

Развитие атомной энергетики: современное значение и ближайшие перспективы

Р. Крымм и Ж. П. Шарпантье

ВВЕДЕНИЕ

К началу 1979 года во всем мире эксплуатировалось 224 атомных электростанции общей мощностью 190 000 МВт (эл.). Распределение станций по странам приводится в таблице 1. Значительная роль атомной энергии в общей выработке электроэнергии в некоторых странах очевидна из таблицы 2, в которой показано производство электроэнергии на атомных станциях в разных странах и его доля в процентах от всей выработки электроэнергии за период с середины 1977 и до середины 1978 года. По всему миру, однако, ядерная энергия в 1978 году давала лишь около 2% производства первичной энергии и около 7% производства электроэнергии (см. таблицы 3, 4 и 5).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В МИРЕ И РОЛЬ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Оценку потребностей в атомной энергии можно сделать лишь с учетом современной энергетической ситуации в мире и ее вероятного развития в будущем. Эволюция полного потребления первичной энергии в период между 1950 и 1975 годами характеризовалась двумя особенностями:

- а) быстрыми темпами роста (в среднем около 5% в год), что привело к более чем трехкратному увеличению общего потребления энергии в мире за эти 25 лет, с 1,7 до более 6 млрд. эквивалентных тонн нефти;
- б) заменой угля углеводородами, пока они не составили почти 2/3 общего производства энергии к концу периода.

Что же ждет нас в будущем? Не занимаясь детальными количественными прогнозами, которые всегда содержат существенные элементы неопределенности и произвольных выкладок, можно считать неизбежным, что в последующие десятилетия рост энергетических потребностей мира будет продолжаться, хотя, конечно, и не такими темпами, как те, которые имели место в прошлом в различных районах мира. Это увеличение произойдет, даже если индустриальными странами будут предприняты максимальные усилия по экономии энергии, которые, конечно, необходимо предпринять, и даже если во всем мире будут разработаны более эффективные методы преобразования энергии и ее конечного потребления.

До своей смерти в декабре 1979 года г-н Крымм руководил Секцией экономических исследований Отдела ядерной энергетики и реакторов МАГАТЭ; г-н Шарпантье является сотрудником Секции экономических исследований.

Таблица 1. Эксплуатируемые атомные энергетические реакторы по состоянию на 1 января 1979 года

Страна	Число реакторов	Полезная мощность (МВт (эл.))
Аргентина	1	345
Бельгия	4	1 676
Болгария	2	816
Канада	10	4 755
Чехословакия	1	110
Финляндия	2	1 080
Франция	14	6 353
Германская Демократическая Республика	4	1 287
Федеративная Республика Германии	13	6 074
Индия	3	602
Италия	4	1 382
Япония	19	11 009
Корейская Республика	1	564
Нидерланды	2	499
Пакистан	1	126
Испания	3	1 073
Швеция	6	3 700
Швейцария	3	1 006
Тайвань	2	1 208
Соединенное Королевство	33	6 982
США	68	49 659
СССР	28	8 616
22 страны	224	108 922

Причины этого ожидаемого роста энергетических потребностей могут быть сгруппированы под четырьмя рубриками:

- общий рост народонаселения, особенно в развивающихся странах;
- экономическое развитие этих стран;
- отставание по времени, свойственное принятию мер по сбережению энергии в промышленно развитых странах;
- рост использования более бедных минеральных руд и регенерации отходов.

Таблица 2. Полное производство электроэнергии на атомных электростанциях за период с 1 июля 1977 по 30 июня 1978 года

Страна	Выработка электроэнергии на АЭС (10^9 кВт·ч)	Оценка доли электроэнергии, выработанной на АЭС (%)
Аргентина	2,4	6,5
Бельгия	12,5	22,0
Канада	30,0	10
Финляндия	3,2	9
Франция	23,5	10
Федеративная Республика Германии	33,5	8
Индия	2,1	2
Италия	3,5	2
Япония	35,3	6
Нидерланды	4,2	6
Пакистан	0,2	1
Испания	6,6	6
Швеция	23,1	22
Швейцария	8,1	17
Тайвань	1,0	—
Соединенное Королевство	37,9	10
США	268,9	11
СССР и Восточная Европа	53,0	3,5
Всего	550,0	7,8

Существующее распределение населения мира и ожидаемые тенденции его роста приведены в таблице 6. Можно убедиться, что, согласно консервативным оценкам, за последующие 20 лет ожидается увеличение численности населения более чем на 50% — от нынешнего уровня в 4,2 млрд. человек примерно до 6,4 млрд. к концу столетия. В течение этого периода население развивающихся стран вырастет примерно до 5 млрд. человек, с 72% до 78% от общей численности населения.

Нынешнее распределение коммерческого потребления энергии, приведенное в таблице 7, показывает общее и на душу населения потребление энергии в индустриальных и развивающихся странах, и разительные диспропорции в этом отношении. Среднее

Таблица 3. Оценки развития установленных электрических и атомных* мощностей для основных групп стран (в тыс. МВт (эл.))

Страна	1978			1985			2000		
	Полная электрическая мощность	АЭС	%	Полная электрическая мощность	АЭС	%	Полная электрическая мощность	АЭС	%
1) ОЭСР, Северная Америка	674	54,4	8,1	770-900	110-125	14	1400-1600	300-450	21-28
2) ОЭСР, Европа	410	29,8	7,3	530-610	90-100	16-17	1000-1200	270-400	27-33
3) ОЭСР, Тихий океан	156	11	7,0	200-220	25-30	12,5-13,5	400-500	100-150	25-30
4) Страны с централизованным плановым хозяйством (Европа)	342	10,9	3,2	600-700	50-80	8-11	1200-1400	250-450	21-32
5) Азия	117	2,5	2,1	170-200	8,5-9,6	5	640-750	60-75	9-10
6) Латинская Америка	80	0,3	0,4	110-130	3,1-5,3	3-4	370-450	40-100	11-22
7) Африка и Средний Восток	51	0	0	70-90	2,4-3,0	3-3,5	240-300	10-25	20-27
Весь мир	1830	108,9	6	2450-2850	289-352,9	12	5230-6200	1030-1650	20-27
8) Промышленно развитые страны	1598	106,1	6,6	2120-2455	276,8-336,8	13-14	4050-4760	925-1460	23-31
9) Развивающиеся страны	232	2,8	1,2	330-395	12,2-16,1	4	1180-1440	105-190	9-13

- 4) Включая Югославию.
 5) Включая Китай и Тайвань.
 8) Составлено из пунктов 1+2+3+4+Южная Африка.
 9) Составлено из пунктов 5+6+7-Южная Африка

* Основано на данных Международной оценки ядерного топливного цикла.
 Источники данных за 1978 год: полная электрическая мощность:
 Статистическое бюро ООН, Нью-Йорк;
 мощность атомных электростанций: МАГАТЭ.

Таблица 4. Оценки полного мирового потребления электрической и атомной энергии в тераватт-часах (ТВт·ч) . (ТВт·ч=10⁹ кВт·ч)

Страны	Электро- энергия (всего)	1978		1985			2000		
		АЭС	%	Электро- энергия (всего)	АЭС	%	Электро- энергия (всего)	АЭС	%
1) ОЭСР, Северная Америка	2649	289	11	3200-3800	620-710	19	5900-6700	1700-2500	29-37
2) ОЭСР, Европа	1617	151	9	2200-2600	510-570	22-23	4200-5000	1500-2200	36-44
3) ОЭСР, Тихий океан	673	32	5	840-900	140-170	17-19	1700-2100	570-850	34-40
4) Страны с централизованным плановым хозяйством (Европа)	1641	48	3	2500-3000	280-450	11-15	5100-5900	1400-2500	27-42
5) Азия	513	10	2	700-850	45-55	6	2700-3100	300-400	11-13
6) Латинская Америка	308	2	1	450-550	15-30	3-5	1500-1900	200-550	13-29
7) Африка и Средний Восток	211	0	0	290-350	10-15	3-4	1000-1300	50-140	5-11
Весь мир	7612	532	7	10180-12050	1620-2000	16-17	22100-26000	5720-9140	26-35
8) Промышленно развитые страны	6670	519	8	8900-10300	1550-1910	17-19	17100-20000	5120-8140	30-41
9) Развивающиеся страны	942	13	1,4	1280-1750	70-90	5	5000-6000	600-1000	12-17

4) Включая Югославию.

5) Включая Китай и Тайвань.

8) Составлено из пунктов 1+2+3+4+Южная Африка.

9) Составлено из пунктов 5+6+7 – Южная Африка.

Примечания: i)

ii)

Источник данных за 1978 год: Статистическое бюро ООН, Нью-Йорк.

Для увязки этой таблицы с таблицей 3, касающейся установленных мощностей, были сделаны следующие предположения для 1985 и 2000 годов:

- средний коэффициент использования электрических систем – 48%,
- средний коэффициент использования АЭС – 65%.

Таблица 5. Оценки полного мирового потребления первичной и атомной энергии в эксаджоулях (1 эксаджоуль – (ЭДж) = 10^{18} Дж)

Страны	Потребление энергии	1978			1985			2000		
		Потребление энергии	Атомная энергия	%	Потребление энергии	Атомная энергия	%	Потребление энергии	Атомная энергия	%
1) ОЭСР, Северная Америка	86,4	3,16	3,7	95-110	6,8-7,7	7	115-130	18,5-27,3	16-21	
2) ОЭСР, Европа	51,7	1,64	3,2	60-70	5,6-6,2	9	95-105	16,4-24,0	17-23	
3) ОЭСР, Тихий океан	17,5	0,35	2,0	26-32	1,5-1,9	6	40-50	6,2-9,3	16-19	
4) Страны с централизованным плановым хозяйством (Европа)	68,4	0,52	0,8	85-100	3,1-4,9	4-5	120-165	15,3-27,3	13-17	
5) Азия	42,6	0,11	0,3	40-50	0,5-0,6	1,2-1,3	75-90	3,3-4,4	4,4-4,9	
6) Латинская Америка	15,3	0,02	0,1	21-25	0,2-0,3	1,0-1,2	50-60	2,2-6,0	4,4-10	
7) Африка и Средний Восток	13,6	0	0	14-17	0,1-0,2	0,7-1,2	25-30	0,5-1,5	2-5	
Весь мир	295,5	5,80	2,0	341-404	17,8-21,8	5,2-5,4	520-630	62,4-99,8	12-16	
8) Промышленно развитые страны	226,8	5,67	2,5	295-315	16,9-20,8	6,3-6,6	375-455	55,9-88,8	15-20	
9) Развивающиеся страны	68,7	0,13	0,2	72-89	0,8-1,0	1,1	145-175	6,5-10,9	4,2-6,2	

4) Включая Югославию.
5) Включая Китай и Тайвань.
8) Составлено из пунктов 1+2+3+4+Южная Африка.
9) Составлено из пунктов 5+6+7 – Южная Африка.

Примечания: i) Источник данных за 1978 год: Статистическое бюро ООН, Нью-Йорк.
ii) Электроэнергия, вырабатываемая на АЭС, преобразована в первичную энергию, исходя из среднего коэффициента эффективности 0,33.
iii) Полное потребление энергии означает потребление первичной энергии плюс импорт полезной вторичной энергии (импорт-экспорт), т.е. полные энергетические потребности.

Таблица 6. Оценки мирового населения (млн. чел.)

Страны	1978		1985		2000
			Среднегодовой коэффициент прироста 1978-1985 (%)		Среднегодовой коэффициент прироста 1985-2000 (%)
1) ОЭСР, Северная Америка	243,5	262	1,05	296	0,8
2) ОЭСР, Европа	390,3	412	0,78	460	0,7
3) ОЭСР, Тихий океан	132,3	142	1,02	157	0,7
4) Страны с централизованным плановым хозяйством (Европа)	395,5	421	0,90	466	0,7
5) Азия	2 194,0	2 575	2,31	3 361	1,8
6) Латинская Америка	346,0	424	2,95	618	2,5
7) Африка и Средний Восток	489,9	649	4,10	995	2,9
8) Промышленно развитые страны	1 191,9	1 268	0,89	1 420	0,8
9) Развивающиеся страны	2 999,6	3 617	2,71	4 933	2,1

4) Включая Югославию.

5) Включая Китай и Тайвань.

8) Составлено из пунктов 1+2+3+4+Южная Африка.

9) Составлено из пунктов 5+6+7—Южная Африка.

Примечание: Оценки Статистического бюро ООН, Нью-Йорк.

потребление энергии на душу населения в индустриальных странах более чем в 8 раз выше потребления энергии развивающимися странами. Этому неравенству соответствует аналогичный разрыв в уровнях жизни, который может быть уменьшен только путем развития экономики и промышленности. Этот процесс развития будет неизбежно включать быстрый рост коммерческих энергетических потребностей, так как начальные стадии индустриализации несут особенно энергоемкий характер. Таким образом, даже если бы каким-то чудом, в результате активной политики экономии и ограничения потребления энергии индустриальные страны смогли бы добиться нулевого прироста производства энергии, давление спроса развивающихся стран привело бы к существенному увеличению мировых энергетических потребностей.

Однако, нулевой прирост производства энергии в индустриальных странах является иллюзией, по крайней мере в краткосрочном плане, так как большинство мероприятий, запроектированных для достижения большей эффективности производства энергии и большей экономии при потреблении энергии, требуют длительного времени для их полного внедрения. Обновление бытового или транспортного оборудования в соответствии с проектами экономии энергии может потребовать от одного до нескольких десятилетий. Образ жизни и внутренняя социальная структура не меняются за одну ночь. Соответственно, можно ожидать продолжения роста потребления энергии в индустриальных странах, хотя он и будет происходить значительно меньшими темпами по сравнению с теми, которые преобладали в течение последних 30 лет.

И, наконец, человечество все больше истощает свои лучшие запасы минеральных руд, и, по мере того как оно обращается к использованию менее богатых минералов или к регенерации различных металлов, потребление энергии в горнодобывающей промышленности, вероятно, будет расти.

Частными, национальными и международными организациями было предпринято впечатляющее число попыток выразить воздействие излагавшихся выше факторов в количественной форме. Результаты в отношении тенденций совпадают, однако существует, разумеется, большой разброс показателей по отдельным странам и годам. Это не вызывает удивления, если учесть бесчисленное множество предположений, учитываемых при расчетах. Соответственно, таблицу 5, которая в основе своей представляет собой критический обзор оценок, сделанных Мировой энергетической конференцией, не следует рассматривать как твердый прогноз, а лишь как возможную основу, в рамках которой возможно обсуждение будущих энергетических потребностей. Данные этой таблицы говорят о том, что уровень энергетических потребностей 1978 года, составивший примерно 295 эксаджоулей (или, если использовать более привычные единицы, около 7 млрд. эквивалентных тонн нефти), как ожидается, вырастет к 2000 году до 520-630 эксаджоулей (примерно 12-15 млрд. эквивалентных тонн нефти).

Каковы же источники снабжения, из которых человечество сможет удовлетворять эти, по консервативным оценкам почти удвоенные, потребности в энергии через два десятилетия? Ответы на этот вопрос обычно даются в форме различных таблиц, суммирующих запасы и ресурсы различных энергетических источников. К сожалению, представляемые цифры всегда сопровождаются такими определениями, как "доказанные", "оцененные", "подразумеваемые", "теоретические", "потенциальные", "экономически оправданные", "предельные" и т. д., которые не всегда способствуют

Таблица 7. Коммерческое потребление энергии в промышленно развитых и развивающихся странах в 1978 году

	Всего (10 ¹⁸ Дж)	На душу населения (10 ⁹ Дж)
Промышленно развитые страны	226,8	190
Развивающиеся страны	68,7	23
Отношение энергии, потребляемой в промышленно развитых странах, к энергии, потребляемой в развивающихся странах	3,3	8

ясным выводам. И здесь, как и при прогнозировании потребностей, было бы лучше сконцентрировать усилия на обсуждении достоверности отдельных цифр.

По грубым подсчетам, если оценки таблицы 5 взять в качестве основы, суммарное потребление энергии в мире в течение последующих 20 лет составит порядка 250 млрд. эквивалентных тонн нефти. Если доля нефти на рынке энергии сохранится, то это потребовало бы суммарной добычи нефти в объеме более 110 млрд. тонн, тогда как доказанные на сегодняшний день запасы составляют 90 млрд. тонн. Разумеется, при постоянном увеличении затрат могут быть обнаружены дополнительные запасы, но эти новые месторождения могли бы лишь отсрочить неизбежное окончательное истощение на несколько десятилетий. Аналогичная ситуация касается и природного газа. Таким образом, два источника энергии, которые сегодня обеспечивают около двух третей мировых поставок, в ближайшем будущем могут быстро истощиться.

Хотя ресурсы угля, возможно, превосходят ресурсы нефти или газа на порядок величины, они вместе с углеводородами обладают тем серьезным недостатком, что они чрезвычайно неравномерно распределены среди различных стран мира. Кроме того, быстрый рост добычи угля привел бы к росту серьезных экологических и социальных проблем, так что он сможет лишь частично заполнить брешь, которая будет оставаться открытой в результате прогрессирующего обеднения ресурсов нефти и газа.

И, наконец, везде, где для этого имеются условия, необходимо с максимальной быстротой осваивать возобновляемые источники энергии, хотя эти ресурсы либо уже широко используются и ограничены районом применения, как, например, гидроэлектроэнергия, либо доступны в таких мелкомасштабных и нерегулярных формах, как солнечная и ветровая энергия, так что это может дать лишь частичное и ограниченное решение общей энергетической проблемы. Следовательно, их общая доля в мировых поставках энергии к 2000 году вряд ли превысит 10%.

С другой стороны, атомная энергетика технологически и коммерчески созрела для того, чтобы внести свой немедленный и увеличивающийся внос.

ПЕРСПЕКТИВЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Не обращаясь к сложному сравнительному анализу стоимости производства электроэнергии, который зависит от выбора основополагающих принципов и, следовательно, широко варьируется от страны к стране, можно сделать следующие основные утверждения.

- i) Несмотря на резкое увеличение капиталовложений в атомные и обычные станции, которое имеет место за последние несколько лет, как правило, в результате увеличения числа и ужесточения норм, касающихся окружающей среды, атомные электростанции мощностью 900 МВт (эл.) и выше продолжают обладать очевидными сравнительными преимуществами над электрическими станциями, зависящими от импортной нефти.
- ii) Что касается сравнения атомных и угольных станций, ситуация может быть более сложной и зависит от стоимости добычи и транспортировки. Однако для большинства промышленно развитых стран атомные станции продолжают обладать значительными экономическими преимуществами даже при существующих относительно низких ценах на уголь.
- iii) Что касается будущего, то представляется весьма вероятным, что цены на нефть и уголь будут расти в реальном исчислении быстрее, чем цены на уран и на услуги в области ядерного топлива.

Можно возразить, что, хотя существующая ситуация, возможно, является благоприятной, мало что известно о будущем. Однако, анализ возможных изменений главных факторов свидетельствует о том, что это никоим образом не затрагивает преимуществ атомной энергетики.

Существующее состояние урановых ресурсов при достоверных запасах в 2 млн. тонн и дополнительных оцененных запасах еще в 2 млн. тонн полностью покрывает нужды максимальных программ атомной энергетики вплоть до 2000 года. Разумеется, для обеспечения запасов на будущее и удовлетворения потребностей тех атомных станций, которые будут эксплуатироваться после конца века, существенно важно открытие новых месторождений. Однако существующий уровень цен привел к расширению работ по разведке урана, первые результаты которых являются весьма обнадеживающими. Поиски урана, которые ограничивались дешевыми месторождениями в избранных странах, не затронули обширные районы мира, например Латинскую Америку и Юго-Восточную Азию. Следовательно, нет причин считать, что цены на уран могут расти быстрее, чем цены на нефть.

Что касается других участков ядерного топливного цикла, то ни стоимость обогащения, где с газовой диффузией скоро будут конкурировать несколько новых процессов, ни стоимость изготовления топлива, как ожидается, не будут расти быстрее, чем общий уровень цен на промышленные товары. И, наконец, хотя трудно точно определить чистую прибыль или стоимость переработки и регенерации топлива, их влияние на полную стоимость производства электроэнергии на атомных электростанциях едва ли может быть значительным.

Естественно, в более долгосрочном плане придется добывать более дорогостоящие урановые руды, если существующие электростанции, которые используют менее 1% потенциальной энергии, содержащейся в единице массы урана, останутся основой расширения ядерных энергетических программ. Однако в настоящее время в

Таблица 8. Заказы на атомные энергетические реакторы

Годы	Число установок	Электрическая мощность (МВт (эл.))
1953-1964	27	7 914
1965	14	7 600
1966	23	17 485
1967	33	26 814
1968	18	15 273
1969	19	14 899
1970	29	25 699
1971	30	28 713
1972	49	47 344
1973	44	47 818
1974	52	53 374
1975	32	32 238
1976	20	21 700
1977	12	13 600
1978	9	8 700

основных промышленно развитых странах прилагаются усилия по разработке коммерческих реакторов-размножителей, что создает прочную основу для ядерного сектора, топливные ресурсы которого стали бы практически беспредельными. В результате это привело бы как к стократному увеличению энергии, которую можно было бы извлечь из известных урановых ресурсов, так и к экономической целесообразности добычи значительно более бедных урановых руд.

Следовательно, резкое уменьшение числа заказов на новые атомные электростанции, которое произошло в 1975-1978 годах непосредственно после нефтяного кризиса, не может быть объяснено экономическими соображениями (см. таблицу 8). Объяснение этому не может быть найдено и в технических трудностях, так как, несмотря на аварию в Гаррисберге и ее широкую огласку, атомные электростанции обладают эксплуатационными характеристиками, вполне сравнимыми с характеристиками новых угольных станций, а характеристики безопасности являются наивысшими из всех альтернативных способов производства электроэнергии.

При этих условиях объяснение существующего снижения темпов строительства следует искать в субъективных и политических факторах, которые привели к накоплению факторов неуверенности, влияющих на каждый этап сооружения и эксплуатации атомной электростанции. Еще больше неуверенности связано с ядерным топливным циклом и особенно с судьбой облученного топлива. В результате в некоторых странах были приняты решения, не имеющие ничего общего с экономичес-

кими соображениями и идущие так далеко, что по крайней мере в одном случае не было дано разрешения на ввод в эксплуатацию уже построенной и оплаченной станции.

Причины роста оппозиции атомной энергии не являются предметом настоящей статьи. Однако можно надеяться, что растущее осознание увеличивающегося дефицита углеводородов и более беспристрастное отношение к сравнительному анализу риска приведет к более рациональному подходу к оценке атомной энергетики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозы атомных мощностей должны основываться на существующих планах строительства атомных электростанций на ближайший период и на объявленных и постоянно пересматриваемых национальных целях в более долгосрочной перспективе. Последний такой прогноз недавно завершен в рамках Международной оценки ядерного топливного цикла; прогнозы по атомным мощностям на 1985 и 2000 годы, содержащиеся в таблицах 3, 4 и 5, частично основываются на ее результатах.

Можно увидеть, что к концу века, как ожидается, атомная энергетика составит 26-35% всего производства электроэнергии и 12-16% всей первичной энергии. Хотя эти цели могут показаться относительно скромными по сравнению с предыдущими прогнозами, их реализация, тем не менее, существенно облегчила бы нагрузку на ресурсы углеводородов. Производство такого количества электроэнергии на атомных электростанциях было бы эквивалентно 1,5 млрд. тонн нефти для нижнего и 2,4 млрд. тонн нефти для верхнего предела, что можно сравнить с мировой добычей нефти в 1978 году порядка 3 млрд. тонн.

Еще более важным является поддержание жизнеспособной атомной промышленности на таком уровне эксплуатации, который мог бы обеспечить продолжающееся расширение этого источника энергии. Существование такой жизнеспособной индустрии вместе с последовательным введением более совершенных атомных энергетических систем дало бы человечеству источник энергии, более зависящий от людских, чем от природных ресурсов.