб кондиционным плутонием, можно ли его как-то использовать в атомной электроэнергетике или нужно

его хранить под наблюдением в специально созданных хранилищах, нужно ли его уничтожать, используя ускорительную технику, или навсегда помещать его в глубь Земли. Возможные ответы на подобные вопросы можно разделить на две части:

- 1) использовать плутоний с максимальной продуктивностью в мирных целях и, прежде всего, в большой ядерной энергетике, а до той поры хранить;
- 2) уничтожить немедленно и любыми способами.

Плутониевая проблема сильно политизирована. Очень часто вокруг нее ведутся совершенно не профессиональные дискуссии, как правило, направленные на то, чтобы Россия в одностороннем порядке уничтожила как можно больше плутония и сделала бы это немедленно. Плутоний — чуждый современной природе элемент. Самый долгоживущий изотоп плутония — плутоний-244 с периодом полураспада $8,08 \cdot 10^7$ лет. Значения периодов полураспада всех изотопов плутония много меньше возраста Земли, поэтому к нашему времени все они распались. Следы плутония обнаружены в урановых рудах как следствие воздействия нейтронов спонтанного деления урана. В 1940 г. Г. Сиборг получил первые микрограммы плутония-239 из облученного нейтронами урана-238.

Массовая наработка плутония-239 во всех странах, владеющих ядерным оружием, производилась в ядерных реакторах канального типа с топливом, представляющим собой металлический природный уран, зачехленный в трубки из алюминиевого сплава, теплоносителем — легкой водой при температуре до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, замедлителем в виде графитовых блоков высокой чистоты. Затем радиохимическим путем из выгруженных высокорadioактивных блоков урана выделялся плутоний-239.

Надо помнить, что на производство больших количеств плутония-239 наша страна затратила огромные материальные средства, используя высочайший научный потенциал. Уничтожить плутоний, не получив от него пользу, ни в коем случае не допустимо, а продавать кому бы то ни было плутоний — исходный материал ядерного оружия — преступление.

Рассмотрим, как можно использовать кондиционный плутоний.

Если бы развитые страны, владеющие ядерным оружием, пошли на интенсивное создание ядерной электроэнергетики, то плутоний можно весьма эффективно использовать как стартовое ядерное горючее.

Плутоний можно использовать в современной ядерной энергетике, обогащая природный уран, и такое уран-плутониевое топливо необходимо использовать в реакторах с глубоким выгоранием. Реакторы должны быть с невысоким объемным выделением энергии, длительной кампанией, оптимизированной единичной мощностью и отвечать требованиям максимальной безопасности. Выгружаемый из таких реакторов плутоний окажется высокофоновым, плохо приспособленным для массового производства ядерного оружия.

В настоящее время нет другого выхода, как хранить плутоний в специ-

ально созданных хранилищах до того момента, когда он понадобится для большой энергетики.

Человечество не может одновременно и навсегда избавиться от плутония. Оно научилось его нарабатывать в ядерных реакторах из урана-238 и затем очищать радиохимически от вредных примесей. Человечество уже создало реакторы-бридеры на быстрых нейтронах, где в экранах можно нарабатывать плутоний-239 из урана-238 более интенсивно, чем в специально созданных конвертерах.

Когда атомных станций станет больше, чем электростанций на углеводородном топливе, а это неизбежно произойдет во всех развитых странах уже к середине двадцать первого века, возникнет большая атомная энергетика, для которой потребуется большое количество ядерного горючего. Природного урана-235 окажется недостаточно, и надо будет переходить на уран-плутониевое топливо, возвращать в ядерные реакторы все актиноиды, освобожденные от продуктов деления. Уран-урановое топливо останется в реакторах на тепловых нейтронах, как правило, специального назначения. Переход на уран-плутониевое топливо связан с созданием замкнутого топливного цикла с радиохимической переработкой выгружаемого из реакторов топлива.

Современная радиохимия возникла из необходимости выделения плутония-239 из выгружаемых блочков урана-238 конвертеров-наработчиков. Главная задача состояла в том, чтобы как можно лучше очистить плутоний от продуктов деления, и с этой задачей советские радиохимики блестяще справились. Оптимальны ли имеющиеся методы отделения актиноидов от продуктов деления для большой атомной энергетики, где будет функционировать много реакторов-бридеров на быстрых нейтронах, реакторов с высокой глубиной выгорания, и нужно ли разрабатывать новые радиохимические методы или можно обойтись модернизацией существующих?

Задачи, стоящие перед радиохимией большой ядерной энергетики, несколько другие, чем перед традиционной.

1. Надо глубоко очищать продукты деления от актиноидов, а не актиноиды от продуктов деления с тем, чтобы упростить обращение и длительное хранение или захоронение продуктов деления. Наличие небольшого количества продуктов деления в изготавливаемом уран-плутониевом топливе для энергетических реакторов не критично, т.е. возникла задача, обратная той, что была при создании ядерного оружия.

2. Потери радиоактивных продуктов из радиохимических циклов должны быть минимизированы или вообще отсутствовать. Ведь удалось же сделать реакторы на быстрых нейтронах без потери натрия в окружающую среду, а большие массы перерабатываемого топлива могут сильно обострить проблему потерь радиоактивных продуктов и тем самым создать серьезные помехи в становлении атомной энергетики. Большая атомная энергетика должна отвечать высоким требованиям по ядерной и радиационной безопасности не

только к ядерным реакторам, но и к радиохимическим заводам, которые несут в себе повышенную радиационную опасность, а так же, при преступных нарушениях, и ядерную опасность.

Следует четко различать радиационное загрязнение земли и водоемов России, вызванное оправданной спешкой, отсутствием опыта, несовершенством технологии при создании ядерного оружия Советского Союза, и несовершенством технологий большой ядерной энергетики, которая может дать ничем не оправданное радиационное загрязнение. Можно и нужно создать безопасную и малоотходную радиохимию, без чего не может быть большой ядерной энергетики.

Переход на ядерное топливо, обогащенное высокофоновым плутонием, невозможен без создания робототехники, способной работать в радиоактивных полях. Такая техника будет нужна для изготовления ядерного топлива, тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок. Эксплуатация большого количества ядерных реакторов, радиохимических заводов и заводов, работающих с высокофоновым топливом, остро ставит вопрос о ядерной и радиационной безопасности. Вывод из эксплуатации оборудования, отслужившего свой срок или вышедшего из строя в результате аварии, приведет к появлению больших масс с наведенной или плохо отмытой радиоактивностью, поэтому будут нужны безопасные методы обращения с этими изделиями, надежная изоляция их от окружающей природной среды.

13. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

В настоящее время имеется большое количество идей по обращению с радиоактивными продуктами. Некоторые из них уже используются, другие находятся в стадии научной разработки, третьи — в виде чистых идей.

Первый и главный вопрос в том, где должны размещаться радиоактивные продукты — на земле или под землей. Если на земле, то с возможностью наблюдения за ними, а при необходимости — эвакуации. Такие хранилища должны тщательно охраняться в течение многих лет. Если под землей, то навечно, без возможности их извлечения. Есть ли гарантии, что человеческие и природные катаклизмы не смогут разгерметизировать такие подземные хранилища, и что может произойти в этом случае с учетом того, что радиоактивность нельзя уничтожить никакими химическими методами? Можно ли иметь химические соединения, растворимые в воде или нерастворимые, более или менее стойкие к радиационному излучению радиоактивных отходов?

Второй вопрос, в каком виде — растворов или твердых образований — производить захоронение отходов. Некоторые страны радиоактивные отходы, отвержденные цементом, стеклом или органикой в баках из нержавеющей

стали, сбрасывают в океан. В Советском Союзе практиковалась закачка жидких радиоактивных отходов, состоящих из продуктов деления и актиноидов, в линзы с пресной водой. По мнению геологов такие линзы не подвержены разгерметизации. Напомним, что периоды полураспада актиноидов исчисляются тысячелетиями, а сами они не только радиоактивны, но и ядовиты для всего живого.

В свое время рекомендовалось хранить бочки с радиоактивными отходами в шахтах, из которых была извлечена поваренная соль, при этом забыли о повышенной хлорной коррозии в объемах, где имеется соль.

Разбавление радиоактивных изотопов в больших массах воды до достижения безопасных концентраций недопустимо, т.к. в природе есть процессы и организмы, способные снова сконцентрировать разбавленное.

Возникает очень важный вопрос об уничтожении (трансмутации) радиоактивных отходов с использованием нейтронных реакций. Так, например, сейчас становится ясным, что все актиноиды, включая нептуний, америций, кюрий, можно сжечь в ядерных реакторах. Возможно, для этого будет выгодно использовать термоядерные нейтроны. Главная задача — не терять актиноиды в замкнутом топливном цикле. Имеются отрицательные ответы на вопрос о возможности трансмутации стронция, цезия и углерода-14.

Последние исследования отечественных физиков-ускорительщиков и физиков-ядерщиков делают возможным полное уничтожение америция, кюрия и нептуния, а также продуктов деления, обладающих малыми сечениями, при энергиях нейтронов, свойственных реакторам деления и синтеза.

Очень важной для большой ядерной энергетики с использованием в будущем термоядерных установок представляется проблема трития. При эксплуатации АЭС и работе радиохимических заводов происходит выход трития в окружающую среду. Тритий также образуется при делении актиноидов, т.к. на каждые десять тысяч актов деления происходит одно деление тройное с появлением трития. Так, например, на АЭС мощностью 1 ГВт (э) за год работы сжигается около 1000 кг актиноидов и образуется около 1,25 г трития, что, в общем, немного. В натриевом теплоносителе тритий образуется из лития, примеси которого всегда имеются в исходном натрии. С течением времени этот литий полностью выгорает. Тритий образуется из бора, который широко используют как поглотитель в виде металлических стержней регулирования на всех ядерных аппаратах или жидкого раствора в водоохлаждаемых реакторах (борированная вода). В воде тритий образует сверхтяжелую воду и попадает в окружающую среду при потерях воды первого контура. В реакторах с жидкометаллическим теплоносителем тритий в виде газа может диффундировать в окружающую среду через горячие стенки. В термоядерных установках тритий является ядерным горючим, иными словами, тритий — это топливо термоядерного синтеза. Открытыми остаются вопросы потерь трития при его получении, хранении, изготовлении мишеней или подаче в термо-

ядерную установку, в термоядерных реакциях и, прежде всего, в результате диффузии через первую стенку. Поэтому при получении лицензии на сооружение энергетической термоядерной установки надо будет доказать, что тритиевая проблема решена.

В настоящее время в вентиляционные трубы АЭС сбрасываются пары радиоактивной воды, содержащей тритий и криптон из негерметичных твэлов. Пока их мало, и они не оказывают влияния на атмосферу. Очевидно, когда их станет много, они окажут серьезное ионизирующее воздействие на атмосферу, их потребуются улавливать.

Все перечисленные вопросы по радиационной опасности имеют положительное решение, и нет принципиальных трудностей, исключающих возможность иметь ядерную энергетику без радиационного воздействия на окружающую среду, более того, имеются научные основы для создания предельно безопасной ядерной энергетики, не угрожающей людям ядерными или радиационными катастрофами.

14. МАКСИМАЛЬНО БЕЗОПАСНЫЕ ЯЭУ

По-видимому, в своем развитии ядерная энергетика будет использовать в ЯЭУ реакторы различных типов. Рассмотрим те из них, которые наиболее полно отвечают требованиям максимальной безопасности и потому могут стать основой большой ядерной энергетики.

Гелий-графитовые реакторы с ядерным топливом, оптимизированной единичной мощностью и умеренным объемным выделением энергии представляются довольно перспективными аппаратами, т.к. такой реактор является самогасящимся.

При полной потере гелия большая масса и уникальные свойства находящегося в активной зоне графита (температура сублимации 4000°C , теплопроводность, как у металлов, и высокая теплоемкость при высоких температурах) делают возможным аккумуляцию большого количества энергии без разрушения конструкции. Цепная ядерная реакция при повышенных температурах гложет, а остаточное тепловыделение сбрасывается через наружную поверхность в окружающую среду, и система приходит в равновесие.

Керновое топливо и графитовая матрица должны удерживать основную массу продуктов деления, актиноидов. Гелий не активизируется, однако в нем будет некоторое количество газообразных продуктов деления и пыль с наведенной радиоактивностью, что при потере гелия в окружающую среду не приведет к сильному радиационному загрязнению. Однако должны быть приняты защитные конструктивные меры для того, чтобы кислород воздуха не вошел в контакт с разогретым графитом через аварийное отверстие, по которому гелиевый теплоноситель покинул активную зону.

Реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем оптимизированной единичной мощности, умеренным объемным выделением энергии, температурой сплава на выходе из активной зоны до 600 °С и баковой компоновкой (причем бак имеет двойные стенки с зазором) представляется аппаратом, работающим с любым спектром нейтронов и коэффициентом воспроизводства как больше, так и меньше единицы.

Такой реактор устойчив к авариям, т.к. аварийное вытекание сплава в зазор между стенками бака не приводит к оголению активной зоны, а авария парогенератора не ведет к попаданию пара в активную зону.

Реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем и тяжеловодным замедлителем аналогичен предыдущему, но имеет баково-канальную компоновку и температуру сплава на выходе 500 °С. В нем слив тяжелой воды гасит цепную ядерную реакцию, и сплав свинец-висмут, который не может покинуть активную зону, снимает остаточное тепловыделение.

Реактор со свинцовым теплоносителем. Если мнения о полониевой опасности и недостаточном количестве висмута станут преобладающими, то в качестве теплоносителя можно применить свинец, исключив висмут. По объему физико-химических и технологических исследований свинец уступает сплаву, и должен быть выполнен полный объем работ для того, чтобы свинец стал теплоносителем.

Гомогенный реактор на солях ${}^7\text{LiF}$, BeF_2 , UF_4 и ThF_4 . Жидкосолевые ядерные реакторы допускают минимальный запас реактивности благодаря регулируемой непрерывной подпитке ядерным горючим и сырьевым ядерным горючим. Солевые реакторы обладают мгновенным отрицательным температурным коэффициентом реактивности, обеспечивающим саморегулируемость реактора по температуре. В гомогенных ядерных реакторах нет высокотемпературного (относительно теплоносителя) ядерного топлива. Такой аппарат имеет огромное преимущество, т.к. для него не нужны в массовом масштабе твэлы (в большой ядерной энергетике) из высокофонового ядерного топлива, с ним исключаются все тяжелые аварии ЯЭУ, вызываемые поломкой тепловыделяющих элементов.

Однако гомогенный ядерный реактор лишен сразу двух барьеров удержания продуктов деления и радиоактивных актиноидов — твердого топлива и металлической оболочки твэла. Жидкосолевые ядерные реакторы обладают высокой ядерной безопасностью, но при этом представляют собой сверхвысокую радиационную опасность. Пока не ясно, можно ли конструктивными решениями снять этот вопрос, непонятно также, как поведут себя соли при радиолитизе и пиролизе, какие физико-химические процессы будут в них происходить при появлении значительного количества продуктов деления и искусственных актиноидов, что случится, когда выпадут в осадок актинодосодержащие соединения при длительной кампании. Неясно поведение

в солях продуктов коррозии и эрозии графита и конструкционных материалов теплообменников, корпуса реактора, насосов.

В солях образуется тритий из лития-7, бериллия-9, а также за счет тройного деления ядерного горючего. Тритиевая проблема осложняется еще и тем, что тритий не вступает в химические соединения в реакторном объеме и присутствует там в виде газа. Все узлы активной зоны гомогенного реактора находятся при температуре около 600 °С, при которой тритий легко диффундирует через металлические стенки в окружающую среду.

В результате ядерных реакций актиноидов, а также лития и бериллия, высвобождается атомарный фтор и находится в активной зоне при высоких температурах и в больших количествах (при длительных кампаниях). Необходимо предварительно выполнить комплексные теоретические и экспериментальные исследования, чтобы получить ответы на вопросы о том, как будет себя вести фтор, каким будет его взаимодействие с конструкционными материалами и в какие химические соединения с ними и продуктами деления он будет вступать. Несмотря на ряд полезных качеств гомогенного аппарата по сравнению с гетерогенным, не получив позитивные ответы на затронутые вопросы, соорудить солевой реактор преждевременно.

15. РЕАКТОРЫ ДЕЛЕНИЯ С НЕЙТРОННОЙ ПОДСВЕТКОЙ

К идее создания реактора деления тяжелых ядер с нейтронной подсветкой от внешнего источника возвращались многократно, и всякий раз главным препятствием было отсутствие ускорителей и лазеров большой мощности, которые могут работать в режиме энергетики, а не в режиме лабораторной установки для научных исследований. Нейтронная подсветка возможна на следующих установках.

Импульсный реактор деления. Активная зона реактора деления разделяется на две части: стационарную — подкритичную часть и подвижную, также подкритичную, а надкритичность активной зоны возникает при вводе подвижной части в неподвижную, поэтому реактор находится то в подкритичном режиме, то в надкритичном. Серьезными вопросами являются охлаждение подвижной части активной зоны и работа твэлов в пульсирующем режиме. Такой реактор не требовал новой сложной техники, поэтому и был сооружен первым из серии реакторов с нейтронной подсветкой в 60-х годах в Советском Союзе.

Этот реактор был исследовательский (не энергетический). Энергия, выделенная при ядерных вспышках, поглощалась теплоемкостью установки и рассеивалась в окружающую среду, и время охлаждения установки лимитировало частоту ядерных вспышек. Источник энергии, необходимый для работы реактора, — промышленная электрическая сеть.

Ускорители. Используя ускоритель, можно получить поток нейтронов от взаимодействия ускоренных ионов с ядрами тяжелой мишени. Подсветка потоком нейтронов подкритичной сборки гарантирует полную ядерную безопасность, не подверженную ошибкам операторов и диверсиям, т.к. ядерная вспышка в активной зоне, способная привести к тяжелейшей аварии, полностью исключается. Такой ядерный реактор с гарантированным отводом энергии при любых режимах ядерно-энергетической установки отвечает самым жестким требованиям безопасности.

Подсветка потоком нейтронов от постороннего источника имеет смысл, если будет обеспечиваться достаточная подкритичность. Это значит, что такая подсветка требует большой энергии, вводимой в активную зону от источника нейтронов, не зависящего от деления ядер актиноидов. Около 30 % энергии ионного пучка через тепловой цикл ЯЭУ будет возвращен в виде электроэнергии. Подкритичность активной зоны в зависимости от типа реактора будет уменьшаться или увеличиваться со временем, что определит длительность непрерывной эксплуатации. Изменяя мощность подсветки, можно регулировать мощность ЯЭУ и компенсировать изменение подкритичности, т.е. регулирование выделением энергии всей ЯЭУ передается ускорителю ионов, поэтому исчезает необходимость иметь быстродействующую систему аварийной защиты в активной зоне. Разумеется, ускоритель должен иметь абсолютно надежный ограничитель энергии, передаваемой им потоку ионов.

В такой ядерно-энергетической установке не нужно иметь запас реактивности, а значит, поглощать избыточные нейтроны. Ядерное топливо в подкритической сборке используется более рационально. Очевидно, большие трудности встретятся при создании мишени, где должна происходить перезарядка ионов высокой энергии, полученных на ускорителе, на нейтроны. Энергия, передаваемая от ионов нейтронам, составит мегаватты, и необходимо обеспечить съем энергии, превращенной в тепло при перезарядке. Хотя мишень меньше реактора, тем не менее это тоже энергетическая установка, и ее сооружение поднимает вопросы о материале мишени и его фазовом состоянии, о постоянстве массы мишени и ее активации, каково ее время "жизни" и как часто должна производиться выгрузка отработанной мишени.

Открытым является вопрос, реально ли создание одного ускорителя мощностью 100—200 МВт или придется создавать ускорители меньшей мощности. Создание работающей активной зоны деления актиноидов практически любой малой мощности дает возможность перед сооружением головного образца энергетической установки, вырабатывающей электроэнергию, создать модельную установку малой мощности, на которой можно проверить в реальных условиях все основные принципы, заложенные в нее, и вовремя внести исправления.

Возможен мультимодульный вариант энергетической установки, а активную зону можно сделать практически любой мощности в диапазоне от кВт

до ГВт. Создается оптимизированный ускоритель, и под него создается подкритическая активная зона.

В современной ядерной энергетике оптимальная единичная мощность ядерного реактора глубоко не изучена. Стремление увеличить единичную мощность диктуется только технико-экономическими соображениями, не изучено влияние единичной мощности и количества загруженного в реактор обогащенного ядерного горючего на ядерную безопасность, на развитие аварии, на масштаб радиационных выбросов, если авария возникнет. Ряд реакторостроителей считают, что любую необходимую мощность выгоднее набирать из ядерно-энергетических установок средней мощности, собранных в цехах заводов-изготовителей, а не на монтажной площадке.

В настоящее время не все принципиальные вопросы, связанные с ядерными процессами в активной зоне с подсветкой потоком ионов, получаемым на ускорителе, решены. Немедленное сооружение такой гибридной установки преждевременно. Должны быть проведены фундаментальные расчетно-теоретические и экспериментальные исследования. Такая гибридная ядерно-энергетическая установка имеет смысл только в том случае, если она может обеспечить более высокую ядерную безопасность (для чего она и может быть создана), чем максимально безопасные ядерные реакторы будущего без нейтронной подсветки или с подсветкой нейтронами, получаемыми с использованием других принципов.

При использовании ускорителя для нейтронной подсветки есть только один источник энергии — деление тяжелых ядер. Часть электрической энергии, вырабатываемой на таком реакторе в виде электроэнергии, должна быть потрачена на работу ускорителя. Суммарный коэффициент полезного действия у такой гибридной установки, очевидно, будет невысок. Если такой гибридный реактор обеспечит создание предельной безопасности, то придется смириться с неизбежностью, что за безопасность надо платить.

Термоядерная установка. При делении актиноидов получается энергия, в которой 2,5 % приходится на быстрые нейтроны и 83,5 % — кинетическая энергия продуктов деления. Энергия, получаемая при синтезе дейтерия с тритием: 80 % в виде 14 МэВ нейтронов и 20 % в виде 3,5 МэВ альфа-частиц. Основная часть энергии при делении тяжелых ядер приходится на продукты деления, которые находятся в ядерном топливе и в нормальном режиме энергетического реактора его не покидают, разогревая все топливо. При реакции синтеза легких ядер основная часть энергии уносится быстрыми нейтронами, меньшая часть — ядрами гелия. Нейтроны и ядра гелия разлетаются от того места, где произошел синтез ядер, и поток термоядерных нейтронов, несущих большую часть выделяемой энергии реакции синтеза, может быть использован вдали от места их возникновения.

При подсветке нейтронами термоядерной реакции имеются два источника энергии: термоядерный синтез и деление тяжелых ядер, и доля каждого

слагаемого может меняться в довольно широком диапазоне в зависимости от мощности термоядерного реактора. Для осуществления термоядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы нужна (по принятому варианту) электрическая энергия для получения лазерных лучей. Термоядерная часть ядерной энергетической установки должна работать непрерывно в течение заданного времени для бесперебойной выработки электроэнергии.

Инерциальное удержание плазмы — обжатие мишени лучами — дает принципиальную возможность для нового решения вопроса первой стенки, т.к. место взрыва мишени (внутри взрывной камеры) может быть окружено жидкими струями лития для наработки трития или твердым ураном-238 для наработки плутония-239. Родившиеся нейтроны не требуется направлять через стенку в бланкет для нейтронных реакций. Термоядерные реакции на базе синтеза дейтерий-тритиевой смеси должны быть безопасными в обращении с тритием. Гибридные ядерные энергетические установки должны выдержать и даже превзойти, прежде всего, по ядерной безопасности, существующие реакторы деления актиноидов и быть конкурентоспособными с перспективными ядерными реакторами деления.

Гибридные ядерные реакторы с нейтронной подсветкой с использованием ускорителя или лазера дают возможность отказаться от механического управления цепной ядерной реакцией, перейдя на чисто электрическое управление.

Для того чтобы в реакторах деления тяжелых ядер с гетерогенной активной зоной иметь достаточно длительную кампанию, в активную зону изначально вводится больше делящегося материала, чем это нужно для начала ядерной реакции, и избыток нейтронов поглощается твердыми или жидкими поглотителями нейтронов, которые и регулируют энергию, выделяемую при ядерных процессах. Чаще всего в качестве поглотителя используется бор. Природный бор состоит из двух изотопов: ^{10}B — 18,7 % и ^{11}B — 81,3 %. В нейтронных полях идут ядерные реакции:



Для аварийной останковки в активную зону вводятся с требуемой скоростью твердые или жидкие поглотители. Такой ввод осуществляется механизмами, поэтому нельзя, в принципе, исключить опасность того, что механизмы не сработают, что стержни-поглотители может заклинить или что они войдут в активную зону не в полном объеме и с меньшей скоростью. То же самое относится к жидким поглотителям, применяемым в водо-водяных реакторах. В стержнях-поглотителях за счет ядерных процессов выделяется в несколько раз меньшая энергия, чем в тепловыделяющих элементах. Эта энергия снимается потоком теплоносителя. Нарушение охлаждения может привести к разогреву стержней и их деформации. Также нельзя, в принципе, исключить

вывод стержней поглотителей из активной зоны, что приведет к тяжелой аварии — разгону ядерного реактора.

В ядерном реакторе с нейтронной подсветкой сырьевым ядерным горючим может быть или природный уран или торий. Нужно ли обогащать сырьевое ядерное горючее или можно работать без обогащения? Подсветка может производиться потоком нейтронов любой энергии, если для этого использовать ускоритель ионов. В большой ядерной энергетике с замкнутым топливным циклом с каким сырьевым ядерным горючим — природный уран или торий — выгоднее работать с позиции радиохимической переработки выгружаемого топлива? Какого выгорания можно достигнуть в реакторе с подсветкой? Можно ли получить более глубокое выгорание, чем в ныне действующих реакторах, и тем самым сделать радиохимическую переработку для большой энергетике не обязательной? Какой состав топлива после радиохимической переработки выгодно загружать в реактор с подсветкой?

Подсветка должна обеспечить компенсацию изменения реактивности активной зоны в течение достаточно большого времени с тем, чтобы перегрузка топлива в активной зоне не была бы слишком частой. В каком интервале изменения реактивности можно обеспечить гарантированную реактивностную безопасность? Регулирование мощности и аварийное глушение цепной ядерной реакции, а также гарантированное исключение разгона реактора ускоритель может полностью взять на себя. В активной зоне с нейтронной подсветкой не нужно будет размещать ни стержни, регулирующие мощность, ни стержни аварийной защиты. Скорость воздействия на нейтронные процессы при электрическом отключении ускорителя значительно превышает любые самые быстродействующие механизмы гашения цепной ядерной реакции путем введения в зону поглотителей нейтронов.

Какая энергия подсвечивающих нейтронов оптимальна? При оптимизации энергии нейтронов подсветки и доли этих нейтронов в цепной ядерной реакции должно выполняться главное требование — максимальная ядерная безопасность. Необходимо учесть, как энергия нейтронов подсветки повлияет на изотопный состав продуктов деления и актиноиды. При выборе энергии нейтронов подсветки должна быть проведена экономическая оценка ускорителя и перезарядного устройства. Аварии на ускорителе и перезарядном устройстве ни при какой ситуации не должны повлиять на возникновение аварии в активной зоне. Какая доля сырьевого ядерного горючего будет делиться прямо нейтронами подсветки; как пойдут процессы разветвленной цепной реакции; возможна ли потеря контроля и управления?

При использовании в активной зоне электроядерного реактора в качестве теплоносителя эвтектики свинец-висмут или чистого свинца можно будет осуществлять перезарядку ионов в самой активной зоне. В этом случае над зеркалом теплоносителя в активной зоне надо иметь не инертный газ, а вакуум. Высокая температура кипения эвтектики (≈ 1670 °C) дает возможность при

рабочих температурах теплоносителя 500—550 °С иметь малую плотность паров свинца и висмута в вакууме. Можно ожидать, что ядерный реактор с нейтронной подсветкой и гарантированным отводом выделенной энергии при любых ситуациях будет самым безопасным реактором из всех ядерных реакторов будущего. Регулирование энергии, генерируемой в реакторе деления с нейтронной подсветкой за счет регулирования энергии пучка ионов ускорителя, дает возможность более экономично использовать ядерное горючее. Жидкометаллическое охлаждение ядерного реактора позволяет иметь достаточно высокие термодинамические параметры при преобразовании тепловой энергии в электрическую. Все эти слагаемые могут обеспечить приемлемый КПД ЯЭУ с нейтронной подсветкой.

Имея ускорители, надежно работающие в энергетическом режиме, можно использовать их для трансмутации радиоактивных отходов, а также рассмотреть возможность использования пучка ионов высокой энергии для инерциального термояда.

Трансмутация. Высокотоксичная и долгоживущая радиоактивность искусственных актиноидов и продуктов деления тяжелых ядер заставляет обратить особое внимание на радиоактивные отходы. Ниже приведем искусственные актиноиды, образующиеся в активных зонах ядерных реакторов деления, и их периоды полураспада.

^{241}Am	$\tau_{\frac{1}{2}}$	=	432, 2 года
^{243}Am	$\tau_{\frac{1}{2}}$	=	7380 лет
^{242}Cm	$\tau_{\frac{1}{2}}$	=	162, 8 сут
^{244}Cm	$\tau_{\frac{1}{2}}$	=	18, 1 лет
^{237}Np	$\tau_{\frac{1}{2}}$	=	$2, 14 \cdot 10^6$ лет.

Малые актиноиды можно сжигать в реакторах на быстрых нейтронах, подмешивая их в уран-плутониевое топливо в строго обоснованных количествах, или выжигать их в специальном ядерном реакторе — выжигателе малых актиноидов. В реакторах на тепловых нейтронах нельзя уничтожить малые актиноиды, напротив, в активных зонах этих реакторов происходит их накопление. В реакторах на быстрых нейтронах можно только сократить количество малых актиноидов, но не уничтожить их полностью, т.к. происходит их непрерывная наработка в ядерном горючем. Полностью искусственные актиноиды можно уничтожить, облучая их нейтронами, получаемыми от других, не связанных с реакцией деления тяжелых ядер источников. Нейтроны термоядерной реакции или поток ионов, получаемый на ускорителе, могут очистить топливный цикл от избытка искусственных актиноидов.

Не все радионуклиды продуктов деления представляют одинаковую радиологическую опасность. Нуклиды, образующие одновалентные ионы, растворимы в воде и могут быть вместе с водой вынесены в биосферу. Особо опасны такие продукты деления, как $^{90}_{38}\text{Sr}$, имеющий период полураспада 28,6 лет и являющийся химическим аналогом кальция, и $^{137}_{55}\text{Cs}$, с периодом полураспада 30 лет — аналог калия. На ускорительной технике можно уже в настоящее время получать ионы с энергией в несколько ГэВ, и есть надежда, что с помощью таких ионов можно трансмутировать стронций и цезий. Известно, что частицы высоких энергий разрушают ядра с выделением большого количества нейтронов, и желательно их использовать. Трансмутация достигнет цели, если радиоактивные изотопы будут полностью уничтожены в результате глубокого разрушения их ядер или переведены в короткоживущие или долгоживущие изотопы.

Для промышленной трансмутации необходимо разработать массовое производство высокорadioактивных мишеней. Очевидно, мишени должны иметь систему теплоотвода выделяемой энергии. В зависимости от успехов в радиохимии, мишени из стронция и цезия будут иметь разное количество примесей актиноидов и продуктов деления. Необходимо разработать допуски на массу мишени, ее геометрические размеры и содержание примесей в облучаемом химическом элементе. В каком состоянии удобнее иметь облучаемый материал — в твердом, жидком или газообразном состоянии или в виде эмульсии? Допуски на содержание актиноидов в мишенях могут коренным образом повлиять на радиохимическую переработку выгружаемого из реакторов топлива.

При подсветке ядерного реактора и трансмутации для мишеней необходимо разработать режим выгрузки, транспортировки и хранения этих высокорadioактивных изделий, хотя их экологическая опасность значительно ниже, чем у трансурановых элементов, продуктов деления, трития и углерода-14. Для большой энергетики необходимо выполнить технико-экономическое сравнение трансмутации и гарантированного хранения (захоронения) радиоактивных стронция и цезия в течение 300 лет наряду с другими способами локализации и уничтожения. Следует иметь в виду, что трансмутация гарантирует полное уничтожение радиоактивных отходов ядерной энергетики, а любое хранение (захоронение) в течение 300 лет такой гарантии дать не может. Работы по созданию мишеней из радиоактивных элементов, как и работы по подготовке радиоактивных отходов радиохимической промышленности к длительному хранению или захоронению, связаны с высокой радиоактивностью.

16. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеется огромный положительный опыт эксплуатации ядерных энергетических установок различного назначения, но были аварии на ЧАЭС и ТМА,

на атомных подводных лодках, и надо спокойно осмотреться. Опасно утверждать, что все в порядке, мы понимаем, что и почему у нас произошло. Надо тиражировать существующую ядерную энергетику, постепенно ее улучшая.

Обилие накопленного ядерного горючего урана-235 и плутония-239 в России делает сегодня ядерную энергетику стабильной. В то же время большое количество природного газа Россия продает за рубеж, и надо воспользоваться тем, что природный газ в России может стать главным источником энергии в течение ближайших 15—20 лет и создать за это время максимально безопасную ядерную энергетику и экологически чистую энергетику на каменном угле.

О неизбежности широкого использования ядерной энергии в России в двадцать первом веке говорит специфика нашей страны. Практически все полезные ископаемые и крупнейшие месторождения углеводородного топлива расположены в малообжитых районах Востока и Севера с суровым климатом. Основная масса людей и подавляющий объем промышленности располагаются в Центре, где мало источников энергии. Осуществляется в широком масштабе транспортировка нефти и газа по магистральным трубопроводам с востока на запад. Перевозка больших масс каменного угля — главного углеводородного топлива двадцать первого века — с востока весьма проблематична, а сооружение в местах добычи каменного угля тепловых электростанций и передача больших потоков электроэнергии в европейскую часть России встречает ряд трудностей. Несмотря на уникальные запасы углеводородного топлива в России, резонно ориентироваться на ядерные источники энергии на Западе и Дальнем Востоке. Калорийность ядерного топлива в миллионы раз выше калорийности лучшего органического топлива, что делает его использование не зависящим от транспортировки на любые сверхдальние расстояния.

С начала XX века мировое потребление энергии возросло приблизительно в 20 раз. За вторую половину XX века в мире использовано столько же сырья, сколько за всю предыдущую историю человечества. В 90-х годах XX века прошел ряд всемирных конференций, на которых рассматривались вопросы о продолжающемся росте численности населения Земли, его неравномерности по континентам и государствам (констатировался высокий прирост населения в бедных развивающихся странах) и о возможности обеспечения людей в бедных странах прежде всего пищей. Было обращено внимание на то, что человечество приближается к критической точке применительно к проблемам народонаселения и защите окружающей среды. Население Земли непрерывно растет. Можно ли без войн, эпидемий, голода, на основании законов, принятых человечеством без принуждения, организовать контролируемый и регулируемый рост населения при гарантированном прожиточном минимуме или в принципе это сделать невозможно? Очевидно, демографический вопрос более важен, более глобален, чем любые другие вопросы, стоящие перед человечеством в настоящее время. На долю промышленно

развитых стран приходится 70 % потребления мяса и молока, 75 % потребления энергии и 80 % железа и стали. США — государство, численность населения которого составляет около 5 % от мирового населения, а на душу населения в США потребляется энергии в 5 раз больше, чем в среднем на каждого жителя планеты. В 80-х годах в США было израсходовано на одного человека ≈ 11 тонн условного топлива, что эквивалентно $3,2 \cdot 10^{11}$ Дж/год или 10 кВт/чел. Эта энергия вырабатывалась за счет использования нефти, добытой из своих недр и привезенной из-за рубежа, природного газа, каменного угля, атомной энергии и гидроэнергии.

Если принять, что в развитых странах проживает 20 % населения Земли, т.е. $1,3 \cdot 10^9$ человек, и потребляется 8,0 тонн условного топлива (т.у.т.) на одного человека в год, то за счет энергосберегающих технологий и перебазирования энергоемких производств в развивающиеся страны потребление энергии не повысится до $10,4 \cdot 10^9$ т.у.т. В развивающихся странах, где проживает 80 % людей, т.е. $5,3 \cdot 10^9$ человек, и где высокая рождаемость, потребление энергии по 3,0 т.у.т. на одного человека в год составит $15,9 \cdot 10^9$ т.у.т. в год. Всего человечество при численности $6,6 \cdot 10^9$ человек будет потреблять $26,3 \cdot 10^9$ т.у.т. Нет никаких гарантий, что численность населения в начале XXI века не превысит $6,6 \cdot 10^9$ человек, в то же время в конце XX века мировое производство энергии составляет $15 \cdot 10^9$ т.у.т. Что же делать, заведомо обрекая часть людей на нищету?

Форсировать добычу углеводородного топлива нереально, поэтому основная ставка в энергетике развивающихся стран должна быть сделана на атомную энергетiku. Углеводородные источники энергии при самом благоприятном для них развитии науки, технологии и техники не смогут обеспечить рост численности человечества нужным количеством энергии даже при минимальном потреблении. Только максимально безопасная энергетика на базе деления тяжелых и синтеза легких ядер в принципе в состоянии удовлетворить любые потребности человечества в электроэнергии и качественной пресной воде. Только ядерная энергетика в состоянии смягчить кризисную ситуацию, вызываемую ростом численности людей на Земле. Дискуссия — нужна или не нужна ядерная энергетика — бессмысленна. Если посмотреть без иллюзий вперед на несколько десятилетий, то станет ясным, что человечество без ядерной энергетики обойтись не может. Путь только один — быстрее и качественнее сделать ядерную энергетiku максимально безопасной во всех звеньях, обратив особое внимание на радиационную опасность.

Перед современным обществом сейчас стоит вопрос значительно более важный, чем за всю историю его существования, — это неконтролируемый рост численности населения, который может привести к гибели рода человеческого.

Россия численностью в 200 млн человек в начале XXI века в состоянии обеспечить потребление энергии на уровне 11 т.у.т. на одного человека или

$3,2 \cdot 10^{11}$ Дж/год, для чего нужно иметь суммарно в год $2,2 \cdot 10^9$ т.у.т. или $6,4 \cdot 10^{19}$ Дж. В 1977 г. в Советском Союзе было добыто нефти $950 \cdot 10^6$ т.у.т., природного газа $870 \cdot 10^6$ т.у.т. и угля $470 \cdot 10^6$ т.у.т., что в итоге составляет $2,29 \cdot 10^9$ т.у.т. Вполне реально в XXI веке потреблять $1,8 \cdot 10^9$ т.у.т. или $5,3 \cdot 10^{19}$ Дж/год углеводородного топлива и получать за счет атомной энергии $1,1 \cdot 10^{19}$ Дж/год. Это означает, что надо будет иметь атомную энергетику мощностью в 350 ГВт (э). За 25 лет вполне возможно выполнить такую программу.

Населению для комфортного проживания нужна энергия бесперебойно и в достаточном количестве, а как эта энергия получена, его не очень волнует. Задача науки и техники — создавать такие установки, которые, находясь даже в аварийном режиме, не пугали бы людей, не оказывали вредоносного влияния на их здоровье и не угрожали их жизни.

В данной работе автор старался обратить внимание на следующие положения.

- Человечество в двадцать первом веке не сможет обойтись без максимально безопасной (во всех звеньях) и экономически целесообразной ядерной энергетики.
- Существующие водоохлаждаемые ядерные реакторы не могут сжечь весь уран-238, и вода из-за своих физико-химических свойств не может обеспечить безопасность ядерно-энергетических установок.
- Возможно создать предельно безопасную ядерную энергетику, используя разные основополагающие физические принципы.

Автор не исключает, что есть и другие (чем те, которые описаны в данной работе) научные идеи, обеспечивающие создание максимально безопасной ядерной энергетики.

- Было бы желательно, чтобы страны, занимающиеся созданием ядерно-энергетических установок, развивали исследования по одному-двум направлениям и в режиме полной открытости и контактов создали бы пилотные установки.
- Успехи в развитии ускорительной науки и техники вселяют надежду на возможность трансмутации радиоактивных отходов ядерной энергетики и высокорadioактивных трансуранов.
- Самые изящные конструкторские решения при неудовлетворительной физике не могут обеспечить создание максимально безопасной ЯЭУ.
- Главным критерием для ЯЭУ должна стать возможность самогашения (на основании физических принципов) возникших зародышей аварийного отклонения от номинала.

- Высокий научный уровень и накопленный опыт у стран, создающих ядерно-энергетические установки самого разного назначения, гарантирует возможность создания максимально безопасной ядерной энергетики во всех ее звеньях при благоприятном отношении правительств к этому сверхважному вопросу.

Изложенные в данной работе идеи многократно обсуждались с А.И.Лейпунским, А.П.Александровым, А.М.Балдиным, Н.Г.Басовым, В.А.Кириллиным, Г.И.Марчуком, М.В.Масленниковым, В.И.Матвеевым, В.В.Орловым, Л.П.Феоктистовым, А.Е.Шейндлиным, С.Б.Шиховым, Г.Н.Яковлевым, за что автор выражает им глубокую благодарность.