

УДК 621.039

НА ПУТИ К БЕЗОПАСНОЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Р.М. Яковлев¹, И.А. Обухова²

¹ Санкт-Петербургское отделение Пагуошского движения по нераспространению ядерного оружия
и ² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: brig-av@yandex.ru; IObukhova@inbox.ru

Статья поступила в редакцию: 03.03.2017; принята к печати 05.07.2017

Две катастрофы планетарного масштаба в Чернобыле и Фукусиме и множество других аварий и инцидентов на предприятиях атомной промышленности создают значительный риск для биосферы. Все установленные на атомных электростанциях (АЭС) реакторы и хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) представляют высокую опасность из-за огромного количества радионуклидов, накопленных в ОЯТ, значительная часть которых может быть выброшена во внешнюю среду в чрезвычайных ситуациях, обусловленных совершенно разными, а потому непредсказуемыми причинами. Из действующих реакторов наибольшую опасность представляют блоки типа Чернобыльского (реактор большой мощности канального типа – РБМК). Высокую радиационную опасность представляет смешанное уран-плутониевое топливо (МОКС-топливо), которое пока используется в небольшом числе реакторов, но предполагается для широкого использования. Производство такого топлива сопряжено с отравлением внешней среды плутонием. Особую опасность создает возможность использования МОКС-топлива в «грязной» атомной бомбе. Еще более высокую опасность для среды представляют реакторы на быстрых нейтронах с ядерным топливом на основе плутония, который при каждом реакторе необходим в количестве 20 тонн для замыкания топливного цикла. Плутоний при аварии в тысячи раз опасней для среды и жизни людей, чем цезий-137. Кроме того, из плутония любого изотопного состава может быть изготовлено ядерное взрывное устройство. Возможности получения необходимого количества плутония возрастают вследствие расширения географии ядерной энергетики. Экологический и террористический риск, обусловленный атомной энергетикой, можно минимизировать при переходе от уран-плутониевого ядерного топливного цикла к торий-урановому. Жидкое торий-урановое топливо можно корректировать по составу в активной зоне реактора, удаляя и аккумулируя летучие и газообразные продукты, а в критической ситуации можно слить. Начало такому переходу могут положить реакторы небольшой мощности. С большой атомной энергетикой следует подождать, остановив как можно скорее все РБМК-реакторы, высокий уровень опасности которых рассмотрен в этой статье.

Ключевые слова: Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), атомные электростанции (АЭС), тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), замыкание топливного цикла, отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), Институт безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ), предельно допустимая доза внешнего и внутреннего облучения, реактор большой мощности канального типа (РБМК), уран-плутониевый ядерный топливный цикл, торий-урановый ядерный топливный цикл, нераспространение ядерного оружия, уран-плутониевое смешанное оксидное топливо (МОКС-топливо), реактор на быстрых нейтронах (РБН), жидкосолевой реактор (ЖСР).

TOWARDS SAFE NUCLEAR ENERGY

R.M. Yakovelev¹, I.A. Obukhova²

¹ Saint-Petersburg Office of Pugwash Conferences on Science and World Affairs
and ² Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, Russia

E-mail: brig-av@yandex.ru; IObukhova@inbox.ru

Two planetary-scale catastrophes in Chernobyl and Fukushima and numerous other accidents related to nuclear power industry pose significant risks to the biosphere. All reactors and spent nuclear fuel (SNF) stores at nuclear power stations are highly hazardous because of enormous amounts of radionuclides accumulated in SNF and prone with being realized upon emergency situations possible because of very different and thus unpredictable reasons. Among currently operating reactors, the most dangerous are high-power channel-type units (HPCT) similar to those of Chernobyl. High hazards are associated with mixed uranium-plutonium oxide (MOX) fuels, which is used in a few reactors at present; however, its use is expected to advance. The production of such fuel is prone with environmental poisoning with plutonium. Especially dangerous is the possibility to use MOX fuel “dirty” nuclear weapons. Even more dangerous for the environment are reactors based on fast neutrons, which consume nuclear fuels based on plutonium, which is required at a 20-tons amount for fuel cycle circuiting. Upon an accident, plutonium compared with cesium-137 can be thousands times more dangerous for humans and the environment. Besides that, any isotopes of plutonium are suitable for making nuclear explosives. The availability of plutonium increases with the increasing spread of nuclear energy plants. The environmental and terroristic risk associated with nuclear energy may be decreased by transition from uranium-plutonium to thorium-uranium fuels. The composition of a liquid thorium-uranium fuel may be controlled in the active zone of a reactor by removing or accumulating of volatile and gaseous products,

and the fuel may be poured out of a reactor upon an emergency. Low-power reactors may be used to initiate the transition. Meanwhile, large-scale nuclear power production should be reduced by discontinuing the operation of all HPCT reactors possibly sooner because of the high hazards discussed in the present paper.

Keywords: International Atomic Energy Agency (IAEA), nuclear power stations, fuel element, fuel circuiting, spent nuclear fuel, Institute for Safe Development of Nuclear Energetics, maximum permissible dose of outer and inner irradiation, high-power channel-type reactor, uranium-plutonium fuel cycle, thorium-uranium fuel cycle, nuclear nonproliferation, mixed uranium-plutonium oxide fuel, fast neutron-based reactor, liquid-salt solution.

1. Исчерпаемость энергоресурсов и атомная энергетика до 1980 г.

Выживание человечества и его благополучие в будущем во многом определится обеспеченностью энергией, иными словами, энергетической безопасностью. Главная составляющая этой безопасности – обеспеченность сырьем. Если исходить из того, что уровень потребления энергии на одного человека в развитых и развивающихся странах постепенно выравнивается, и учесть, что численность населения к 2050 г. увеличится в 1,5 раза, то ресурсная база двух основных компонент существующей сейчас энергетике – нефти и газа – будет исчерпана к середине XXI в. В табл. 1 показаны запасы основных энергоносителей и время их исчерпания [1].

Запасов угля хватит на несколько сотен лет. Но широкомасштабное сжигание угля в крупных городах приводит к недопустимому загрязнению атмосферы, как это имело место, например, в Лондоне, а в настоящее время происходит в некоторых городах Китая. При добыче угля происходит также загрязнение очень больших территорий, и отходы после его сжигания непомерно велики.

Даже с учетом возрастающей стоимости нефти и газа, этого ценнейшего химического сырья, они в больших количествах сжигаются в топках теплоэлектростанций, оставаясь основным ресурсом для большой энергетике. При этом помимо быстрого сокращения их запасов происходит накопление газов, вызывающих парниковый эффект.

Поэтому, когда были построены первые атомные станции, из труб которых не вились клубы черного дыма, а топлива для них требовалось в тысячи раз меньше, чем угля и нефти, они были с большим энтузиазмом восприняты во всем мире. Желание строить новые станции резко возросло при уверениях ведущих атомщиков в полной безопасности новых источников энергии для людей и природы. Утверждалось, что никакого значительного выброса радиоактивных продуктов, которые нарабатывались в активной зоне реакторов, при любых обстоятельствах произойти не может [2, 4, 5].

Расплав топлива в любых обстоятельствах весьма маловероятен, поскольку в реакторах после 1970 г. предусмотрено пассивное охлаждение. Реактор автоматически отключается, в нем не происходит деления ядер, а остаточное тепловыделение активной зоны может быть снято различными аппаратными средств-

Табл. 1

Сроки исчерпания энергоресурсов (модифицировано из [1])

Энергоноситель	В мире			В России		
	Запасы разведанные извлекаемые (ГВт × год)	Интенсивность использования, ГВт	Срок исчерпания, (годы)	Запасы разведанные извлекаемые ГВт × год	Интенсивность использования ГВт	Срок исчерпания (годы)
Нефть	200000	4600	40–50	10000	400	20–30
Газ	150000	2200	60–70	46000	550	80–90
Уголь	1000000	3000	300–400	110000	170	600–700
Ядерная энергетика (тепловые реакторы)	90000	750	120	9000	45	200
Всего	1440000	11000	130	175000	1200	150
Ядерная энергетика (быстрые реакторы)	15000000	11000	1500	1500000	1200	1300

вами, которые будут функционировать при полном отключении электричества без всякого внешнего вмешательства [2, 5].

В конце 1960-х – начале 1970-х гг. прошлого века планировалось к началу XXI в. производить более 50% электроэнергии и 30% тепловой на АТЭС [2, 5]. Атомная энергетика бурно развивалась, особенно в странах передовых, но бедных запасами газа и нефти: Франции, Японии, Великобритании, Германии, Швеции, а также в США и СССР, что было сопряжено в этих странах с развитием ядерных технологий для ВПК. На всех АЭС предполагалось производить в самом начале третьего тысячелетия 3–4 тысячи ГВт электроэнергии. Это было зафиксировано на Женевской конференции в 1971 г. При этом 40% электроэнергии должно было производиться в реакторах на быстрых нейтронах. Необходимость в них определилась с самого начала, поскольку в реакторах на тепловых нейтронах (теплоносителем и замедлителем для них является вода) основой ядерного топлива является уран-235, которого в естественном уране всего 0,7%, и, как видно табл. 1, урановых ископаемых запасов должно хватить ненадолго. Только в реакторах на быстрых нейтронах (РБН), теплоносителем для которых является расплав натрия или свинца, возможно вовлечение в энергетику урана-238, но не прямо, а через образующийся в реакторе плутоний-239, причем в таких реакторах плутония сжигается меньше, чем образуется снова из неделящегося изотопа урана-238. Загрузка плутонием высокая (20%) и составляет 4–5 тонн для реактора электрической мощностью 1000 МВт [4, 5].

Принципиальная схема сжигания всего урана с использованием плутония возникла уже в 1950-х гг., когда выяснилось, что при делении ядер плутония-239 быстрыми нейтронами (энергия больше 100 кэВ) рождается избыток нейтронов, достаточный не только для поддержания цепной реакции в активной зоне реактора, но и для производства дополнительных ядер плутония из урана-238 в зоне воспроизводства. При этом нарабатанного из неделящегося урана-238 плутония оказывается больше, чем сгоревшего. В таком случае превращением урана в плутоний удастся задействовать почти весь уран и обеспечить человечество топливом на тысячелетия, как видно из последней строки табл. 1. И это весьма обнадеживало [2, 5].

2. Доказанная опасность «чистой» АЭ: две катастрофы и авария в США

Предполагаемого интенсивного развития атомной энергетики не происходит. Главной причиной этому явились две крупнейшие аварии: на АЭС в Чернобыле в 1986 г. и на АЭС Фукусима-1 в Японии в 2011 г. Общая установленная мощность всех АЭС в 2017 г.

меньше 400 ГВт (Эл.), а из энергетических реакторов на быстрых нейтронах, на которые возлагали особые надежды, работает только один – БН-800, в России, а РБН Мондзю в Японии и Суперфеникс во Франции остановлены из-за нескольких опасных ситуаций, которые возникали при их эксплуатации.

Деление атомных ядер нейтронами в активной зоне реактора является источником высококонцентрированной энергии. Это свойство делает ядерную энергетику весьма привлекательной, но и создает высокую потенциальную опасность при ее использовании. Количество делений в единицу времени, которое определяет мощность реактора, поддерживается постоянным с помощью регулирующих стержней, содержащих в их составе бор или другие элементы, способные поглощать избыточные нейтроны. Ошибочный или умышленный вывод большей, чем следует, части поглощающих нейтроны стержней приводит к разгону мощности реактора на мгновенных нейтронах, причем очень незначительная часть ядер, разделившихся на мгновенных нейтронах в активной зоне реактора, достаточна, чтобы его разнесло на мелкие части [18]. Мощность взрыва в чернобыльском реакторе по произведенному разрушению оценивается в 20–200 тонн тринитротолуола. Эта энергия высвобождается при мгновенном делении всего лишь 1–10 г урана-235 или плутония.

Кроме присущей реактору положительной реактивности, которая компенсируется вводимыми в реактор поглощающими нейтроны стержнями, вторая внутренне присущая любому реактору с твердым топливом опасность состоит в возможности расплавления ядерного топлива ($T_{пл.} = 2800\text{ }^{\circ}\text{C}$) при нарушении или умышленном повреждении системы теплосъема. В таком случае неизбежно высвобождение накопившихся радиоактивных газов и значительной части осколков деления. Даже в остановленном реакторе выделяется большая остаточная энергия за счет радиоактивного распада продуктов деления. Поскольку температура расплавленного топлива достигает $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$, то из него высвобождается огромное количество радиоактивных ядер, температура испарения для которых ниже температуры расплава. Часть этой радиоактивности неминуемо окажется за пределами реактора.

2.1. Авария с расплавом топлива на АЭС в США

Исключительно высокую опасность, которую заключают в себе атомные реакторы, в США вполне осознали в 1979 г. после аварии значительно меньшего масштаба на одном из реакторов [23], расположенном на Трехмильном острове в Харрисбурге (штат Пенсильвания). Из-за неисправности в системе охлаждения реактора ядерное топливо частично

расплавилось, и радиоактивные продукты из него вылетели за пределы АЭС. Общая радиоактивность вылетевших продуктов (в основном это были радиоактивные благородные газы и небольшое количество йода) составила $8,8 \times 10^{16}$ Бк. Население Пенсильвании после оповещения было в ужасе. Губернатор Пенсильвании посоветовал покинуть пятимильную зону беременным женщинам и детям дошкольного возраста. В город приезжал и успокаивал жителей президент Картер. Средняя эквивалентная доза радиации для людей, живущих в 10-мильной (16 км) зоне, составила 80 мкЗв и не превысила 1 мЗв для любого из жителей. Этой сравнительно небольшой аварии оказалось достаточно, чтобы затормозить интенсивное развитие атомной энергетики в США. Решением президента Картера было прекращено уже начатое строительство 28 реакторов, а владельцам недостроенных реакторов государство оплатило расходы. Понимание того, что могло произойти при выбросе значительной части наработанной активности за пределы АЭС, а она в активной зоне реактора составляет около миллиарда Кюри, оказалось достаточным, чтобы намеченное ранее интенсивное развитие атомной энергетики прекратилось. После 1979 г. и до 2012 г. ни одной новой лицензии на строительство АЭС в США выдано не было.

Но не все считают нужным учиться на чужих ошибках и бедах. В Европе, Японии, Южной Корее и России интенсивное строительство атомных станций продолжалось до чернобыльской катастрофы в 1986 г. Сам факт аварии в США с расплавлением ядерного топлива и выбросом части активности замалчивался, а значение этого факта, который практически перечеркивал все заверения о полной чистоте и безопасности нового источника энергии, всячески преуменьшалось. Критические замечания сводились к тому, что атомный реактор очень хороший источник чистой энергии, и только если хозяин жадный, а операторы недостаточно подготовлены и осмотрительны, возможен ускоренный запуск реактора по требованию хозяина АЭС. В СССР вся техническая информация об аварии в США шла под грифом для служебного пользования, и ее могли получить только руководители высшего звена в атомной энергетике [9].

2.2. Чернобыльская катастрофа

Об атомной катастрофе на 4-м блоке АЭС в Чернобыле и последствиях ее написано много книг и тысячи статей. В СССР в атомном ведомстве и руководстве страны пытались преуменьшить масштабы произошедшего. Но радиоактивность распространилась по всему северному полушарию, и замаять событие было невозможно. Раскрытие произошло в нашей

стране способствовали гласность и перестройка. Объективная и честная информация представлена в «Чернобыльских тетрадах» Григория Медведева, опубликованных большим тиражом в журнале «Новый Мир» в 1987 г. с предисловием Андрея Дмитриевича Сахарова, который высоко оценил эту работу. Григорий Устинович Медведев до этого работал на одном из блоков Чернобыльской АЭС, занимал ответственные посты в «АтомЭнерго», а после аварии был командирован в Чернобыль и находился на 4-м блоке в первые дни после катастрофы. Последнее издание этой публикации можно найти в книге «Ядерный загар» [9]. Основной причиной катастрофы стало несовершенство конструкции, автором которой был президент Академии наук СССР А.П. Александров.

На практике ядерную опасность РБМК-реакторов обозначила уже в 1975 г. авария на первом блоке Ленинградской АЭС, запущенного в 1973 г. В 1975 г. Ленинградская АЭС только случайно избежала катастрофы, имевшей несколько иную причину, но аналогичной с Чернобыльской по масштабам [9, 19]. В результате локального перегрева в активной зоне разгерметизировался технологический канал. Но в той ситуации вполне могли разгерметизироваться три-четыре канала одновременно, ведь при ремонте заменили 19 штук. Как теперь ясно, одновременный разрыв 3–4 каналов привел бы к Чернобылю. Это обусловлено тем, что углерод меньше поглощает нейтроны, и, когда плотность воды после ее превращения в пар уменьшается, возникает положительная реактивность, резко увеличивается поток нейтронов в результате образования локальной критической массы, и это приводит к ядерному взрыву. Мощность взрыва, который произошел в Чернобыле, по произведенному им разрушению реактора и выбросу значительной части его за пределы бетонного блока с подкидыванием и переворотом бетонной плиты весом 2000 тонн, оценивается разными авторами в эквивалент 20–200 тонн тринитротолуола, а ведь это всего от 1 до 10 грамм урана, поделившегося на мгновенных нейтронах. И совсем необязательно, чтобы сразу в трех или четырех каналах одновременно нарушился теплообмен, инициатором может стать один блок: перегревшись, он нарушит теплосъем в соседних, и взрыв тогда неминуем. А можно и по злему умыслу прервать теплосъем в трех или четырех соседних технологических каналах.

Петербург расположен рядом с ядерной бочкой, а Ломоносов и Кронштадт – совсем близко. Чем скорее эти реакторы прикроют, тем спокойнее и лучше будет в Санкт-Петербурге, да и во всей России, ибо второго Чернобыля стране не преодолеть.

Опасная высокая положительная реактивность, обусловленная повышенным парообразованием, была исследована и доказана в очень рискованном эксперименте, выполненном через несколько месяцев после

аварии в Чернобыле Н.А. Штейнбергом, о чем подробно написано в книге [6], не только честно отражающей все, что происходило во время аварии, но и вскрывающей истинные причины произошедшего 26 апреля. Эта книга написана непосредственными участниками ликвидации аварии, а один из авторов, Н.А. Штейнберг, был назначен после аварии главным инженером АЭС в Чернобыле. В этой книге сделан анализ причин катастрофы, и главная из них – это недостатки конструкции. Эта авария – результат научных и конструктивных просчетов.

Практически сразу после аварии персонал Чернобыльской АЭС был объявлен состоящим из непрофессионалов и злостных преступников. Такой подход был санкционирован высшими органами партийной власти и реализован в докладе, представленном от СССР в МАГАТЭ. На самом же деле основными причинами аварии являлись недостатки конструкции, а главный и неустраняемый недостаток конструкции такого типа реакторов – это положительный паровой и быстрый мощностной коэффициент реактивности. Второй весьма существенный недостаток, который был у всех реакторов до 1986 г., – это очень неудачная конструкция стержней, поглощающих нейтроны, нижняя часть которых была сделана из графита. Третий недостаток, совершенно очевидный, – это отсутствие дополнительной стальной оболочки, окружающей реактор, которая могла бы удерживать внутри значительную часть радиоактивных продуктов.

2.2.1. Эксперимент Н.А. Штейнберга

Перед пуском 1-го блока в Чернобыле после его дезактивации Н.А. Штейнберг провел на этом блоке эксперимент по опорожнению активной зоны для прямого измерения эффекта реактивности. То, что эффект велик, было известно уже после аварии в 1975 г. на ЛАЭС. С тех пор главный конструктор (акад. Доллежал с сотрудниками) и научный руководитель (акад. А.П. Александров) взяли на вооружение график, на котором реактивность вначале растет, а затем падает, давая возможность безопасно остановить реактор в случае потери теплоносителя. Только вера в эту кривую позволяла продолжать эксплуатировать РБМК-реакторы. Сверхопасный эксперимент Н.А. Штейнберга опроверг теорию академиков. Реактивность при уменьшении уровня воды выходила из критического состояния! Не было даже намека на то, что реактивность должна падать. Было получено прямое визуальное доказательство «выдающихся характеристик» реактора и его полного несоответствия требованиям по безопасности. «Протоколы испытаний были взяты у нас, и они исчезли. Мы, эксплуатационники, – пишет Штейнберг, – наконец поняли, на какой бомбе мы сидели все эти годы!» Далее он пишет: «На всех РБМК были выполнены работы по реконструкции, но мы

глубоко убеждены, что их эксплуатация сопряжена с повышенным риском для российской и мировой экономики» [6, с. 117]. Там же отмечено, что в 1990 г. повышенный риск эксплуатации действующих АЭС с РБМК-реакторами сохраняется. Отдел Совета Министров по ядерной энергетике подготовил записку, в которой предлагалось прекратить эксплуатацию РБМК первого поколения, а остальные оставить работать до истощения ресурса технологических каналов, определяемого документацией. Но опасные реакторы продолжают работать. В Сосновом Бору 2 реактора относятся к первому поколению, а срок эксплуатации блоков 3 и 4 закончился к 2010 г. Чем скорее блоки типа Чернобыльского будут выведены из эксплуатации, тем лучше.

2.2.2. Загрязнения радиоактивностью после аварии

Для понимания уровня опасности при серьезной аварии на любом из этих блоков кратко рассмотрим последствия Чернобыльской катастрофы. После аварии на 4-м блоке загрязненными оказались громадные площади. Радиоактивное облако выбросов распространилось по всему Северному полушарию. Загрязнению цезием-137 свыше $3,7 \times 10^4$ Бк/м² подверглось более 200000 км² территории Европы, из них 70% – это территория Беларуси, России и Украины. Около 35% выпадения цезия в Европе приходится на Беларусь. В целом по этой стране загрязненными оказались более 18 тыс. км² сельскохозяйственных угодий (22% общей площади сельхозугодий), из которых 2,64 тыс. км² исключены из хозяйственного оборота. Основная часть территории созданного в ближней от ЧАЭС зоне Полесского государственного радиационного заповедника (1,3 тыс. км²) из-за высокой плотности загрязнения долгоживущими изотопами практически навечно выведена из использования. Загрязнения стронцием-90 более локальны. Уровень загрязнения почвы выше $5,5 \times 10^4$ Бк/м² обнаружен на 10% территории Беларуси (21 тыс. км²). Загрязнение изотопами плутония с плотностью более $3,7 \times 10^4$ Бк/м² охватывает около 2% территории (4 тыс. км²). Кроме ближней зоны ЧАЭС высокое загрязнение оказалось на северо-западе Могилевской области. В Российской Федерации территория, загрязненная цезием-137 с плотностью более $3,7 \times 10^4$ Бк/м², составила 57 тыс. км² в 19 субъектах с населением 4,2 млн человек. Наиболее загрязненными оказались Брянская, Калужская, Тульская и Орловская области.

Остановимся более подробно на загрязнении плутонием, поскольку плутоний является наиболее вредным для среды элементом. Его в Чернобыле образовалось в реакторе сравнительно немного, а вылетело из топлива не более 100 кг (активность выброса составила $2,6 \times 10^{15}$ Бк), но загрязнение этим элементом считается опасным при концентрациях значительно меньших,

чем при загрязнении цезием-137 или стронцием-90. Плохо еще и то, что его простыми радиометрическими измерениями трудно обнаружить, поскольку изотопы этого элемента испускают альфа-частицы, пробег которых в веществе не превышает нескольких микрон, и поэтому они почти все поглощаются полностью в веществе, в котором содержится плутоний. Поэтому эффект внешнего облучения плутоний не создает, но очень опасен при попадании внутрь любого организма [3, 13]. В биосфере плутоний мигрирует по земной поверхности, включаясь в биогеохимические циклы. Плутоний концентрируется морскими организмами: его коэффициент накопления (то есть соотношение концентраций в организме и во внешней среде) для водорослей составляет 1000–9000, для планктона (смешанного) – около 2300, для моллюсков – до 380, для морских звезд – около 1000, для мышц, костей, печени и желудка рыб – 55–70, 200 и 1060, соответственно. Наземные растения усваивают плутоний главным образом через корневую систему и накапливают его до 0,01% своей массы [10, 13]. Плутоний называют ядерным ядом, его допустимое содержание в организме человека определяется нанограммами. Для профессионального облучения концентрация плутония в воздухе не должна превышать 0,53 Бк/м³. Максимально допустимая концентрация плутония для персонала – 0,23 микрограмма для легочной ткани. Плутоний накапливается и практически не удаляется в костях и в печени, вызывая костные опухоли, рак печени, лейкемию, нарушение кроветворения, остеосаркомы, рак легких, являясь таким образом одним из самых опасных канцерогенов [3, 10, 13].

Сейчас плутоний в реакторах нарабатывается и находится в переработке в сравнительно небольших количествах. В реакторе мощностью 1000 МВт при трехгодичной эксплуатации нарабатывается 1,3 тонны плутония. При использовании уран-плутониевого МОКС-топлива плутоний будет исходно загружаться этим топливом в реакторы, и он окажется в обращении в количествах, на порядок больших. При переходе на быстрые реакторы количество плутония в них и, соответственно, переработка станут еще выше, а поскольку при переработке возникают потери, то в природе плутония окажется очень много, что весьма опасно, особенно при аварии. Но и без аварии при глобальной переработке топлива, в котором много плутония, выход его во внешнюю среду неотвратим, о чем свидетельствуют официально объявленные Англией и подтвержденные претензии от Исландии, Ирландии и Норвегии о высоком уровне загрязнения плутонием значительной части сельди, отловленной в северных морях. Изотопный состав плутония совпадает с составом реакторного плутония, который возник при переработке ядерного топлива на комбинате в Селаяфильде (Англия).

В Беларуси, России и Украине допустимое загрязнение плутонием почвы сейчас трудно определимо, но оно будет выясняться позже по мере того, как из плутония-241 будет образовываться америций-241, который является источником жестких гамма-квантов.

2.2.3. Радиологические последствия Чернобыля и экономические потери

Наиболее подробное исследование и анализ последствий был выполнен для Беларуси и России в совместных работах под руководством чл.-корр. РАН А.В. Яблокова и чл.-корр. Белорусской академии наук В.Б. Нестерова. Предельно допустимый уровень радиационного загрязнения одним только цезием-137 был превышен на огромных территориях. Дальнейшая информация взята из их книги [19]. В табл. 2 приведены сведения о числе пострадавших.

Табл. 2

Сведения о числе пострадавших в результате аварии на ЧАЭС

Группа населения	Страна	Тысяч человек
Эвакуированные	Беларусь	135000
	Украина	162000
	Россия	52000
Ликвидаторы	Беларусь	130000
	Украина	360000
	Россия	250000
	Другие страны	90000
Жители территорий с загрязнением цезием-137 более 555 кБк/м ²		270000
Жители территорий с загрязнением цезием-137 более 37 кБк/м ²	Беларусь	2000000
	Украина	3500000
	Россия	2700000

По расчетам, коллективная эффективная эквивалентная доза на население Северного полушария от Чернобыльской аварии составила за первый год приблизительно 600000 чел.-Зв, и наибольшая часть этой дозы приходится на территории бывшего СССР.

Весьма велики затраты на минимизацию последствий Чернобыльской катастрофы. За 20 лет (до конца 2006 г.) они превышают 500 млрд долларов и будут долго оставаться на уровне многих миллиардов долларов в год. Украина тратит на это 5% национального бюджета, Беларусь – около 10, Россия – от 0,5 до 1% [17, 19].

2.2.4. Атомная энергетика после Чернобыля

После Чернобыля в Западной Европе возникло мощное антиядерное движение, и там с тех пор не было построено ни одной станции. Общественность многих стран настаивала на закрытии АЭС. Действительно, оправданы ли электростанции, топливо которых настолько опасно, что при выбросе части активности земля на площади 10,4 тысячи квадратных километров становится непригодной для жизни людей на многие сотни лет, а еще 18 тысяч квадратных километров опасны для проживания из-за высокого уровня радиоактивности? Оправдан ли риск, если с родной земли было выселено почти 400 тысяч жителей? Если для ликвидации аварии потребовалось 600 тысяч человек и из них 200 тысяч получили высокую дозу радиации (10 Бэр, а многие и выше), а это в основном молодые люди призывного возраста? Если оценки прямых и косвенных потерь от аварии, сделанные специалистами на Западе, составляют от 400 млрд \$ до 1 трлн \$? (По оценке специалистов из ИБРАЭ, в 1986 г. – 2 млрд \$, а в 1992 г. эта цифра увеличена до 16 млрд \$ [17].)

После Чернобыля атомную энергетику продолжали интенсивно развивать только в Японии, где народу и правительству объясняли, что такие катастрофы, как Чернобыльская, могут происходить только в России. При правильном японском использовании атомная энергетика все равно самая чистая и безопасная. Альтернативы ей нет. Аварии же и чрезвычайные ситуации, которые все-таки происходили в Японии,

тщательно скрывались от общественности. Уже начали использовать в части реакторов оксидное уран-плутониевое топливо, строили для его производства большой завод. Предполагали запустить реактор на быстрых нейтронах для замыкания ядерного цикла.

2.3. Атомная катастрофа в Японии в сравнении с Чернобылем

Аварией на одной из крупнейших электростанций в Японии – АЭС Фукусима 1 – был подписан приговор атомной энергетике для Японии и для стран, где эта энергетика до того составляла значительную долю (исключением стала Россия). Действительно, расплав топлива в активной зоне трех реакторов и взрыв в хранилище четвертого с утечками миллионов кюри в океан и с радиоактивным загрязнением 1/3 самого большого острова Японии – это было уже слишком.

Информация из проверенных источников об этой крупнейшей после Чернобыля атомной аварии размещена в Википедии. Приведены там и фотографии разрушенных четырех блоков, хроника событий и оценка потерь. Это общедоступная сейчас информация. Поэтому здесь будут приведены только радиоактивные выбросы на самой АЭС после аварии в сопоставлении с Чернобыльской катастрофой (рис. 1).

Как видно из рис. 1, выброс радиоактивности в Чернобыле был значительно выше, чем в Японии, и это обусловлено главным образом тем, что реакторные блоки в Фукусиме имели дополнительную стальную

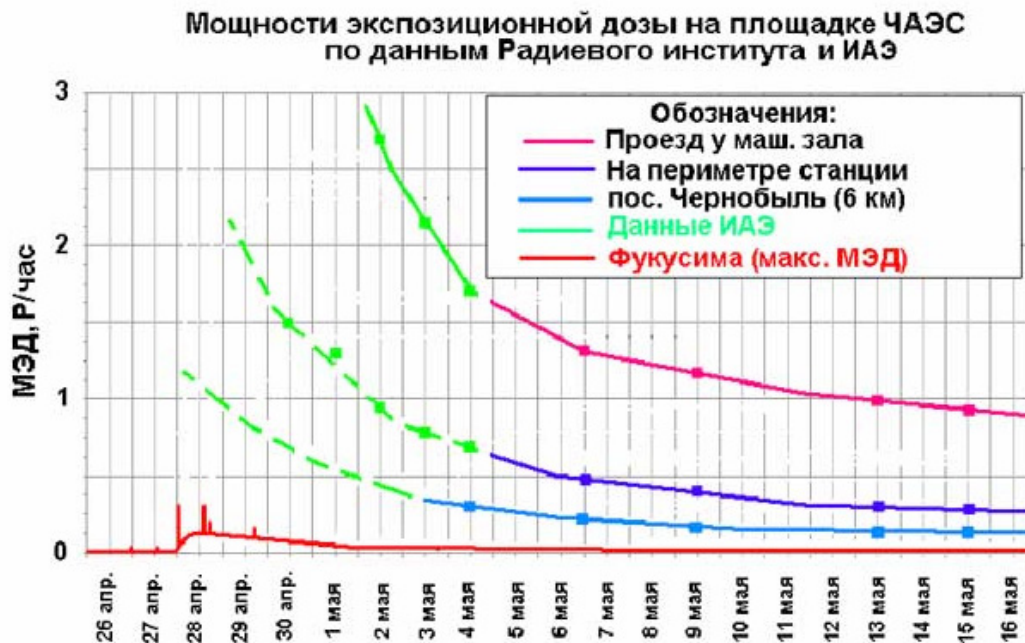


Рис. 1. Оценки экспозиционных доз от крупных аварий [12]

герметичную защиту толщиной 30 см, которая отсутствует во всех блоках РБМК. Из одного разрушенного реактора РБМК в Чернобыле выделилось в 10 раз больше радиоактивности, чем из четырех при аварии на АЭС Фукусима-1 в 2011 г. Общие площади загрязненных территорий от четырех реакторов в Японии тоже на порядок меньше. В Японии после этой аварии по требованию общественности и народа при поддержке императора была прекращена работа всех АЭС, хотя они обеспечивали более 30% электроэнергии в стране, а ископаемые газ и нефть в стране отсутствуют. Но в России все 11 блоков РБМК продолжают работать, причем четыре из них – рядом с Санкт-Петербургом.

3. «Прорыв» в атомной энергетике в России: МОКС-топливо и реакторы на быстрых нейтронах

В России после 20-летнего Чернобыльского юбилея с приходом к руководству «Росатомом» эффективных менеджеров во главе со специалистом по дефолту развернулась мощная пиар-кампания по возрождению атомной энергетики в огромных масштабах. Значимость Чернобыля как масштабной катастрофы сводилась к досадной ошибке операторов. Такое не повторится, потому что теперь мы научены и стали очень осторожными. Мы теперь, именно благодаря Чернобылю, самые безопасные и осторожные. Руководство «Росатома» с ИБРАЭ неоднократно собирало и со-

бирает конференции, участники которых убеждают друг друга в полной безопасности от крупной аварии (расплава ядерного топлива и вынос радиоактивных продуктов за пределы АЭС) на ближайшие тысячи лет работы атомных реакторов, хотя основные разработки по ним были выполнены задолго до Чернобыля. Авария в Японии не охладила пыл наших атомных топ-менеджеров. Только Россия собирается строить реакторы на быстрых нейтронах с натриевым и свинцовым теплоносителем [1]. Под Красноярском вводится в действие комбинат с производительностью 2000 тонн/год переработки ОЯТ от легководных реакторов с целью производства уран-плутониевого МОКС-топлива и затем более обогащенного плутонием топлива для БР.

3.1. Опасность МОКС-топлива и топлива для БР с высоким содержанием плутония

Реакторы на быстрых нейтронах являются более опасными, чем ЛВР, из-за большого количества плутония. Помимо опасности при выбросе из реактора в случае аварии или из-за потерь при переработке, плутоний может быть использован при создании атомной бомбы. Оружейный плутоний совсем для этого необязателен. Вполне годится плутоний из отработанного топлива реактора, а еще лучше его взять из распространяемого сейчас МОКС-топлива, отделив простой химией от урана. Приличную бомбу из плутония с обеспечением деления 15–20% ядер сделать в кустар-

Табл. 3

Вред от изотопов, присутствующих в разных видах ядерного топлива. Модифицировано из [9]

	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴¹ Am	²⁴⁴ Cm	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	Всего
2-кг стержень отработанного топлива UO₂										
Масса (г)	0,6	11,8	5,5	2,6	1,7	0,95	0,1	1,4	3,1	–
Активность (Бк)	3,9E + 11	2,7E + 10	4,5E + 10	9,9E + 12	2,5E + 08	1,2E + 11	4,3E + 11	6,9E + 12	1,0E + 13	–
CD50 (человеко-Зв)	503	38	65	267	0,3	135	287	13	5	1313
Число избыточных смертей от рака	25	2	3	13	0	7	14	1	0	65
2 кг свежего МОКС-топлива										
Масса (г)	4,2	89,5	37,9	24,3	11,9	–	–	–	–	–
Активность (Бк)	2,7E + 12	1,8E + 11	3,2E + 11	9,3E + 13	1,7E + 09	–	–	–	–	–
CD50 (человеко-Зв)	3480	253	450	2510	2	–	–	–	–	6695
Число избыточных смертей от рака	174	13	23	125	0	–	–	–	–	335

ных условиях сложно, даже с привлечением классного специалиста. Но устройство, в котором разделится до разлета 0,1% ядер плутония, сделать несравненно проще. Реакторный плутоний для такой низкой доли деления подойдет вполне. Если взять его с запасом, для обеспечения цепной реакции, килограмм 20, то при делении всего 0,1% этого количества выделится энергия, эквивалентная взрыву 400 тонн тринитротолуола, и великий вред будет принесен не самим взрывом, а высокой радиологической опасностью от распыления 20 кг реакторного плутония.

Террористам можно даже не создавать ядерное взрывное устройство, а использовать распыление радиоактивных веществ при подрыве нескольких килограмм взрывчатки (это так называемое «грязное» атомное оружие). В табл. 3 приведены оценки [8] коллективных вдыхаемых доз (CD50inh) и числа избыточных смертей от рака при вдыхании радиоизотопов, присутствующих в 2 кг отработанного уранового и свежего МОКС-топлива. Во всех расчетах использовалась метеорологическая модель, представляющая средние сухие погодные условия.

Вариант со свежим МОКС-топливом приносит наибольший вред из-за значительно большего содержания плутония, чем отработанное топливо. МОКС-топливо также излучает намного меньше нейтронов и гамма-лучей, чем отработанное топливо, и поэтому с ним намного легче обращаться. МОКС-топливо является настоящим подарком для ядерных террористов, и если знать это, стоит ли распространять его и строить комбинаты по его производству?

В быстрых реакторах, которые предполагают использовать для замыкания ядерного топливного цикла плутония, требуется 20 тонн при мощности реактора 1000 МВт с учетом его выдержки и переработки топлива. Тогда там, где будут такие реакторы, можно, отказавшись от контроля МАГАТЭ, изготавливать тысячи атомных бомб. Поэтому предполагаемое развитие атомной энергетики на плутоний-урановом твердом топливе является очень опасным и для среды, и в смысле возможности его использования во взрывном устройстве, даже очень несовершенном.

Как следует из приведенной в начале статьи табл. 1, существующая ядерная энергетика, в которой ядерным топливом является уран-235, а его в естественном уране всего 0,7%, быстро исчерпает ископаемые запасы урана. В программах масштабного развития ядерной энергетики сейчас предлагается вовлечь в атомную энергетику весь уран-238 через образующийся в реакторе на быстрых нейтронах плутоний. Но, как это следует из приведенных выше доводов, плутоний при его широком использовании весьма опасен для окружающей среды и в смысле распространения ядерного оружия. Поэтому надежды даже на циклическое развитие человечества при оптимальной численности

1,5–1,7 млрд [15] могут быть неоправданными при интенсивном развитии плутониевой ядерной энергетики. Даже без большой ядерной войны загрязнение биосферы Земли плутонием при расширенном его производстве в БР приведет к экологической катастрофе и вымиранию высокоорганизованной жизни, включая человека. При очень высоком уровне опасности плутония для биосферы и ввиду возможности его использования террористами атомная энергетика не может сейчас явиться основой энергетической безопасности человечества. Представленный ниже вариант развития атомной энергетики является более чистым и безопасным.

4. Атомная энергетика без плутония и Чернобыля

Только если в ядерном топливе будет отсутствовать плутоний и из ядерного топлива в процессе работы можно выводить все летучие и газообразные продукты и надежно аккумулировать их, возможно исключить катастрофическую ситуацию с выбросом миллионов кюри радиоактивных продуктов из реактора. Выход только один – топливо должно быть без плутония и в жидком состоянии, с возможностью удаления из него летучих и газообразных продуктов [16, 21, 22]. Были рассмотрены различные варианты таких реакторов. Топливо в них могло находиться или в расплавленном свинце в виде мелкодисперсной суспензии [17, 18], или в виде расплава фторидов. Из всех вариантов оптимальным является реактор с расплавом фторидов различных металлов, включая уран и торий [20, 21]. Это так называемый жидкосолевого реактор (ЖСР). Создание такого реактора решает проблему выброса большого количества радиоактивных ядер из активной зоны.

На рис. 2 приведена схема компактного варианта жидкосолевого реактора небольшой мощности¹. Другой вариант был описан в работе [20].

Без-ТВЭЛный жидкосолевого реактор имеет низкий запас реактивности, обусловленный непрерывной очисткой топлива от осколочных элементов-поглотителей нейтронов, и высокий отрицательный температурный коэффициент реактивности, что обеспечивает ядерную безопасность [20–22].

Так как из жидкого топлива такого реактора во время работы выводятся летучие и газообразные продукты, то в любых ситуациях (даже при попадании бомбы в реактор) исключен выброс больших количеств радиоактивных продуктов за пределы реакторного пространства. Это обстоятельство особенно важно в

¹ Кузякин Ю.И., Яковлев Р.М. Патент № 64424. Моноблочная ядерная реакторная установка с жидкометаллическим топливом-теплоносителем, 27.06.2007; Они же. Патент № 57040 Ядерная реакторная установка с топливом-теплоносителем в виде расплавов солей фторидов, 27.09.2006.

эпоху развитого терроризма.

Поскольку с жидкосолевыми реакторами не происходит глобальное загрязнение окружающей среды, даже в случае таких катастрофических ситуаций, как землетрясение, падение самолета или подготовленная диверсия, это вселяет надежду в возможность создания атомной энергетики, безопасной от катастроф. Ведь именно возможность катастрофы, обусловленная непредвиденными обстоятельствами, для учета

которых бессмысленны вероятностные оценки, сдерживает после Чернобыля и Фукусимы развитие атомной энергетики.

Переход к жидкосолевому уран-ториевому реактору позволяет кардинально сократить объемы радиоактивных отходов, поскольку для их работы не требуется ежегодная выгрузка-загрузка ТВЭЛов и последующая переработка отработавшего топлива [24, 25]. Расплав топлива из активной зоны реактора сливает-

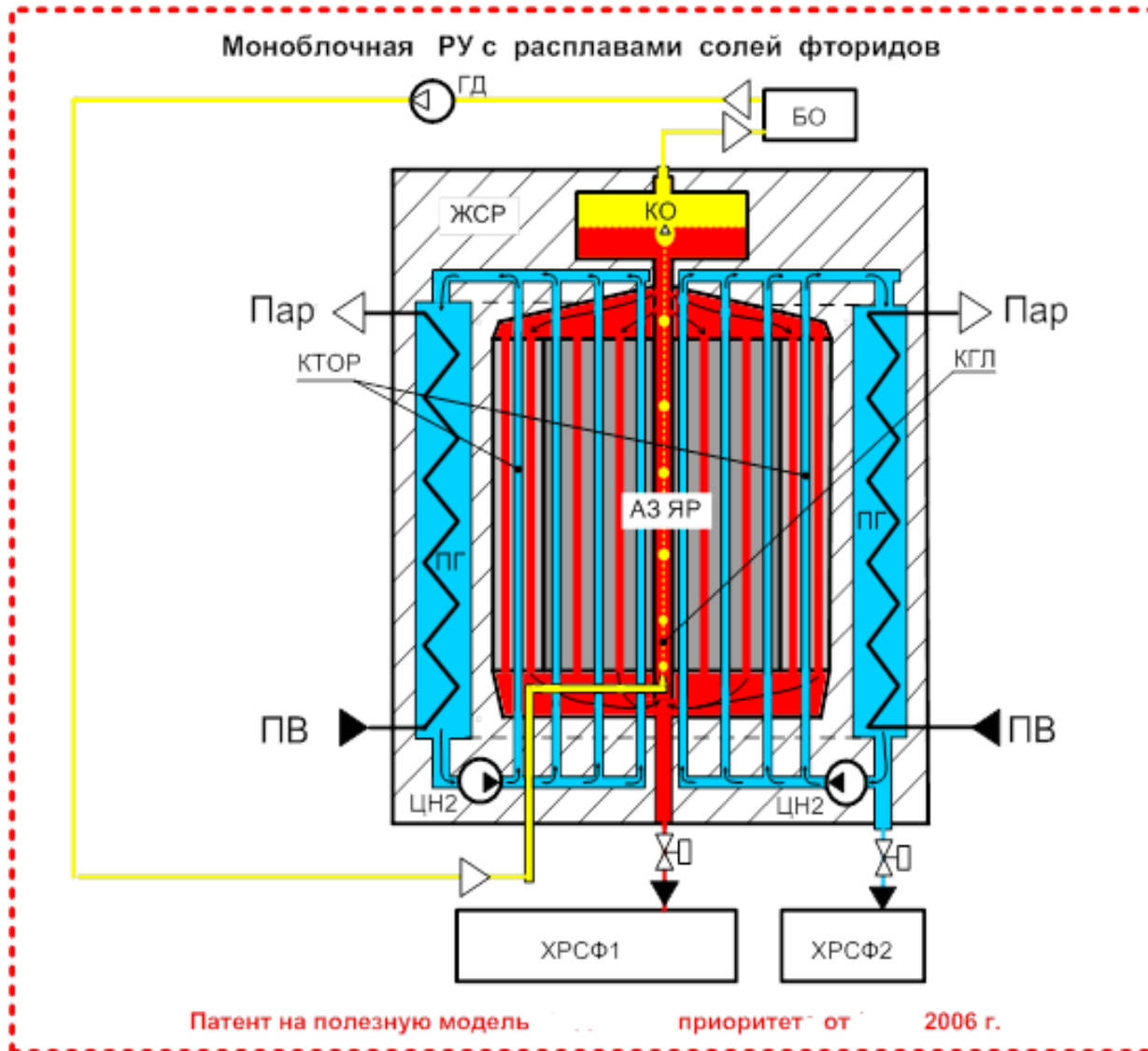


Рис. 2. Схема жидкосолевого ядерного реактора.

Обозначения: АЗ ЯР – активная зона ядерного реактора; БО – блок очистки от продуктов ядерных реакций; ЖСР – реактор с расплавами солей фторидов в контурах; ГД – газодувка; КО – компенсатор объема расплава солей 1 контура; КГЛ – канал газлифта расплава солей 1 контура; КТОР – каналы теплообмена между расплавами контуров; ПГ – парогенератор; ПВ – питательная вода; ХРСФ1 – хранилище расплава солей; ХРСФ2 – хранилище расплава солей фторидов промоконтура фторидов 1 контура; ЦН1 – циркуляционный насос расплава 1 контура; ЦН2 – циркуляционный насос расплава промоконтура

ся, рассредоточивается в подготовленных нержавеющей емкостях и хранится в форме фторидного стекла, нерастворимого в воде и пригодного для захоронения (против 1000 тонн ОЯТ ВВЭР, подлежащего переработке при указанном выше количестве отходов). Кроме того, в таком реакторе нарабатывается примерно в 10^5 раз меньше изотопов трансураниевых элементов, чем в аналогичном по мощности уран-плутониевом реакторе.

Следует отметить, что рабочие интервалы для ЖСР предполагаются более длительными (30 лет при коэффициенте воспроизводства, близком к 1), чем для реакторов на твердом топливе (3–4 года). Для восполнения сгорающего урана-233 в солевой расплав ЖСР можно периодически добавлять порции тетрафторида тория-232. При этом отработавший солевой расплав при определенных условиях может служить формой хранения РАО. Эта особенность жидкосольевых реакторов делает их практически независимыми от процедур оперативной доставки топлива. Загрузка исходным делящимся материалом происходит только при запуске реактора. При окончательной остановке реактора оставшийся в нем уран-233 может быть выделен из жидкосольевой композиции путем фторирования солевого расплава с образованием летучего UF_6 и использован в новом реакторе такого же типа.

Сможет ли ядерная энергетика в XXI веке стать полноценной заменой исчезающим углеводородам? Это определится в первую очередь ее гарантированной безопасностью относительно возможности крупных масштабных аварий, а также исключением возможности распространения основной составляющей ядерного оружия – плутония. Весьма важным является обеспеченность топливом на долгие годы и сокращение количества ядерных отходов, в первую очередь плутония и других минорных актинидов (нептуния, америция, кюрия).

Из сказанного выше следует, что по совокупности ключевых параметров уран-ториевый топливный цикл в варианте без-ТВЭЛных реакторов должен удовлетворить потребности человечества в «чистой» энергии на современном этапе его развития (минимум на тысячу лет), поскольку только в этом варианте для атомной энергетики представляется возможность:

- 1) сделать ее безопасной, то есть исключить саму возможность глобальных аварий с огромным экологическим и экономическим ущербом (катастроф типа Чернобыльской или Фукусимской);
- 2) обеспечить нераспространение основной составляющей ядерного оружия – плутония, поскольку в ядерном топливе ЖСР не нарабатывается плутоний;
- 3) весьма экономно использовать ядерное топливо: делящиеся материалы нужны только при запуске реактора;

4) уменьшить во много раз объемы хранимых ядерных отходов и количество особо опасных плутония и других минор-актинидов (нептуния, кюрия, америция);

5) сделать атомную энергетику экономически более выгодной, в первую очередь из-за отсутствия ежегодной загрузки-выгрузки дорогих ТВЭЛов, а также благодаря уменьшению затрат на хранение и переработку облученного ядерного топлива и на вывод ядерных реакторов из эксплуатации (об этом более подробно в [22–24]).

Вовлечение тория в варианте жидкосольевого реактора в ядерную энергетику позволит обеспечить человечество на столетия экологически чистым источником энергии. Но, чтобы это произошло не в следующем столетии, необходимо уже сейчас решить определенный комплекс конкретных физических, химических, технических и конструкторских задач. Часть из них была названа в работах [16, 24, 25]. По нашим оценкам для их решения требуется сравнительно немного времени и скромное финансирование (около 100 млн US\$; это ничтожно мало по сравнению со средствами, выделенными на программу с реакторами на быстрых нейтронах, – около 100 млрд US\$). Выполнить эту программу за короткое время и на незначительные средства возможно только потому, что существует значительный задел. А именно, уже рассмотрено и опубликовано несколько перспективных конструкций ЖСР [20, 25], исследованы различные конструкционные материалы и совместимость их с жидкосольевыми композициями в Радиовом институте им. В.Г. Хлопина – в лаборатории моделирования ядерно-физических процессов под руководством Р.М. Яковлева и в отделе радиохимии под руководством проф. Д.Н. Суглобова.

Сейчас уже достаточно ясно, как надежно герметизировать топливо и аккумулировать продукты деления, как с помощью дистанционного контроля и средств управления обеспечить полную безопасность работы конкретного варианта запатентованного (см. сноску ¹) реактора с жидким топливом (рис. 2). Никаких принципиальных сложностей для создания демонстрационного жидкосольевого реактора на тепловых нейтронах не существует.

Задача практического воплощения этого цикла в жизнь может стать научной и инженерной целью отрасли на ближайшую перспективу, при строительстве демонстрационного уран-ториевого реактора через 8–9 лет, а не через 45 лет, как записано сейчас в стратегическом плане работ Минатома РФ.

Страна, которая первой освоит и запустит в широкое производство экологически безопасные ядерные реакторные установки уран-ториевого топливного цикла на базе реакторов с расплавами солей фторидов, выйдет на передовые в мире рубежи высоко конкурентоспособных ядерно-энергетических технологий со всеми вытекающими из этого преимуществами.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Адамов ЕО, Балашов ЛА, Ганев ИХ, Зродников ИВ, Кузнецов АК, Лопаткин АВ, Мастепанов АМ, Орлов АВ, Рачков АВ, Смирнов АС, Солонин МИ, Ужанова ВВ, Черноплеков НА, Шаталов ГГ. Белая книга ядерной энергетики. М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ; 2001.
2. Бабаев НС, Демин ВФ, Ильин ЛА. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда. М.: Энергоатомиздат; 1984.
3. Булаков ЛА. Проблемы токсикологии плутония. М.; 1969.
4. Кесслер Г. Ядерная энергетика. М.: Энергоатомиздат; 1986.
5. Климов АН. Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Энергоатомиздат; 1985.
6. Копчинский ГА, Штейнберг НА. Чернобыль. Как это было. СПб.: Наука; 2011.
7. Кузякин ЮИ, Яковлев РМ. Транспортная жидкосолевая реакторная установка. В кн.: Сборник докладов научно-технической конференции «Корабельная ядерная энергетика – взгляд в XXI век» (Ч. 1). Нижний Новгород: ОКБМ; 2001.
8. Магилл И, Хэмилтон Д, Лютценкирхен К, Туфан М, Тамборини Г, Вагнер В, Берту В, фон Цвайдорф А. Последствия события радиологического рассеивания с ядерными и радиоактивными источниками. Наука и всеобщая безопасность. 2007;15(2):12-21.
9. Медведев ГУ. Чернобыльские тетради. В кн.: Ядерный загар. М.: Книжная Палата; 1990.
10. Миронова НИ, ред. Плутониевая экономика: выход или тупик. Плутоний в окружающей среде. Челябинск; Челябинский дом печати, 1998.
11. Петров ЭЛ, Суглобов ДН, Яковлев РМ. Реактор-2020. Атомная Стратегия XXI. 2006;(8):24.
12. Римский-Корсаков АА. Две аварии. Атомная стратегия XXI. 2011(53):20-5.
13. Рылов МИ, Тихонов НА. В мире дозообразующих нуклидов. СПб.: Межотраслевой экспертно-сертификационный центр ядерной и радиационной безопасности; 2011.
14. Рылов МИ, Тихонов МН. Ядерные энергетические установки: постижение реальности. Экология и атомная энергетика. 2008;1(22):76-81.
15. Сергеев ЮН, Кулеш ВП. Проблемы циклического и стационарного развития цивилизации в глобальных моделях. Биосфера. 2017;9:13-47.
16. Суглобов ДН, Яковлев РМ, Мясоедов БФ. Торий-урановый топливный цикл для тепло- и электроэнергетики. Радиохимия, 2007;49(5):385-92.
17. Тихонов МН, Муратов ОЭ. Катастрофы как источники потери устойчивости национальных государств. В кн.: Проблемы риска в техногенной и социальных сферах. СПб.: Изд-во СПбГПУ; 2007. с. 119-30.
18. Феоктистов ЛП. Оружие, которое себя исчерпало. М.: Воскресенье; 2003.
19. Яблоков АВ, Нестеренко ВБ, Нестеренко АВ. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы. СПб.: Наука; 2011.
20. Яковлев РМ. О реакторах нового поколения. Атомная Стратегия XXI, 2005;(4):20-1.
21. Яковлев РМ, Данилевич ЯБ, Игнатъев МБ, Суглобов ДН. Атомная энергетика без плутония и Чернобыля. Мир и Согласие. 2008;(2):58-64.
22. Яковлев РМ, Петров ЭЛ, Тихонов МН, Муратов ОЭ. Решение проблем ядерной энергетики в стратегии уран-ториевого топливного цикла. Атомная Стратегия XXI, 2007;(5):15-3.

Общий список литературы/Reference List

1. Adamov EO, Balashov LA, Ganey IKh, Zrodnikov IV, Kuznetsov AK, Lopatkin AV, Mastepanov AM, Orlov AV, Rachkov AV, Smirnov AS, Solonin MI, Uzhanova VV, Chernoplekov NA, Shatalov GG. Belaya Kniga Yadernoy Energetiki. Moscow; 2001. (In Russ.)
2. Babayev NS, Demin VF, Ilyin LA. Yadernaya Energetika, Chelovek i Okruzhayushchaya Sreda. Moscow: Energoatomizdat, 1984. (In Russ.)
3. Bulakov LA. Problemy Toksikologii Plutoniya. Moscow; 1969. (In Russ.)
4. Kessler G. Yadernaya Energetika. Moscow: Energoatomizdat; 1986. (In Russ.)
5. Klimov AN. Yadernaya Fizika i Yadernye Reaktory. Moscow: Energoatomizdat; 1985. (In Russ.)
6. Kopchinskiy GA, Shteynberg NA. Chernobyl. Kak Eto Bylo. Saint Petersburg: Nauka; 2011. (In Russ.)
7. Kuziakin YuI, Yakovlev RM. [Transportable liquid-salt reactor plant]. In: Korabelnaya Yadernaya Energetika – Vzglyad v XXI Vek. Chast 1. Nizhniy Novgorod: OKBM; 2001. (In Russ.)
8. Magill J, Hamilton D, Lützenkirchen K, Tufan M, Tamborini G, Wagner W, Berthou V, von Zweidorf A. Consequences of a radiological dispersal event with nuclear and radioactive sources. Science & Global Security 2007;15(2):107-32.
9. Medvedev GU. [Chernobyl Notebooks]. In: Yaderny Zagar. Moscow: Knizhnaya Palata; 1990. (In Russ.)
10. Mironova NI, editor. Plutoniyeвая Ekonomika: Vykhod Ili Tupik. Plutoniy v Okruzhayushchey Srede.

11. Petrov EL, Suglobov DN, Yakovlev RM. [Reactor-2020], Atomnaya Strategiya XXI, 2006;(24). (In Russ). Chelyabinsk; Chelyabinskiy Dom Pechati, 1998. (In Russ.)
12. Rimskiy-Korsakov AA. [Two accidents]. Atomnaya Strategiya XXI. 2011(53):20-5. (In Russ.)
13. Rylov MI, Tikhonov NA. V Mire Dozobrazuyuschikh Nuklidov. Saint Petersburg; Mezhotraslevoyy Ekspertno-Sertifikatsionniy Tsentr Yadernoy i Radiatsionnoy Bezopasnosti: 2011. (In Russ.)
14. Rylov MI, Tikhonov MN. [Nuclear power plants: comprehension of reality]. Ekologiya i Atomnaya Energetika. 2008;1(22):76-81. (In Russ.)
15. Sergeev YuN, Kulesh VP. [Cyclical and stationary modes of the development of civilization in global models]. Biosfera. 2017;9:13-47.
16. Suglobov DN, Yakovlev RM, Miasoyedov BF. [Thorium-uranium fuel cycle for heat and electric power industry]. Radiokhimiya, 2007; 49(5):385-92. (In Russ.)
17. Tikhonov MN, Muratov OE. [Disasters as sources of national states stability loss]. In: Problemy Riska v Tekhnogennoy i Socialnykh Sferakh. Saint Petersburg; SPbGPU; 2007. p. 119-30. (In Russ.)
18. Feoktistov LP. Oruzhie, Kotoroe Sebya Ischerpalo. Moscow: Voskresenye; 2003.
19. Yablokov AV, Nesterenko VB, Nesterenko AV. Chernobyl: Posledstviya Katastrofy Dlia Cheloveka i Prirody. Saint Petersburg; Nauka, 2011. (In Russ.)
20. Yakovlev RM. [On new generation reactors]. Atomnaya Strategiya XXI. 2005;(4):20-1. (In Russ.)
21. Yakovlev RM, Danilevich YaB, Ignatyev MB, Suglobov DN. [Nuclear power without plutonium and Chernobyl]. Mir i Soglasie. 2008;(2):58-64. (In Russ.)
22. Yakovlev RM, Petrov EL, Tikhonov MN, Muratov OE. [The solution of nuclear power problems is in the strategy of the uranium-thorium fuel cycle]. Atomnaya Strategiya XXI, 2007;(5):5-13. (In Russ.)
23. Nuclear Regulatory Commission, Special Inquiry Group. Three Mile Island – A Report to the Commissioners and to the Public, Volume 1. US Nuclear Regulatory Commission; 1980.
24. Suglobov DN, Barbanel YuA, Rodionov YuI, Yakovlev RM. Radiochemical problems of thorium-uranium fuel cycle operating as a molten salt reactor. In: Abstr 10th International Seminar on Advanced Nuclear Fuel Cycle for the XXI Century, 24–27 September 2007, p. 91. Nizhny Novgorod, Russia.
25. Yakovlev RM, Kusiakin YuI, Suglobov DN, Rodionov YuI. MSR of average and low power with the lengthened campaign. In: Abstr 10th International Seminar on Advanced Nuclear Fuel Cycle for the XXI Century, 24–27 September, 2007, p. 94. Nizhny Novgorod, Russia.

