

## Ядерные энергетические установки: постижение реальности

© 2009. М.Н. Тихонов<sup>1</sup>, с.н.с., М.И. Рылов<sup>2</sup>, генеральный директор,  
<sup>1</sup>ФГУП НИИ промышленной и морской медицины,  
<sup>2</sup>ООО «РЭСцентр»,  
 e-mail: oleg.muratov@twell.ru

На основе анализа недостатков существующих и разрабатываемых типов реакторов рассмотрены актуальные проблемы создания самодостаточной безопасной ядерной энергетики.

On the basis of the analysis of deficiencies in the types of existing reactors and reactors that are being developed the up-to-date problems of creating self-sufficient safe nuclear power engineering are considered.

Ключевые слова: ядерная энергетика, ядерные энергетические установки

Растущий спрос на энергию и всё более широкая осведомленность об экологических выгодах чистой ядерной энергии создают основу для ренессанса ядерной энергетики (ЯЭ), которая может способствовать решению проблем, связанных с энергетической безопасностью, экономическим развитием, улучшением качества окружающей среды и жизни населения. Однако, прежде чем такой ренессанс может стать реальностью, государственные деятели должны заняться решением таких проблем, как относительно высокие капитальные затраты на строительство новых атомных электростанций (АЭС), вопросы обращения с радиоактивными отходами (РАО) и отработанным (облучённым) ядерным топливом (ОЯТ) и риск распространения оружейного плутония за пределы ядерно-топливного цикла (ЯТЦ).

Сегодня объективная необходимость ускоренного развития ЯЭ в стране обусловлена крайне тяжёлым состоянием российской энергетики. Ещё недавно ЯЭ находилась на том уровне, про который С.В. Кириенко хорошо сказал: «Мы молча наблюдали, как умирает атомная отрасль». В период 20-летнего застоя атомной отрасли одни делали вид, что заказывают работу, другие – что её делают. Стагнация в развитии российского атомного комплекса создала дополнительные проблемы, связанные с потерей квалифицированных кадров и утратой культуры производства. Атомная отрасль выживала только за счёт иностранных заказов (Иран, Китай, Индия) и постепенно превращалась в маргинальную обочину экономики страны.

Современная ситуация характеризуется исключительно повышенной активностью (эволюционно-структурными изменениями) в ядерной сфере и исследованием новых техно-

логий, прокладывающих путь к долгосрочному будущему ЯЭ. После долгого перерыва страна начала сооружение новых АЭС. Работы возвращены на пяти площадках (энергоблок № 2 Волгодонской АЭС, энергоблоки № 4 Калининской и Белоярской АЭС, НВАЭС-2, ЛАЭС-2). В отношении первых трёх объектов речь идёт о достройке ранее заложенных блоков различной степени готовности. На подходе – другие, значительно менее освоенные.

Принятая ФЦП «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007 – 2010 годы и на перспективу до 2015 года» [1] традиционно базируется на существующих типах реакторов и апробированном более чем полувековой практикой ЯТЦ, потому что опыт – это самое главное (табл. 1).

В ближайшей стратегии развития ЯЭ до 2020 г. приоритет отдан реализации освоенных технологий, поскольку полувековой опыт – надёжная гарантия успеха. Направление тепловых реакторов с водой под давлением (ВВЭР) является доминирующим в ближнесрочной перспективе. АЭС с реакторами большой мощности канальными (РБМК) успешно эксплуатируются, генерируя почти половину атомных кВт·ч России. За быстрыми реакторами – будущее, которое должно вобрать весь опыт эксплуатации быстрых реакторов, сделать из тропинки столбовую дорогу к храму – замкнутому топливному циклу. Тепловые реакторы с водой под давлением – это сегодняшняя база. Они обеспечивают в основном генерацию электричества, но могут работать в комбинированном цикле вместе с производством тепла. Реакторы на быстрых нейтронах (БН) могут быть использованы в виде дожигателей, которые будут уничтожать актиниды. Все ядерные энергоблоки

Таблица 1

Характеристики действующих российских АЭС

АЭС	№ блока	Тип реактора	Мощность, МВт, (эл.)	Год ввода в эксплуатацию	Срок окончания эксплуатации	Поколение реактора
Балаковская	1	ВВЭР-1000	1000	1985	2015	2
	2		1000	1987	2017	2
	3		1000	1988	2018	2
	4		1000	1993	2023	2
Белоярская	3	БН-600	600	1980	2010*	2
Билибинская	1	ЭГП-6	12	1974	2009**	1
	2		12	1974	2009**	1
	3		12	1975	2010**	1
	4		12	1976	2011**	1
Волгодонская	1	ВВЭР-1000	1000	2002	2032	2
Калининская	1	ВВЭР-1000	1000	1984	2014	2
	2		1000	1986	2016	2
	3		1000	2005	2035	2
Кольская	1	ВВЭР-440	440	1973	2008**	1
	2		440	1974	2009**	1
	3		440	1979	2009*	2
	4		440	1981	2011	2
Курская	1	РБМК-1000	1000	1976	2011**	1
	2		1000	1979	2009*	1
	3		1000	1983	2013	2
	4		1000	1985	2015	2
Ленинградская	1	РБМК-1000	1000	1973	2008**	1
	2		1000	1975	2010**	1
	3		1000	1979	2009*	2
	4		1000	1981	2011	2
Нововоронежская	3	ВВЭР-440	417	1971	2016	1
	4	ВВЭР-440	417	1972	2017	1
	5	ВВЭР-1000	1000	1980	2010*	2
Смоленская	1	РБМК-1000	1000	1982	2012	2
	2		1000	1985	2015	2
	3		1000	1990	2020	2

Примечание: \* Планируется продление сроков эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК-1000, ВВЭР-440 1-го поколения, БН-600 на 15 лет и с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 2-го поколения на 20 лет;

\*\* Обосновано продление срока эксплуатации на 15 лет и получена лицензия сроком на 5 лет.

эксплуатируются в устойчивом режиме с уровнем безопасности (базирующемся на принципе глубокоэшелонированной защиты), соответствующим лучшим показателям зарубежных АЭС. Вопрос безопасности и соблюдения высокого уровня технологий – на первом месте, и только на втором – выработка электроэнергии. Основной критерий при выборе концепции безопасности: обеспечить с разумным запасом выполнение требований по безопасности АЭС при безусловном соблюдении рыночной привлекательности проекта (экономическая эффективность, рациональное топливоиспользование и обращение с РАО и ОЯТ).

Преимущества эволюционного подхода: не требуется долгосрочной и дорогостоящей НИОКР;

возможность поэтапной реализации новых решений без существенных переработок проекта; обеспечение максимальной референтности технических решений для повышения конкурентоспособности АЭС на внешнем рынке.

В основу ближайшей стратегии развития ЯЭ, исходя из полувекового опыта эксплуатации существующего парка работающих АЭС (табл. 1), традиционно заложен эволюционно-консервативный подход, унаследованный от предыдущих поколений реакторов. Новая разработка – вариантный проект АЭС-2006 большей мощности – это реализация освоенных технологий. Среди целевых показателей – увеличение КПД, совершенствование топливных циклов, увеличение единичной

мощности и эффективности капиталовложений, сокращение сроков строительства. Ничего нового, радикального здесь нет. В этом отношении потенциал всех стран-разработчиков реакторов приблизительно одинаков и трудно найти какую-то разницу и в подходах, и в вооружённости проекта [4]. Все это – и бридеры, и замкнутый ЯТЦ – уже давно освоено, и вопрос состоит только в масштабах промышленного использования этих технологий (рис. 1). Это разумно, если учитывать дефицит времени, отведённого для сохранения отечественной ЯЭ. Создание новых энергетических технологий, нового поколения АЭС, нового топливного цикла – это долгий инвестиционный проект с большим числом неопределённостей и рисков.

Если же рассматривать энергетические проблемы человечества в перспективе, то следует открыто признать, что ни современные ядерные реакторы, ни топливо на основе урана не являются панацеей. Ограничения связаны с имманентными (внутренне присущими) им недостатками [2 – 12]:

1. Низкая эффективность (неэкономичность) топливоиспользования и деградация нейтронного потенциала (отсутствие воспроизводства ядерного горючего). Действующие сегодня реакторы используют около 1% добываемого урана.

2. Накопление радиоактивных отходов и облучённого ядерного топлива пропорционально выработке электроэнергии. К началу 2007 г. на АЭС и в хранилищах радиохимических заводов было накоплено 18,5 тыс. т ОЯТ. В России

прирост составляет 850 т ежегодно. В мире накоплено уже более 250 тыс. т ОЯТ, и ежегодно эта цифра возрастает на 11-12 тыс. т. Только незначительная часть ОЯТ перерабатывается на радиохимических заводах. На АЭС России происходит накопление ОЯТ в густонаселённых районах Европейской части. В том количестве ОЯТ, которое накоплено в России, содержание плутония составляет около 175 т [6].

3. При современных масштабах ЯЭ в мире на АЭС ежегодно нарабатывается до 85 т высокофонового плутония, который является особым веществом в проблеме негативного воздействия на окружающую среду. Помимо высокой  $\alpha$ -активности, плутоний чрезвычайно токсичен химически. Остаточная активность плутония, трансплутониевых элементов, нептуния и продуктов деления, на несколько порядков превосходящая активность природного урана, представляет радиоэкологическую опасность в течение тысячелетий. Поэтому их изоляция от окружающей среды (помимо сложности технических решений) требует колоссальных финансовых затрат, а любое существенное нарушение в обращении может привести к крупной экологической катастрофе. В настоящее время ни одна из стран мира не перешла к использованию технологий, позволяющих полностью решить проблему обращения с ОЯТ. Во всех ядерных странах ведутся НИОКР по разработке эффективных способов снижения негативного влияния ОЯТ.

4. Сегодняшняя ситуация с РАО в России достаточно напряжённая. На её территории

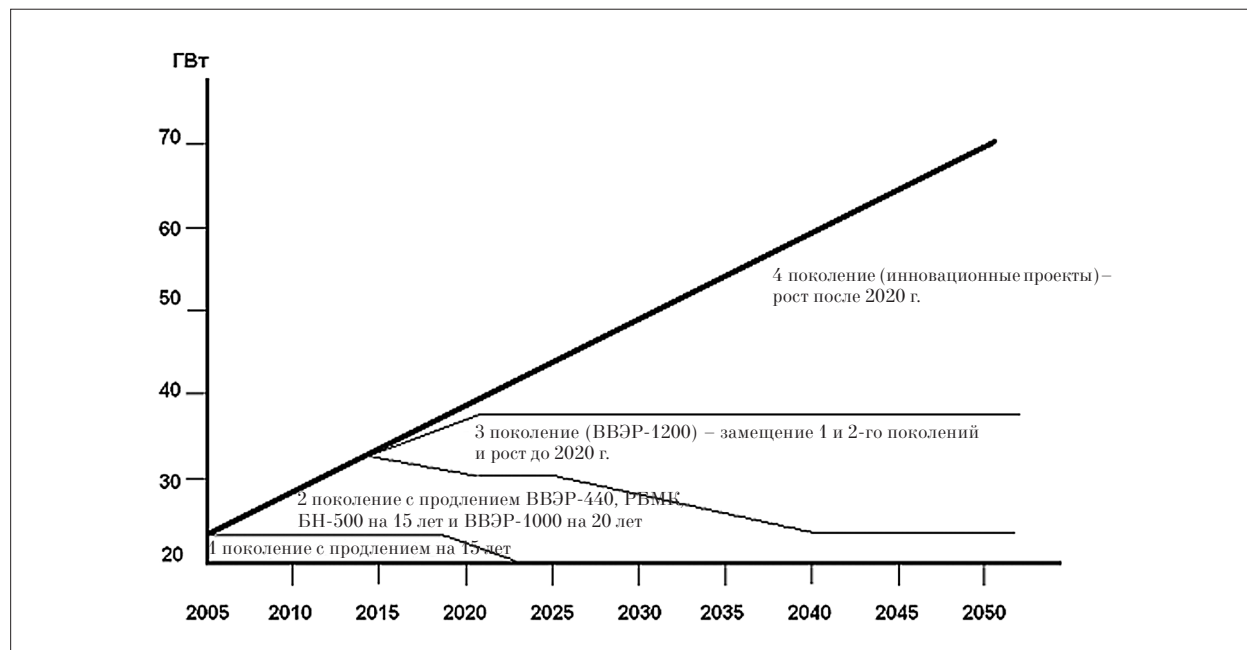


Рис. 1. Прогноз структуры реакторных технологий атомной энергетики России

Таблица 2

Степень опасности миграции долгоживущих осколочных радионуклидов при захоронении ОЯТ и долгоживущих РАО [18]

Радионуклид	<sup>238</sup> U <sub>прир</sub>	<sup>241</sup> Am	<sup>239</sup> Pu	<sup>237</sup> Np	<sup>126</sup> Sn	<sup>135</sup> Cs	<sup>79</sup> Se	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Содержание в ОЯТ, кг/т ТМ*	950	0,9	6,8	0,45	0,022	0,37	0,017	0,8	0,16
Риск выхода, год <sup>-1</sup>	10 <sup>-28</sup>	9,8 · 10 <sup>-27</sup>	6,9 · 10 <sup>-10</sup>	1,6 · 10 <sup>-10</sup>	3,6 · 10 <sup>-6</sup>	1,6 · 10 <sup>-5</sup>	3,8 · 10 <sup>-5</sup>	5,2 · 10 <sup>-5</sup>	8,0 · 10 <sup>-4</sup>
Период полураспада, лет	4,51 · 10 <sup>9</sup>	458	2,41 · 10 <sup>4</sup>	2,14 · 10 <sup>6</sup>	2,3 · 10 <sup>5</sup>	2,1 · 10 <sup>6</sup>	6,5 · 10 <sup>4</sup>	2,2 · 10 <sup>5</sup>	1,72 · 10 <sup>7</sup>

Примечание: \* – кг на тонну тяжелых металлов (ТМ).

Опасность для человека может сохраняться свыше 100 тыс. лет от <sup>99</sup>Tc и <sup>129</sup>I среди продуктов деления и от <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu и <sup>243</sup>Am среди трансураниевых элементов.

накопилась почти половина всех РАО мира, их активность превысила 5,96 · 10<sup>19</sup> Бк. Около 99% РАО сосредоточено на предприятиях Росатома, в том числе все высокоактивные и подавляющая часть среднеактивных отходов. Сооружение на объектах ЯЭ многочисленных временных хранилищ в железобетонных конструкциях или в транспортабельных контейнерах принципиально проблему не решает и требует дополнительных затрат на безопасное обращение с РАО, что приводит к неуклонному росту доли тарифа. Уплотнённое хранение облучённых теплоделяющих сборок (ОТВС) лишь временно снимает вопрос размещения их и, как следствие, ставит проблему продолжения эксплуатации АЭС (см. табл. 1). Особенно остро эта проблема стоит на АЭС с реакторами РБМК.

5. Относительно короткая топливная кампания энергетических реакторов, обуславливающая большой объём потенциально опасных перевозок ОТВС и значительные затраты на захоронение высокоактивных РАО. Серьёзную тревогу вызывает полное отсутствие вывоза ОЯТ со станций с реакторами: реактор большой мощности канальный (РБМК), энергетический графитовый «Полярный» (ЭГП) и реактор «Атом Мирный Большой» (АМБ) (переработка ОЯТ этих реакторов экономически нецелесообразна). В настоящее время все имеющиеся хранилища РАО практически заполнены. Свободный объём позволяет обеспечить эксплуатацию всех российских АЭС по твёрдым радиоактивным отходам (ТРО) – в течение 5, по жидким радиоактивным отходам (ЖРО) – 8 лет [3, 6]. Рост количества отходов ядерного топлива, хранящихся на площадках АЭС, снижает ядерную и радиационную безопасность. Ввод в эксплуатацию любого даже абсолютно безопасного и дешевого реактора без решения проблем ОЯТ и эффективного использования топлива только увеличивает количество проблем ЯЭ.

6. В России существенной экономической характеристикой РАО является их «отрицательная стоимость». Затраты на обезвреживание РАО не включаются в стоимость конечного продукта, в процессе которого они образуются, и рассматриваются (наряду с другими природоохранными затратами) как непроеизводительные. Поэтому они финансируются по остаточному принципу. Отсутствует закон о государственной политике по обращению с РАО и ОЯТ. В предстоящее десятилетие при закрытии устаревших производств и снятии с эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов объёмы РАО значительно возрастут. Стоимость переработки и захоронения 1 м<sup>3</sup> ЖРО составляет от 1 до 10 тыс. долл. Это означает необходимость ежегодных затрат на обращение с образующимися РАО в нашей стране, эквивалентных стоимости нескольких АЭС [6]. Наступает момент, когда всего тарифа не хватает для обслуживания отходов.

7. Вопрос заключается не только в безопасности АЭС, но и в долгосрочной безопасности хранения отходов. При реализации глубинного захоронения долгоживущих РАО необходима оценка долговременной безопасности, включающая долговременный (сотни и тысячи лет) прогноз поведения искусственных и естественных природных барьеров на пути возможного распространения долгоживущих РАО и ОЯТ в окружающую среду (табл. 2), а также влияние некоторых вероятных внешних воздействий природного происхождения (глобальные изменения климата, геологические процессы, падение гигантского метеорита, оледенение и др.) непосредственно на участок хранилища высокоактивных РАО. Вопрос безусловно актуальный для нынешних и будущих поколений землян.

8. Принципиальная невозможность гарантировать безопасность захоронения отходов,

содержащих неделящиеся изотопы плутония, нептуний, америций и кюрий. Попытки сооружения хранилищ в стабильных геологических формациях, например в США, окончились неудачей, отодвинув срок открытия хранилища «Юкка Маунтин» до 2017 г. Требуемая долговечность – десятки и даже сотни тысяч лет – не поддаётся проверке в лабораторных условиях. Захоронение «чужих» отходов на своей территории вряд ли будет воспринято положительно общественностью. Невозможность решать проблему с отходами может привести к вынужденной остановке некоторых атомных энергоблоков и вынудить инвесторов отказаться от строительства новых АЭС.

9. Потенциальная угроза неконтролируемого использования делящихся материалов. Рынок ЯЭ не сжимается, а расширяется: 80 стран мира желают иметь ЯЭ. Государство, получающее доступ к ЯЭ, находится на половине пути к созданию ядерного оружия. Один энергетический реактор мощностью 1000 МВт производит в год плутония, достаточного для изготовления 40-50 ядерных боезарядов. Даже в исследовательских реакторах мощностью в несколько МВт можно быстро наработать количество плутония, необходимое для создания маленькой бомбы (табл. 3). На практике для реальных боевых зарядов критическая масса составляет около 23 кг для  $^{235}\text{U}$  и около 5,6 кг для  $^{239}\text{Pu}$ .

Если в мире будут действовать несколько тысяч ядерных блоков (в настоящее время – 439), то невозможно пресечь пути утечки ядерных материалов. КНДР более чем убедительно продемонстрировала неэффективность Договора о нераспространении ядерного оружия – ДНЯО. Нераспространение ядерной технологии обратно пропорционально количеству стран, ей обладающих. Безусловным приоритетом безопасности последних технологических исследований Международного консорциума «Поколение-IV» является разработка систем, которые препятствуют распространению ядерного оружия.

10. Необходимость развития бридерной программы обусловлена ограниченностью запасов  $^{235}\text{U}$ . По экспертным оценкам, имеющиеся экономически приемлемые запасы урана могут обеспечить топливом ЯЭ менее чем на 100 лет. При широкомасштабном строительстве АЭС на тепловых нейтронах запасы  $^{235}\text{U}$  будут быстро истощены [7]. Подтверждением этому является прогрессирующий рост цен на обогащённый уран в настоящее время, когда доля ЯЭ в мире является ещё достаточно малой. Поэтому в ЯЭ предлагают использовать  $^{238}\text{U}$  (которого в 100 раз больше по сравнению с  $^{235}\text{U}$ ) путём его перевода в делящийся изотоп  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{232}\text{Th}$  при его переводе в  $^{233}\text{U}$ , то есть бридер работает на искусственных изотопах  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{233}\text{U}$ . Предполагается, что доступность ресурсов кардинально большего масштаба позволит стабилизировать цены на природный уран, стоимость которого увеличилась с 2001 по 2006 г. в 5 раз.

11. АЭС, использующая бридерную программу, имеет в своём составе радиохимическое производство, на котором в пересчёте на 1 млн. кВт мощности циркулирует минимум 20 т  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{233}\text{U}$ . При широком распространении АЭС уже с 20-х годов нашего века в мире будет находиться в обороте до миллиона тонн  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$ . Какая уж тут ядерная безопасность? Это крайне опасный и дорогой вид энергетики, требующий отдельного рассмотрения [8]. Даже ярые сторонники бридерной программы признают тот факт, что она может быть только внутривосточной программой. Это серьёзная проблема, от неё зависит конкурентоспособность и экспансия российских энергоблоков на мировом рынке [5].

12. Высокая стоимость ЯЭ, по крайней мере, для большинства развивающихся стран. По данным ОЭСР 2000 г., удельные капитальные затраты оценивались в 2,1-3,1 млрд. долл. на 1 ГВт установленной мощности АЭС с легководными реакторами. Стоимость нового ядерного энергоблока финской АЭС «Олкилуото» составляет 3 млрд. евро (3,9 млрд.

Таблица 3

Наработка плутония в реакторах разной мощности за год работы

Реактор	Мощность, Мв	Кг	Город, страна
Тяжёловодный графитовый	20–30 (t)*	5,5–8	Йонгбон, Северная Корея
Тяжёловодный, CIRUS	40 (t)	9	Индия
Тяжёловодный Kushab	50 (t)	12	Пакистан
Тяжёловодный, DHRUVA	100 (t)	25	Индия
Тяжёловодный	100 (t)	40	Димона, Израиль
Легководный	1000 (e)**	230	Бушер, Иран (проект)

Примечание: \* t – тепловая мощность, \*\* e – электрическая мощность МВт.

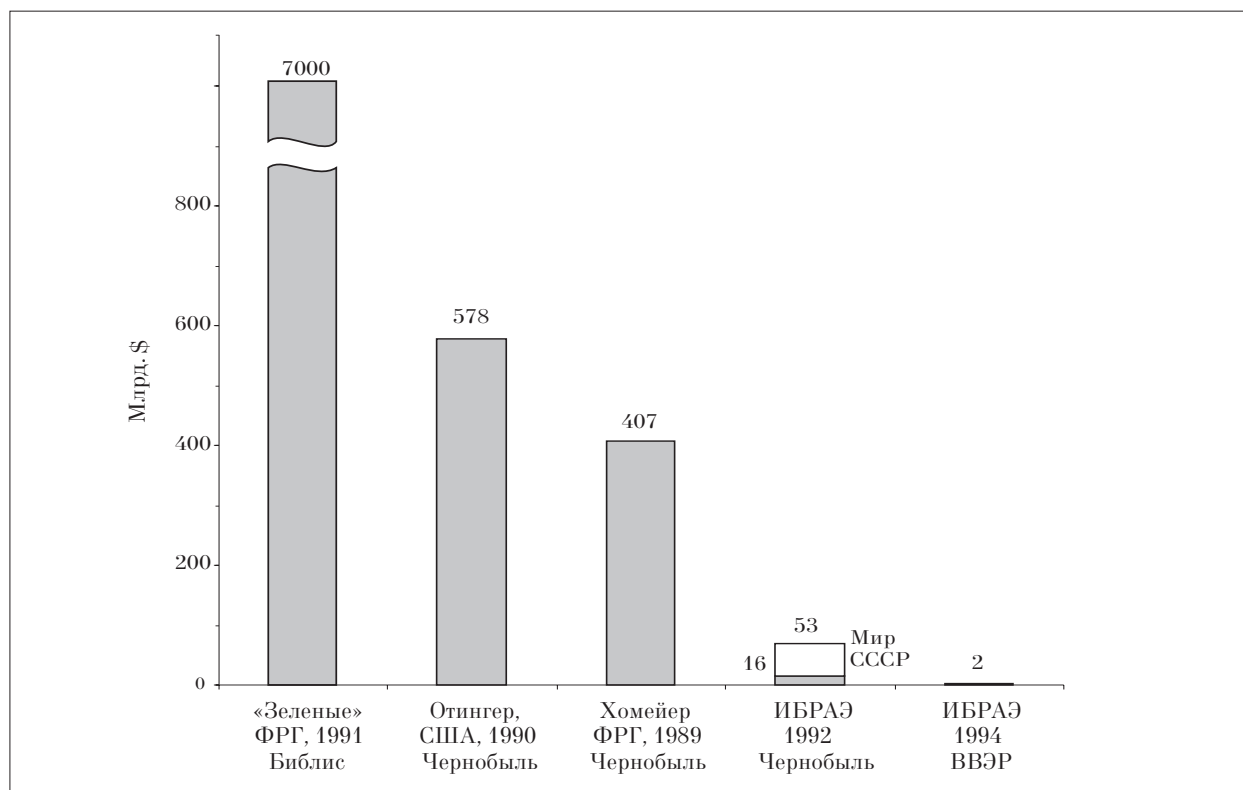


Рис. 2. Оценка ущерба аварий на АЭС

Примечание: ИБРАЭ – Институт безопасного развития атомной энергетики; Отингер, Хомейер – авторы изданий по Чернобыльской катастрофе; Мир, СССР – оценка ущерба от тяжелой аварии на ЧАЭС в мире и в СССР.

долл.). Это в 3,5-7 раз выше объёма инвестиций в строительство ТЭС с парогазовой установкой, которая вводится в строй в 3-4 раза быстрее, чем АЭС. Насколько применимы эти показатели к российской действительности, учитывая значительное удорожание в процессе строительства атомных энергоблоков [9]?

13. Безопасность реакторов обеспечивается, главным образом, увеличением числа систем безопасности и количеством барьеров, ограничивающих выход активности. Сейчас перечень документов, устанавливающих требования безопасности АЭС, превышает 100 единиц, издаётся ежегодная программа по модернизации блоков АЭС эпохи холодной войны. В результате АЭС всё более и более усложняются, соответственно, возрастает стоимость их сооружения и эксплуатации, а гарантировать 100%-ную надёжность невозможно. Постепенно стоимость капитального ремонта блоков с целью продления сроков их эксплуатации приближается к стоимости строительства нового блока. Главная задача здесь – определить, с какого момента надо сказать «стоп» и не повышать затраты на дальнейшую автоматизацию и безопасность. Надёжность обратно пропорциональна количеству деталей. Известно из теории, что абсолютной гарантии не бывает. Всегда есть

определённый риск. Но этот риск должен быть минимален.

14. Огромны средства на ликвидацию последствий аварии на АЭС. Так, затраты на минимизацию последствий Чернобыльской катастрофы всеми поражёнными странами за 20 лет превысили 500 млрд. долл. и будут ещё долго оставаться на уровне многих млрд. долл. в год (рис. 2) [10]. Украина тратит ~ 5% национального бюджета, Беларусь – около 10%, Россия – от 0,5 до 1%.

15. Страна стоит перед решением системной проблемы вывода из эксплуатации почти двух десятков реакторных установок. Это сложный дорогостоящий и длительный процесс включает в себя технологическую, социальную, экологическую, экономическую и нравственную составляющие. Массовый вывод АЭС, отработавших свой ресурс, в ближайшие годы вызовет чрезмерные нагрузки на бюджет страны (рис. 3).

Так, демонтаж пяти реакторов ВВЭР-440 (построенных СССР) на АЭС в Грейсвальде, строительство хранилищ для ТРО, дезактивация площадки и объектов для создания на этом месте технопарка велась 10 лет и обошлись Германии в 3,5 млрд. евро. Стоимость консервации одного блока, выводимого из эксплуатации, в России

составит примерно 500 млн. долл. Охрана и поддержание необходимых технологических циклов в законсервированной АЭС будет стоить ~60 млн. долл. в год, не говоря уже о мероприятиях по реабилитации загрязнённых территорий. Таким образом, стоимость работ по выводу из эксплуатации ядерных энергоблоков АЭС до состояния «зелёной лужайки» соизмеримо со стоимостью создания нового, эквивалентного выведенному энергоблока. В связи с этим Росатом делает всё возможное для продления времени их работы, поскольку обнародование реальной программы вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации вызовет шок среди населения градообразующих предприятий [11, 12]. Учитывая, что за один день работы атомный энергоблок мощностью 1 ГВт вырабатывает электроэнергию на один миллион долларов, продление срока эксплуатации «старых» АЭС, связанное с существенным обновлением (заменой) системы безопасности реактора, является экономически выгодным делом. В социально-психологическом плане важно понимать, что мировая гражданская ЯЭ эпохи холодной войны выросла из атомной бомбы. Мирные и военные приложения ЯЭ неразрывно связаны. Накопленные проблемы – это наследие от военного использования атома в мирных целях со всеми присущими им внутренними недостатками, среди которых радиационные катастрофы отличались особой тяжестью последствий для биосферы и человека [10].

16. Ядерная технология имеет самый высокий разрушительный потенциал. АЭС являют-

ся привлекательным объектом для терроризма и в случае военных действий. Ядерная угроза представляет особую проблему – будь то приобретение плутония и высокообогащённого урана, саботаж в отношении ядерного объекта или использование радиоактивных материалов в диспергирующих устройствах и в «грязных» бомбах. Ущерб стране от разрушения АЭС по площади поражения много больше, чем от уничтожения других объектов. Не менее страшные последствия, чем разрушение АЭС, может иметь разрушение пристанционных хранилищ ОЯТ в случае падения самолётов, метеоритов, цунами, обстрела ракетами и др. Существует сильная взаимосвязь между ядерными рисками, социально-политической и экономической стабильностью общества. Если произойдут одна или несколько крупных аварий, то общественность перестанет считать ЯЭ приемлемой.

17. Современные ядерные реакторы – достаточно безопасные установки, однако для АЭС (как для любой сложной технической системы) всегда существует вероятность отказа с непредсказуемыми последствиями. К серьёзной аварии на АЭС могут привести перебои в подаче электроэнергии, изношенность оборудования, несогласованность действий различных служб при одновременном отказе резервных дизель-генераторов. Невозможно предусмотреть и предупредить все случаи, в результате которых произойдёт выброс регулирующих стержней системы управления и защиты (СУЗ) из активной зоны и возникнет аварийная ситуация. Многочисленные

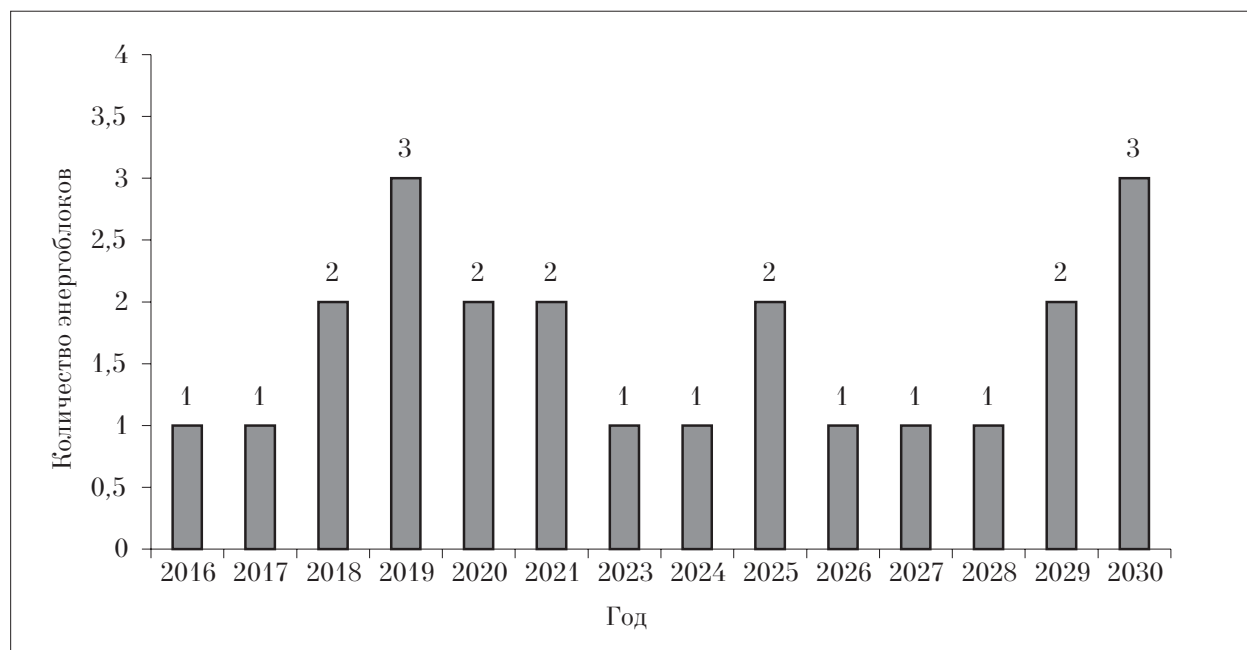


Рис. 3. Окончание срока эксплуатации с учётом продления проектного срока эксплуатации на 15 лет

примеры неполадок, повреждений, сбоев в работе и т. п. приведены во многих работах, и нет необходимости здесь на них останавливаться. Крупные аварии уже несколько раз в минувшие десятилетия ставили мир на грань экологической катастрофы [13].

18. Проблема человеческого фактора на ядерных объектах имеет исключительное значение для обеспечения безопасности. Какие бы невероятные усилия не предпринимались по внедрению новейших и совершеннейших технологических систем, управлять ими будет человек, и если уровень его ответственности и организованности не станет расти в пропорциях, соответствующих новым технологиям, нельзя быть уверенным в безопасности и надёжности ЯЭ.

При увеличении объёмов производства ЯЭ рассмотренные факторы будут неизбежно оказывать постоянно возрастающее давление на экономические показатели, индексы безопасности АЭС и уровень глобальной политической тревожности. Для многих стран, не имеющих инфраструктуры ЯТЦ, реализация планов сооружения АЭС при неизбежно жёстком выполнении ДНЯО может быть осложнена или отложена на неопределённое время. Таким образом, одной из наиболее актуальных задач ближайшего будущего является поиск и инженерное воплощение альтернативных топливных циклов и реакторных технологий – альтернативной ядерной энергетики без использования обогащённого урана и плутония.

Сегодня ЯЭ остро нуждается в свежих научных идеях и технологических инновациях. Вовлечение новых сил, знаний и опыта в решение этих задач – это крайне необходимая и актуальная задача. Если ЯЭ не будет развиваться, то изменение ЯТЦ (бридеры, переработка ОЯТ) через некоторое время потребует огромных финансовых вложений, масштаб которых трудно представить. Следует заняться исследованием и созданием структуры оптимального ЯТЦ с привлечением тория, электроядерных и термоядерных источников нейтронов, решить проблему создания безотходного по актинидам топливного цикла [2, 5, 7, 14 – 17]. Структуру ЯЭ необходимо оптимизировать с учётом минимизации количества нарабатываемых радионуклидов и следить за тем, чтобы их набор не оказался таким, что в будущем не хватит средств (нейтронов) на их «уничтожение». Для этого пора приступить к разработке реакторов-«мусорщиков», которые смогли бы перерабатывать трансураны, неприемлемые для обычных энергетических тепловых и быстрых реакторов, и которые были бы способ-

ны безопасно и эффективно работать без подпитки  $^{235}\text{U}$  в условиях постоянно изменяющегося нуклидного состава топлива [18]. Индия, Канада и Япония, например, исследуют множество вариантов развития ЯЭ. Недостаток, заключающийся в неопределённости в научных решениях и сомнениях, не должен рассматриваться как причина для сдерживания представляющихся заманчивыми целей. Технологическая революция всегда выгодна обществу.

Сегодня ЯЭ оказалась заложницей прошлых гигантских государственных вложений в урановый и уран-плутониевый циклы. Современная структура ЯЭ сдерживает практические шаги к масштабным разработкам новых гражданских типов реакторов, поскольку отвлекает на само-сохранение и масштабирование старого такие ресурсы, что на создание нового их практически не остаётся [17].

Коллективом учёных и сотрудников ФГУП ВНИИАМ с участием ведущих специалистов ряда профильных организаций России и Беларуси в инициативном порядке разработаны физико-технические основы принципиально новой схемы ядерной энергетики – тяжёло-ядерной релятивистской ториевой (ЯРТ) энергетики, способной решить проблемы ядерных отходов и нераспространения ядерного оружия. Комплексная программа работ по её созданию детально обсуждалась на целом ряде российских и международных научно-технических советов, конференций и форумов и положительно воспринята научной общественностью [5].

ЯРТ-энергетика является принципиально новой технологией, промышленная реализация которой возможна только на основе синтеза двух уникальных российских технологий. Это прямое сжигание  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  без промежуточных продуктов  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$  (как это имеет место в бридерных программах) нейтронами с энергией более 10 МэВ, получаемыми при бомбардировке этих ядер релятивистскими протонами с энергией 10-50 ГэВ. Протоны генерируются компактным модульным трёхмерным ускорителем на обратной волне. В перспективе в качестве топлива ЯРТ-реакторов возможно использование ОЯТ.

При концентрации сил и средств в рамках государственной и международной программ реально создание головного блока на этих принципах в течение 10 лет. Затраты на реализацию программы сопоставимы со стоимостью 1000 МВт- блока современных АЭС [5].

Развитие работ в этих направлениях полностью соответствует доктрине, изложенной Президентом РФ В.В. Путиным на Саммите



тысячелетия в ООН и в ряде интервью, – созданию в XXI в. доступной для всех стран ЯЭ без использования обогащённого урана и плутония, исключаящей распространение ядерного оружия.

В заключение следует сказать, что в целом ситуация в области использования ЯЭ в России непростая, весьма динамичная и многогранная. При всех сложностях и недостатках, которые существуют у сегодняшней технологической базы ЯЭ, её масштабное развитие на ближайшие 30-40 лет безальтернативно. Приоритеты ядерного энергопроизводства основаны на колоссальном удельном энергосодержании делящихся материалов, более чем в 2 млн. раз превышающего любые топлива химических энергоисточников. Это позволяет существенно снизить затраты на транспортировку энергоресурсов к местам их потребления, создать концентрированное производство электроэнергии и товарного тепла и решить задачу устойчивого энергообеспечения потребителей в регионах размещения АЭС. Ядерная энергетика делает Россию великой державой, с ней связаны прогрессивные технологии, поэтому актуальность её развития не вызывает сомнений. Ренессанс ЯЭ уже наступил, впереди – её эпоха [19].

Проблем развития атомной отрасли достаточно много, как их преодолеть – вопрос, в первую очередь, к научному сообществу атомной отрасли. Будущее – за экологически безопасной и надёжной ЯЭ и новыми технологиями.

### Литература

1. Федеральная целевая программа «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007 – 2010 годы и на перспективу до 2015 года». Утв. Постановлением Правительства РФ от 6 октября 2006 г. № 605. 155 с.
2. Карелин А.И. Проблемы и перспективы развития ядерной энергетике // Радиохимия. Т. 38. Вып. 4. 1996. С. 289-299.
3. Нечаев А.Ф. Некоторые субъективные соображения к дискуссии об атомной энергетике, науке и образовании // II Междунар. ядерного форума: Матер. докл. СПб.: ФГОУ «ГРОЦ», 2007. С. 279-281.
4. Асмолов В.Г. Приоритетные программы ядерно-энергетического комплекса // Атомная энергия, общество, безопасность: Матер. общественного форума-диалога. М.: Российский Зелёный крест, 2007. С. 10-18.
5. Острецов И.Н. Современные энергетические проблемы человечества и релятивистская тяжёлая ядерная (ЯРД) энергетика // Атомная энергия, общество,

безопасность: Матер. общественного форума-диалога. М.: Российский Зелёный крест, 2007. С. 52-57.

6. Муратов О.Э., Довгуша В.В., Тихонов М.Н. Радиоэкологические аспекты обращения с радиоактивными отходами и облучённым ядерным топливом // Экологическая экспертиза. 2007. № 6. С. 2-15.

7. Муратов О.Э., Тихонов М.Н. Радиоэкологические и ресурсные аспекты уран-ториевого топливного цикла // Бюлл. по атомной энергии. 2007. № 11. С. 66-71.

8. Пономарёв-Степной Н.Н., Цибульский В.Ф. Оценка эффективности использования смешанного уран-плутониевого топлива в ВВЭР // Атомная энергия. 2007. Т. 103. Вып. 5. С. 275-277.

9. Нечаев А.Ф. Ядерная энергетика: томительное ожидание ренессанса с «широко закрытыми глазами» // Безопасность ядерных технологий: экономика безопасности и обращения с источниками ионизирующих излучений: Матер. VIII Междунар. конф. СПб.: ФГОУ «ГРОЦ», 2005. С. 21-25.

10. Тихонов М.Н., Муратов О.Э. Катастрофы как источники потери устойчивости национальных экономик государств // Проблемы устойчивости объектов экономики в чрезвычайных ситуациях: Матер. науч.-метод. семинара. Вып. 6. СПб.: СПбГПУ, 2007. С. 119-130.

11. Смоляр И.Н., Ермашкевич В.Н. Атомная энергетика: аргументы за и против // Приложение к журналу «Право и экономика». Минск, 2000. 84 с.

12. Попова Л.В., Меньщиков В.Ф., Яблоков А.В. Нерешённые проблемы атомной индустрии // Материалы общественного форума-диалога «Атомная энергия, общество, безопасность» М.: Российский Зелёный крест, 2007. С. 119-121.

13. Тихонов М.Н. Радиационная география России // Энергия: экономика, техника, экология. 2008. № 1. С. 12-16.

14. Герасимов А.С., Зарецкая Т.С., Киселёв Г.В., Рудик А.П. Атомная энергетика без плутониевых отходов: Препринт ИТЭФ-90-74. М.: ИТЭФ, 1990. 8 с.

15. Герасимов Л.Н., Кудинович И.В., Свистанов Ю.А., Струев В.П. Малогабаритная энергетическая электроядерная установка: возможные технические решения // Известия РАН. 2005. № 2. с. 3-15.

16. Шведов О.В., Волков Е.Б., Игумнов М.М. и др. Электроядерные системы – ядерные энергетические установки нового поколения // Атомная энергия. 2004. Т. 97. Вып. 2. С. 145-152.

17. Субботин С.А. Ториевый цикл. Выбираем реактор // Атомная стратегия – XXI. 2007. № 6 (32). С. 28-29.

18. Прусаков В.Н., Субботин С.А. Реактор-«мусорщик» и проблемы атомной энергетике // Энергия экология. 1998. № 12. С. 16-21.

19. Муратов О.Э., Тихонов М.Н. «Ядерный ренессанс»: новые возможности и проблемы // Ядерное общество. 2006-2007. № 6-1. С. 17-24.