

# Перспективы роста и тенденции развития ядерной энергетики

**«Новое поколение» реакторных проектов отражает влияние прошлого опыта и современных требований**

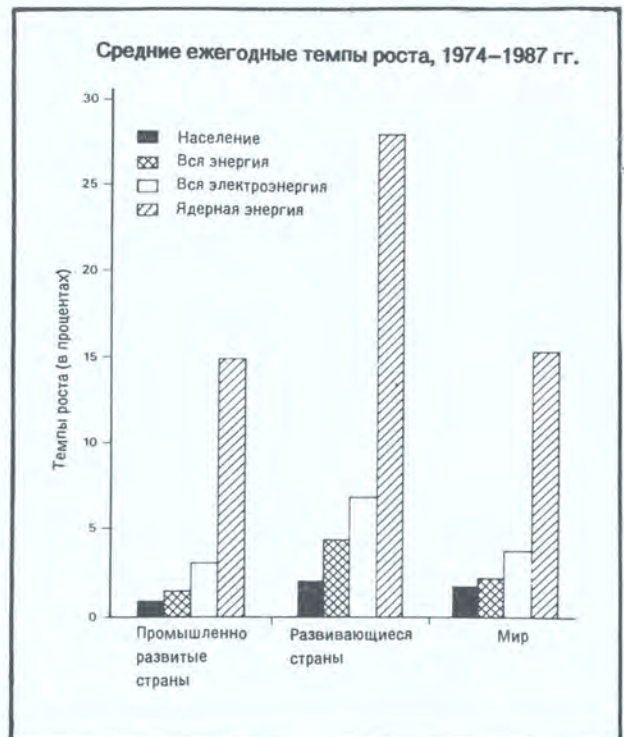
Б. Семенов, П. Дастидар, Дж. Купиц и А.Дж. Гуджон

Население мира продолжает расти, за последнюю треть века оно почти удвоилось. Энергопотребление росло еще более быстрыми темпами, увеличившись за тот же период более, чем в четыре раза. Этот рост энергопотребления в сравнении с приростом населения за последние 15 лет происходил пропорционально быстрее в развивающихся, чем в промышленно развитых странах (см. прилагаемый рисунок). Очевидно, что первоначальное развитие требует более крупных затрат энергии на душу населения, с тем чтобы предпринять усилия, направленные на количественные улучшения в благосостоянии страны и ее народа.

Для промышленно развитых стран такой пропорционально более высокий уровень энергопотребления был характерен в период до „нефтяного кризиса” начала 70-х годов. После этого, особенно в странах, находящихся в зависимости от импорта нефти, нормой жизни становится этика энергосбережения и эффективности и соответственно наблюдаются относительно небольшие приросты, а в некоторых странах даже падение ежегодного потребления энергии. В целом, однако, тенденция все еще продолжает быть позитивной и можно ожидать, что таковой она и останется.

Вскрылись и другие интересные факты. В темпах роста потребления электроэнергии в целом, как в промышленно развитых, так и в развивающихся странах отчетливо наблюдалась положительная тенденция, независимо от любого энергетического кризиса, причем этот рост всегда шел быстрее по сравнению с ростом энергопотребления в целом. В развивающихся странах потребление электроэнергии за последние 15 лет возрастало на 7 % в год, а в развитых странах – на 3 %, причем до нефтяного кризиса 70-х годов ежегодный прирост также со-

ставлял 7 %. Если, как ожидается, тенденция роста потребления электроэнергии в мире будет продолжать сохраняться, то произойдет быстрое истощение энергоресурсов для производства электричества, т.е. гидроресурсов и ископаемых видов топлива. Более того, ископаемые виды топлива – уголь, нефть и натуральный газ –, сгорание которых обеспечивает в настоящее время почти две трети мирового производства электроэнергии и играет значительную роль в загрязнении окружающей среды, могут иметь множество других более полезных и уникальных применений.



Г-н Семенов – заместитель генерального директора МАГАТЭ по Департаменту ядерной энергии и безопасности; г-н Дастидар – руководитель Отдела ядерной энергетики МАГАТЭ, г-н Купиц – старший сотрудник Отдела ядерной энергетики; г-н Гуджон – консультант того же отдела.

СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ (на 31 декабря 1988 г.)

	Действующие АЭС		Строящиеся АЭС		Суммарный опыт эксплуатации (на 31 декабря 88 г.) годы - месяцы	Производство электроэнергии на АЭС в 1988 г	
	Число блоков	Суммарная мощность МВт <sub>эл.</sub>	Число блоков	Суммарная мощность, МВт <sub>эл.</sub>		ТВтч	% от суммарного производства
Аргентина	2	935	1	692	20-7	5,1	11,2
Бельгия	7	5480			86-7	40,6	65,5
Бразилия	1	626	1	1245	6-9	0,6	0,3
Болгария	5	2585	2	1906	43-8	16,0	35,6
Канада	18	12185	4	3524	206-0	78,2	16,0
Китай			3	2148			
Куба			2	816			
Чехословакия	8	3264	8	5120	44-1	21,7	26,7
Финляндия	4	2310			39-4	18,4	36,0
Франция	55	52588	9	12245	488-1	260,2	69,9
ГДР	5	1694	6	3432	72-5	10,9*	9,9
ФРГ	23	21491	2	1520	279-3	137,8	34,0
Венгрия	4	1645			14-2	12,6	48,9
Индия	6	1154	8	1760	72-8	5,4	3,0
Исламская Республика Иран			2	2392			
Италия	2	1120			77-10		
Япония	38	28253	12	10931	394-0	167,8*	23,4
Корейская Республика	8	6270	1	900	36-4	38,0	46,9
Мексика			2	1308			
Нидерланды	2	508			35-9	3,5	5,3
Пакистан	1	125			17-3	0,2	0,5
Польша			2	880			
Румыния			5	3300			
Южная Африка	2	1842			8-3	10,5	7,3
Испания	10	7519			82-7	48,3	36,1
Швеция	12	9693			135-2	66,3	46,9
Швейцария	5	2952			68-10	21,5	37,4
Тайвань, Китай	6	4924			44-1	29,3*	41,0*
Великобритания	40	11921	2	1833	810-10	55,5	19,3
США	108	95273	7	7689	1261-10	526,9	19,5
СССР	56	33833	26	21230	687-2	215,7	12,6
Югославия	1	632			7-3	3,9	5,2
<b>Всего в мире</b>	<b>429</b>	<b>310812</b>	<b>105</b>	<b>84871</b>	<b>5040-9</b>	<b>1794,4</b>	

\* По оценкам. Источник: МАГАТЭ, Информационная система по энергетическим реакторам (PRIS)

Очевидна необходимость других источников энергии, отличных от ископаемых топлив, и ядерные системы дают возможность выбора. Пока не произойдут ожидаемые прорывы в так называемых мягких технологиях, т.е. в фотоэлектрических методах, при условии их эффективности по затратам, или пока не реализуются долгожданные надежды на системы термоядерного синтеза, до тех пор ядерное деление и ископаемые виды топлива (преимущественно уголь) остаются единственными реально существующими альтернативами, которые можно принимать в расчет.

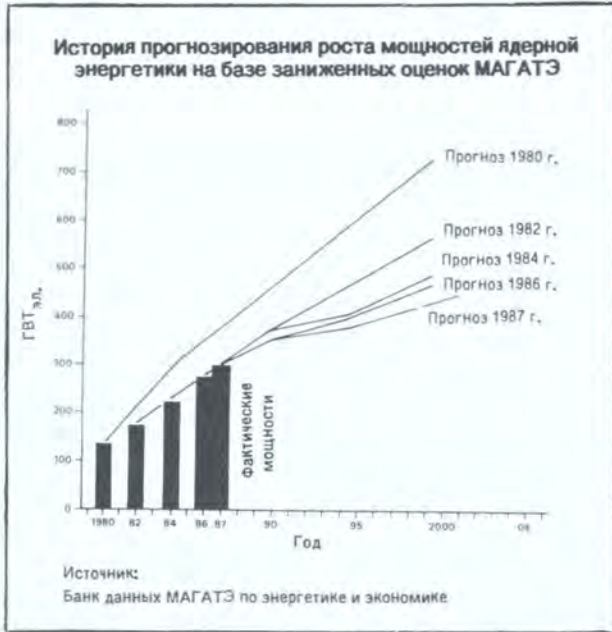
Состояние ядерной энергетики

Несмотря на опасения, проявившиеся в последнее время, ядерная энергетика в 1988 г. продолжала двигаться вперед ускоренными темпами в

удовлетворении мировых потребностей в электроэнергии. Это подтверждается современным (на конец 1988 г.) состоянием наличия действующих и строящихся АЭС (см. прилагаемую таблицу, на основе данных Системы информации об энергетических реакторах (PRIS) МАГАТЭ.

В 1988 г. были запущены в эксплуатацию четырнадцать новых ядерных энергетических реактора в восьми странах, так что суммарное число действующих в мире энергоблоков АЭС достигло 429. На конец 1988 г. 26 стран имеют АЭС для производства электроэнергии. Мировая суммарная электрическая мощность АЭС выросла в 1988 г. почти на 12 ГВт и в настоящее время превышает 310 ГВт.

В число стран, где были введены в действие новые ядерные энергетические реакторы в 1988 г., входят Франция (2), Япония (2), Федеративная Республика Германия (2), Корейская Республика (1), Испания (1), Великобритания (3), Соединенные



Штаты Америки (2) и СССР (1). В 11 из 26 стран более одной трети электроэнергии было получено за счет ядерной энергетики. В целом при производстве около 1800 ТВт·ч электроэнергии в 1988 г. почти 17 % или одна шестая часть её была выработана на 429 АЭС, что приблизительно равно суммарному производству электроэнергии в 1957 г. от всех источников.

За последние 15 лет наблюдается феноменальный рост потребления ядерной электроэнергии. Если темпы роста потребления электроэнергии за этот период в промышленно развитых странах составляли 3 % в год, то для ядерной энергетики в производстве потребляемой электроэнергии выростала на 15 % в год. В развивающихся странах потребление электроэнергии росло быстрее — на 6,9 % в год, а доля ядерной энергетики при этом увеличивалась на 28 % в год. Безусловно, представляют интерес все страны этой второй категории, где электрификация и все связанные с ней удобства получают все более широкое признание, результатом которого является опережающий рост потребления электроэнергии по сравнению с энергопотреблением в целом, и где ядерная энергетика еще не получила достаточного развития.

**Перспективы.** Прогнозирование роста ядерной энергетики стало трудной задачей. На основе прошлого нельзя предугадать будущего, по крайней мере ближайшего будущего. Из-за вышеуказанных причин, в промышленно развитых странах за десять с лишним предыдущих лет не только снизились темпы роста потребления электроэнергии, что приводило либо к отказу от предварительно запланированных дополнительных мощностей либо к задержкам с вводом их в действие, но и общий эмоциональный настрой по отношению к атомной энергетике оказал еще более серьезное влияние на ее темпы роста. В мировом масштабе фактические темпы роста были значительно ниже прогнозированных (см. рисунок). Ясно видна тенденция к по-

следовательному сокращению прогнозируемых темпов роста на 2000 г., хотя расхождение между последними прогнозами уменьшилось. В результате дополнительные мощности АЭС на 2000 г. сократились в прогнозе 1987 г. на 300 ГВт по сравнению с прогнозом 1980 г. Из-за длительности периода реализации ядерных энергетических проектов, включая планирование, получение лицензии, строительство и пуск, рост мощностей АЭС за краткосрочный период (до конца столетия) будет в основном определяться ранее принятыми решениями, хотя при этом нельзя исключить влияние задержек в строительстве или получении лицензии, а также политических изменений. Ситуация же после 2000 г. в меньшей степени поддается прогнозированию.

На базе низких оценок роста, сделанных МАГАТЭ в 1987 г., был рассчитан предполагаемый рост установленной мощности АЭС и процентная доля ядерного вклада в суммарную установленную мощность производства электроэнергии в промышленно развитых и развивающихся странах до 2005 г. (См. прилагаемый рисунок). Суммарный рост электрической мощности АЭС с 298 ГВт в 1987 г. до 503 ГВт в 2005 г. соответствует среднему годовому приросту в 3 % и увеличению мощности на 205 ГВт за этот период.

Часть прироста мощности в промышленно развитых странах прогнозируется в 153 ГВт, что соответствует годовому среднему темпу прироста около 2,5 % и примерно совпадает с прогнозируемым темпом роста потребления электроэнергии. Другими словами, озабоченность проблемами ядерной энергетики, с одной стороны, и слишком оптимистичные расчеты на рост потребления электроэнергии, сделанные в начале 70-х годов, с другой, позволили спрогнозировать примерное равенство между долей участия АЭС в производстве электроэнергии и общим ростом ее производства. Действительно, начиная с 1995 г. прогнозируется стабилизация доли АЭС в производстве электроэнергии в промышленно развитых странах на уровне 15 % до конца прогнозируемого периода. Однако можно ожидать, что в период 1995–2005 гг. АЭС будут удовлетворять до 23 % суммарных потребностей в электроэнергии, благодаря их преимущественному использованию в режиме основной сетевой нагрузки.

Ожидается, что за тот же период электрическая мощность АЭС в развивающихся странах достигнет в сумме 72 ГВт к 2005 г., т.е. будет введено 51 ГВт электрической мощности при средних темпах годового прироста в 7,1 %. В отличие от промышленно развитых стран развитие ядерной энергетики в развивающихся странах прогнозируется в расчете на продолжение роста ее доли в растущем объеме производства электроэнергии до 5,3 % к 2005 г. Таким образом, ожидается, что 25 % вековой прироста мощности АЭС, введенных в коммерческую эксплуатацию в мире к 2005 г., произойдет в развивающихся странах.

По прогнозам на 2005 г. доля ядерной энергетики в мировом масштабе составит 12 % суммарной мощности производства электроэнергии, что значительно ниже уровня, на который делались расчеты десятилетие назад, но такая оценка обоснованно базируется на текущей ситуации и тенден-

циях дальнейшего развития. Вызывает беспокойство тот факт, что для удовлетворения прогнозируемых в настоящее время суммарных потребностей в электроэнергии ее производство на базе ископаемых видов топлива, в основном угля, должно будет возрасти к 2005 г. в 1,8 раза, а это с точки зрения воздействия на окружающую среду является нежелательным. Настоятельное требование конференции в Торонто 1988 г. снизить на 20 % выброс  $CO_2$  по сравнению с теперешним уровнем, по этой причине, вряд ли будет выполнено.

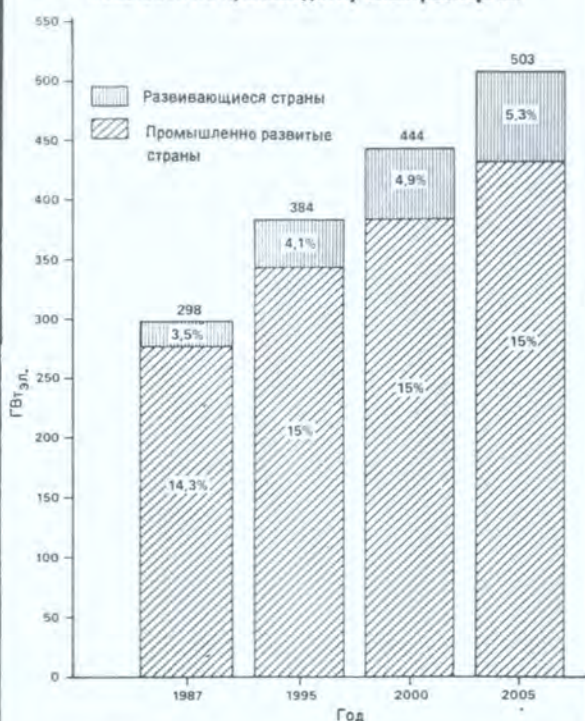
**Уроки прошлого опыта.** Для того, чтобы ядерная энергетика вновь заняла подобающее ей положение источника энергии, обеспечивающего растущую долю прироста производства электроэнергии в промышленно развитых странах в целом, чтобы сохранились темпы ее прироста в развивающихся странах и оправдались надежды на увеличение, а также открылись возможности для освоения ядерной энергетике в ряде новых стран, следует критически осмыслить уроки прошлого опыта.

Особое значение в этом отношении имеют аварии на АЭС „Три Майл Айленд“ и в Чернобыле. Обе аварии привели к серьезному пересмотру всеми странами, имеющими действующие АЭС, основных характеристик их безопасности. Результатом первой аварии, хотя она и имела относительно незначительные последствия с точки зрения воздействия на население, было введение ряда усовершенствований с целью повышения технологической безопасности и надежности. Авария выявила также, что показания имеющихся приборов могут дать неправильное представление о состоянии реакторной системы. Подготовка операторов также была недостаточной для расшифровки данных в необычных условиях по мере их развития. В результате были введены в употребление усовершенствованные стимуляторы и организована более строгая подготовка операторов, включая тренировку в условиях имитации необычных ситуаций. Кроме того, была усовершенствована сама приборная часть и операторам предоставлена лучше подготовленная информация. Этот круг вопросов, часто объединяемый под общим названием – взаимодействие человек – машина, продолжает разрабатываться. Чернобыльская авария имела серьезные последствия для населения и намного более серьезное международное значение. Авария в Чернобыле привела к тому, что Советский Союз занялся серьезным пересмотром своей ядерной программы и типов АЭС, которые будут строиться в будущем.

Независимо от различий в последствиях для населения, обе аварии нанесли огромный материальный и экономический ущерб и потребовали больших расходов на послеаварийные мероприятия. Извлеченный из этого урок требует повышения внимания к вопросам защиты будущих АЭС с точки зрения экономического и материального риска.

Надежность АЭС и тесно связанный с этим коэффициент использования, который определяется процентом времени за год, когда реактор способен производить энергию – также являются ключевыми факторами, требующими рассмотрения в будущем. Фактически за последнее десятилетие достигнуты значительные результаты в улучшении КИ.

Прогнозируемый рост мощностей ядерной энергетике до 2005 г. (на базе заниженных оценок МАГАТЭ) и процентный вклад ядерной энергетике в суммарные мощности по производству электроэнергии



Источник  
Банк данных МАГАТЭ по энергетике и экономике.

В 1977 г. средний КИ для 137 энергоблоков, сведения о которых сообщены в Систему информации по энергетическим реакторам, составлял только 64,7 %; в 1982 г. число блоков возросло до 200, но средний КИ остался около 65 % – и этот процент вызвал определенную озабоченность. К 1987 г. процент возрос до 71,4 % для 346 энергоблоков. Еще более важно, что 42 % этих энергоблоков эксплуатировались в 1987 г. с КИ 80 % или выше. Необходимо предпринимать усилия по улучшению этого показателя.

Далее, посредством исследований вероятностного фактора безопасности – где вероятность отказов компонентов и систем используется для оценки общей вероятности серии последовательных отказов – были выявлены слабые звенья в цепочке обеспечения безопасности и приняты меры для улучшения общего состояния безопасности. Подобные же методы были использованы для анализа человеческих ошибок. Результатом этих усилий было заметное сокращение числа проверок системы безопасности на прочность.

Другим фактором, игравшим заметную роль в прошлом опыте в качестве ключевого элемента, определяющего будущие разработки, является размер установки. Добиваясь эффективности капиталовложений в АЭС, разработчики проектов в высокоразвитых странах стремились увеличивать раз-

меры установок ради ожидаемого сокращения капитальных затрат в расчете на выходную мощность одного реактора. Такие расчеты вели не только к усложнению проекта с точки зрения увеличения количества компонентов и приборов, а также роста требований к обеспечению контроля, но и к дополнительным нагрузкам, связанным с эксплуатацией и содержанием установки. Создание более простых систем могло бы способствовать не только сокращению числа ошибок операторов на этапах эксплуатации и ремонта, но также и уменьшению капитальных затрат. Ряд проектировщиков считает возможным эффективное обеспечение на энергоблоках меньшей мощности более простых проектных решений, включающих присущее им высокое качество рабочих параметров, и более значительную опору на естественные процессы для выполнения требований по безопасности и хорошие экономические показатели. Становится все более очевидным существование рынка для АЭС меньшей мощности при планировании будущих применений во многих развивающихся странах, а с учетом гибкости при удовлетворении потребностей в случаях пониженных сетевых нагрузок – и в некоторых промышленно развитых странах. Такой вывод подкрепляется начатыми в МАГАТЭ в 1983 г. исследованиями по изучению АЭС малой и средней мощности (МСЭРы).

Еще одним фактором, связанным с размером, также дающим толчок дальнейшему развитию МСЭРов, является использование потенциальных возможностей МСЭРов для будущих применений ядерной энергетики исключительно для производства тепла, либо низкотемпературного районного теплоснабжения жилых домов и коммунальных целей, либо для производства высокотемпературного пара и тепла для производственных нужд. Обеспокоенность опасностью выбросов, создающих парниковый эффект газов при продолжении применения ископаемых видов топлива могла бы ускорить рост спроса на ядерное тепло в не слишком отдаленном будущем. Рынок требует небольших размеров таких систем для включения их в локальные распределительные сети.

**Параметры будущего успеха.** Прошлый опыт явился основой для выработки параметров будущей структуры ядерной энергетики, способной удовлетворить запросы разнообразных заказчиков:

- крупные АЭС для тех промышленно развитых стран, где уровень сетевой нагрузки и темпы ее роста, а также системы распределения требуют мощных установок;
- АЭС меньшего и среднего размера там, где, наоборот, требуются именно такие установки, а также для применений не только для производства электроэнергии;
- повышенное внимание к вопросам безопасности, независимо от размеров установки, эффективное использование перерывов в работе реактора для мероприятий по безопасности, изучения пассивных характеристик и подготовки персонала, способного контролировать неординарную ситуацию и справиться с ней; кроме того, при проектировании должны быть предусмотрены резервные возможности, позволяющие прибегать к использованию систем безопасности лишь в редких случаях; в качестве отдельного элемента в этом разделе требований можно учитывать повышенную чувствительность

инвеститоров к вопросам риска капиталовложений;

- повышение уровня стандартизации и более простые проекты установок, обеспечивающие более совершенный режим работы, лучшие экономические показатели, более высокую надежность, совершенствование взаимодействия человек-машина, централизованное обслуживание, активизацию международного обмена и лучшее взаимопонимание; кроме того, необходим целенаправленный механизм регулирования, обеспечивающий оперативное реагирование без ущерба для эффективности работы АЭС;

- совершенствование методов использования ресурсов, эффективное закрытие топливного цикла и действенное обращение с отходами.

Для сохранения целостности структуры и всех ее параметров необходимо, чтобы на каждой установке и в каждом виде деятельности проявлялось „стремление к совершенству“, которое стало ключевой фразой, характеризующей усилия людей по восстановлению темпов роста ядерной энергетики и которое должно быть присуще всему процессу.

### Тенденции развития ядерной энергетики

Повышенное внимание к новой структуре организации работ по ядерной энергетике оказывается не только правительственными и промышленными кругами стран с уже хорошо развитой инфраструктурой в этой области, но и тех стран, которые серьезно занимаются изучением возможностей расширения или введения в действие ядерных энергетических программ. Тенденции развития всех реакторных концепций четко отражают влияние накопленного опыта и новых подходов, рассчитанных на будущее.

**Легководные реакторы.** Применяемая в настоящее время технология легководных реакторов (ЛВР) доказала свою экономичность, безопасность и надежность. В большинстве промышленно развитых стран продолжается разработка крупных установок с выходной мощностью свыше 900 МВт(эл.) в качестве усовершенствованного типа ЛВР для 90-х годов. Проекты новых ЛВР разрабатываются на базе постоянного совершенствования и эволюционного улучшения действующих моделей. Например, модель N4 (1400 МВт<sub>эл.</sub>), которая в настоящее время строится во Франции, является прямым результатом усовершенствования стандартизованной серийной модели P4 (1300 МВт) с сокращением на 5 % затрат на киловатт установленной мощности. Комплекс „Конвой“ в Федеративной Республике Германия представляет собой группу из трех реакторов на воде под давлением со стандартной мощностью 1300 МВт<sub>эл.</sub>. Усовершенствования здесь касаются в основном инженерных и управленческих аспектов строительства АЭС. В СССР начато проектирование реактора ВВЭР-1800, являющегося усовершенствованным вариантом ВВЭР-1000 с лучшими характеристиками по безопасности и экономике. Примерами крупных ЛВР являются также усовершенствованный реактор на воде под давлением фирм „Вестингауз“ и „Мицубиси“ (APWR – 1350 МВт<sub>эл.</sub>), британские реакторы на воде под давлением „Sizewell-B“ (1250 МВт<sub>эл.</sub>), „System 80 Plus“ фирмы „Combustion Engi-

peering" (3800 МВт) и усовершенствованный реактор на кипящей воде фирм „Дженерал Электрик“, „Хитачи“ и „Тошиба“ (ABWR-1360 МВт<sub>эл</sub>). Во все эти проекты внесены многочисленные усовершенствования: улучшены технология и эксплуатационные процедуры, рабочие характеристики и степень выгорания топлива, используются компьютеры и более современные информационные дисплеи для лучшего взаимодействия человек-машина, повышена степень стандартизации узлов, предусмотрена более высокая квалификация операторов и их подготовка с имитированием рабочих условий. Результаты всех этих усовершенствований проявляются в постепенном повышении КИ и в снижении числа случаев, требующих применения систем обеспечения безопасности.

Программа США, осуществляемая совместно Исследовательским электроэнергетическим институтом и Министерством энергетики, является примером иного подхода к эволюции в области реакторных разработок. Они подготовили полный перечень требований заказчиков и запланировали разработку концептуального проекта усовершенствованного ЛВР, отвечающего этим требованиям, в течение трехлетнего периода с участием промышленных фирм. Рассматриваются проекты как крупных, так и малых установок (мощностью 600 МВт<sub>эл</sub> и ниже), причем в установках малой мощности повышенное внимание уделяется элементам пассивной безопасности, не требующей вмешательства оператора. Ключевым элементом этой программы является утверждение проектов органами лицензирования. Предполагается, что эти установки будут предложены для коммерческой эксплуатации в течение предстоящего десятилетия без прохождения этапа предварительной демонстрации. Реактор на воде под давлением AP-600 (усовершенствованный пассивный, 600 МВт<sub>эл</sub>), SBWR (реактор на кипящей воде упрощенного типа) и SIR (интегрально безопасный реактор на воде под давлением) – все это небольшие усовершенствованные ЛВР, которым присуща пассивная безопасность. Проект SIR был разработан совместно фирмами „Combustion Engineering“ и „Стоун энд Уэбстер“ в США с участием фирмы „Роллс Ройс“ и Управления по атомной энергии Великобритании.

Более радикальный подход принят разработчиками реактора PIUS (ABB-Atom) и ISER (Токийский университет). Эти проекты основаны на принципе полной пассивности при необходимости остановки реактора и обеспечения постоянного охлаждения активной зоны для удаления тепла от реакции распада после аварии. В эти проекты внесено несколько уникальных усовершенствований, благодаря которым установка работает в полностью пассивном режиме, основанном на неопровержимых физических принципах, не требующих никакого вмешательства оператора. Проекты реакторов в основном небольшой мощности, как кипящих, так и на воде под давлением, находятся на ранней стадии концептуальной проработки, и для подтверждения заложенных в них принципов, возможно, потребуются создание демонстрационной установки. Поэтому коммерческая эксплуатация таких установок, вероятно, будет позже по сравнению с другими проектами.

Другим элементом в процессе эволюционного

развития разработок ЛВР стало усовершенствование методов использования урановых ресурсов в связи с очевидной задержкой по финансовым соображениям в крупномасштабном развертывании реакторов-размножителей. Необходимость внесения сравнительно небольших изменений в проекты существующих водо-водяных реакторов могла бы повлиять на принятие решений в пользу таких подходов по улучшению использования ресурсов топлива. Эти изменения могли бы включать такие меры, как повторное использование плутония и разработка новых проектов активной зоны, в которых специально предусматриваются значительные усовершенствования в использовании топлива. В связи с низкой степенью экономического риска, характерного для некоторых из этих подходов, они могли бы легко и быстро быть осуществлены на практике. В ближайшее время ожидается подтверждение их технической и экономической осуществимости в результате контрольных исследований и практических разработок, ведущихся в нескольких странах, включая США, Японию, Федеративную Республику Германию и, в особенности, Францию. Многие из этих модификаций, если они окажутся приемлемыми, могли бы быть применены в существующих реакторах в ближайшие 3–5 лет.

**Тяжеловодные реакторы.** Разработаны два типа коммерческих реакторов, охлаждаемых тяжелой водой под давлением (ТВР). Оба варианта – с трубопроводом под давлением и корпусом под давлением – полностью подтвердили свою дееспособность при коммерческой эксплуатации в нескольких странах. Выходная электрическая мощность варьируется от нескольких сот МВт до 900 МВт. Показатели продолжительности срока эксплуатации оказались в числе лучших среди всех типов коммерческих реакторов. Характеристики безопасности также оказались очень хорошими. Были продемонстрированы многообещающие показатели по низкой стоимости топливной загрузки благодаря присутствующей тяжелой воде экономии нейтронов при замедлении. Это открывает перспективу использования широкого диапазона топливных циклов, включая применение низкообогащенного урана, использование переработанного урана в ЛВР (обеспечивающее синергизм между ЛВР и ТВР), повторный цикл плутония и ториевый цикл. Большинство этих вариантов проходят стадию исследований, особенно в Канаде, в качестве части постоянной программы разработок.

Эти постоянные программы по разработке проектов ТВР направлены в основном на снижение стоимости установок, эволюционное усовершенствование рабочих характеристик и повышение уровня безопасности. Эти проекты включают реакторы в Индии мощностью 500 МВт, несколько проектов в Канаде, в том числе „Канду-3“ на 480 МВт, „Канду-6 МК2“ на 800 МВт и „Аргос“ на 380 МВт, разрабатываемый совместно инженерной фирмой в Аргентине и фирмой „Сименс“ в Федеративной Республике Германии.

**Реакторы с газовым охлаждением.** С завершением строительства АЭС „Хейшем-2“ и „Торнесс“ в Великобритании программа усовершенствованных реакторов с газовым охлаждением (AGR), пионерами которой были англичане, кажется, подошла к завершению. Дальнейшая разработка

этой системы, охлаждаемой двуокисью углерода, будет сконцентрирована на усовершенствовании эксплуатационных показателей и исследовании продолжительности срока службы существующих реакторов.

В США, Федеративной Республике Германии СССР и Японии продолжается разработка высокотемпературного реактора с гелиевым охлаждением (HTGR). Основные усилия направлены на разработку проектов небольших модулей с индивидуальной выходной мощностью от 80 до 150 МВт, при ограниченном внимании в настоящее время к более крупным установкам типа „Fort St. Vrain” в США (330 МВт) и ТНТР в ФРГ (300 МВт). Мотивация этой тенденции связана с критическим рассмотрением требований к будущим АЭС. Упор был сделан на модульный характер проектов с максимальным использованием компонентов заводского изготовления в противовес строительству на площадке с целью обеспечения лучшего контроля качества, а также экономии времени и денег. Выходная мощность отдельных модулей и конфигурация активной зоны реактора были сознательно выбраны с учетом удовлетворения требований по соблюдению критериев в отношении безопасности и защиты от риска при капиталовложениях (эти требования более строгие по сравнению с теми, которые прежде применялись к любой из реакторных систем) посредством применения полностью пассивных систем, тесно связанных с активной зоной реактора. Целью выделения этих нескольких реакторных систем для применения при их строительстве методов, отвечающих ядерным стандартам, из остального строительства по обычным стандартам является получение значительной экономии расходов.

Ключевыми элементами, характеризующими HTGR, являются мягкий гелиевый охладитель, большая масса графитового замедлителя (отсюда — низкая плотность энергии), тесно связанная с топливом, постоянный отрицательный энергетический коэффициент и, в особенности, само топливо, имеющее форму отдельных мелких частиц, каждая из которых помещена в многослойную оболочку из керамического материала. Это топливо способно вместе с графитовым замедлителем выдержать действие очень высоких температур и не потерять своей целостности. Эти установки могут выдержать аварию с полной потерей охладителя, что является уникальным свойством, не встречающимся больше ни в одной реакторной системе.

Основные характеристики и технические данные HTGR уже хорошо известны благодаря 30-летнему опыту проектирования и эксплуатации. Однако было признано, что новые уникальные отличительные черты и характеристики HTGR модульного типа, вероятно, потребуют демонстрации установок перед утверждением проекта для коммерческого использования. Соответственно организованы программы разработок в США, Федеративной Республике Германии и СССР. При сравнительно небольшом размере каждого модуля целесообразно рассмотреть вариант демонстрации лишь одного модуля с последующим переходом к многомодульной системе для коммерческих целей на той же площадке. Действительно, одно из преимуществ модульной концепции заключается в возможности

прогрессивного расширения размеров комплекса на одной площадке путем добавления новых модулей для удовлетворения потребностей в дополнительной нагрузке сети. Благодаря этому, а также с учетом привлекательности концепции модульный HTGR мог бы, возможно, стать хорошим кандидатом для экспорта в другие страны со сравнительно низким уровнем потребностей в электроэнергии и менее развитой инфраструктурой для использования ядерной энергетики.

В Японии признаются потенциальные возможности программы HTGR для производства пара высокого качества и высокоэффективного производства электроэнергии. Тем не менее японская программа в этой области нацелена в первую очередь, на возможность доказать получение еще более высоких выходных температур гелиевого охладителя (до 1000 °С) для возможности использования тепла во многих промышленных процессах. Небольшой испытательный реактор (HTTR) на 30 МВт строится в настоящее время в Японии для достижения этой цели.

**Жидкометаллические реакторы.** Жидкометаллические быстрые реакторы (LMFR) не получили ожидаемого распространения в качестве реакторов-размножителей, а также для производства электроэнергии из-за наличия достаточного количества урановых ресурсов по доступной цене для удовлетворения ближайших и среднесрочных потребностей. Тем не менее, в промышленно развитых странах уверены в том, что реакторы-размножители будут необходимы в первые десятилетия следующего века, особенно если ядерная энергетика вновь наберет темпы в своем развитии.

А до этого продолжает накапливаться опыт, перешагнувший за 200 реакторо-лет эксплуатации экспериментальных и среднеразмерных энергоблоков LMFR. Продолжается также разработка проектов усовершенствованных вариантов с учетом пересмотра стратегии и требований к следующему поколению АЭС. Продолжаются также разработки в области топливного цикла с акцентом на вопросы, связанные с продлением сроков выгорания топлива и с демонстрацией возможности закрытого топливного цикла. Основные работы по топливу сосредоточены на смешанных окислах, однако, обнадеживающие результаты получены в недавних разработках в США по использованию тройного металлического (U-Pu-Zr) топлива и связанной с этим пиротехнической переработки отработавшего топлива. Отличительной чертой этого метода переработки является то, что большинство долгоживущих актинидов, сопровождающих плутоний в ходе процесса, в дальнейшем включаются в повторный цикл и таким образом извлекаются из потока отходов.

Разработки в Европе, Японии, СССР и Индии идут по традиционному пути проектов крупных установок с топливом в форме смешанных окислов. В Европе и в СССР разрабатываются энергоблоки от 1500 до 1600 МВт с использованием подходов к проектированию компонентов и установки в целом, а также топливного цикла на базе эволюционного пути развития, берущего начало в успешном опыте эксплуатации реакторов „Феникс” и „Суперфеникс” во Франции, PER в Великобритании, БН-350 и БН-600 в СССР. В настоящее время много

внимания уделяется применению в этих проектах усовершенствованных принципов пассивной безопасности. Работа в Японии и Индии сосредоточена на проектах небольших установок – следующем шаге в эволюции развития. С учетом того, что в 1992 г. достигнет критичности прототип реактора „Монжу” на 280 МВт, ожидается, что следующим шагом Японии будут реакторы в диапазоне мощностей от 800 до 1000 МВт. Индия, начав с быстрого испытательного реактора-размножителя (FBTR), продолжает работу над следующим проектом прототипа бассейнового типа мощностью в 500 МВт (PFBR).

После снятия с эксплуатации реактора-размножителя „Клич Ривер” в США в 80-х годах в рамках американской программы жидкометаллических реакторов первоначально рассматривалось много вариантов усовершенствованных реакторов. Основные усилия в настоящее время сосредоточены на концепции модульного типа (PRISM), разработанной силами „Дженерал электрик компани”. Каждый энергоблок предлагаемой системы включает в себя три модуля по 471 МВт, связанных с одним турбогенератором мощностью 465 МВт<sub>эл.</sub> Комплекс имеет много нововведений, включая использование тройного металлического топлива, заложенную в проект систему остановки реактора при реагировании на избыток тепла и срабатывании коэффициента реактивности, пассивное удаление остаточного тепла, а также все другие конструкционные и эксплуатационные новшества, характерные для концептуальных подходов к разработке таких небольших модулей. Разработка программы вступила в стадию проектирования на предлицензионном этапе с намерением получить одобрение проекта после интенсивной серии испытаний полноразмерного прототипного модуля.

### Выводы

Тенденция роста потребления электроэнергии в мире ведет к следующим выводам:

• можно с полной определенностью прогнозировать, что электричество является наиболее подхо-

дящим и адаптируемым вариантом выбора источника энергии для будущего. В числе главных причин такого прогноза можно назвать чистоту, легкость транспортировки и конечного использования, а также множество видов применения электричества. Следует ожидать продолжения опережающего роста потребления электроэнергии по сравнению с ростом населения и суммарным энергопотреблением.

• Потребность в электроэнергии ляжет растущим бременем на основные ресурсы, используемые для ее производства. Можно ожидать быстрого истощения мировых естественных ресурсов, если они будут оставаться основным средством производства электричества, и что определенно скажется на окружающей среде. В долгосрочном плане необходимо разработать и внедрить другие источники электроэнергии.

• Ядерная энергетика, несмотря на эмоциональную полемику в прошлом и в настоящее время относительно ее использования, может служить безопасным, надежным и экономичным источником производства электроэнергии. Действительно, при перспективном взгляде на совокупность этих явлений можно прийти к выводу, что рост потребности в электроэнергии и развитие ядерной энергетике, не выбрасывающей двуокись углерода в окружающую среду, происходят одновременно по случайному совпадению, в котором испытывается абсолютная необходимость.

• Постоянное развитие ядерной энергетике в виде небольших эволюционных изменений в существующих типах реакторах и более крупных прогрессивных нововведений в технологии при проектировании нескольких усовершенствованных типов реакторов позволяет приступить к решению ряда проблем, связанных с этим источником энергии. Осуществлением этих программ развития следует заниматься самым активным образом.