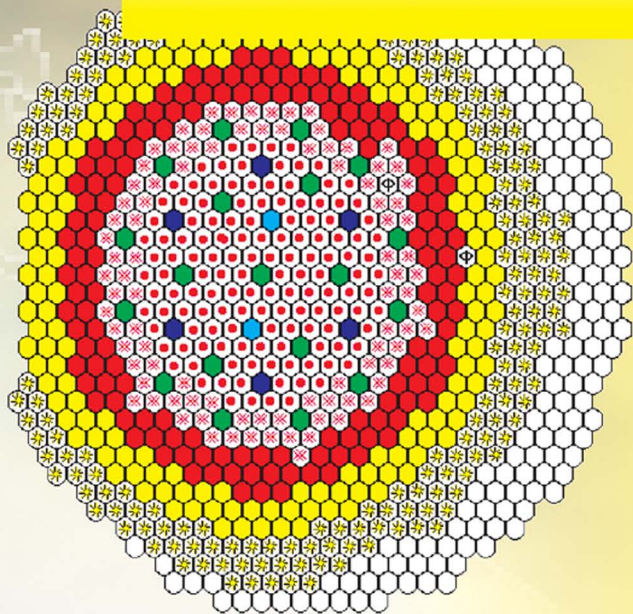




А. А. Михалевич

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

перспективы
для Беларуси



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Институт энергетики

А. А. Михалевич

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

перспективы
для Беларуси



Минск
«Беларуская навука»
2011

УДК 621.039

Михалевич, А. А. Атомная энергетика: перспективы для Беларуси / А. А. Михалевич. — Минск : Беларус. навука, 2011. — 262 с. — ISBN 978-985-08-1325-1.

В монографии представлены основные проблемы, связанные с развитием атомной энергетике: запасы топливно-энергетических ресурсов, основы безопасности атомных реакторов, обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами, экономика атомной энергетике, отношение к ней со стороны различных слоев населения и др. Некоторые разделы (например, физические основы ядерной энергетике) изложены в популярной форме.

Предназначена для специалистов в области энергетике, студентов, магистрантов и аспирантов соответствующего профиля, а также для широкого круга читателей.

Табл. 48. Ил. 56. Библиогр.: 26 назв.

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук А. Ф. Грачев,
кандидат технических наук В. Т. Казазян

ISBN 978-985-08-1325-1

© Михалевич А. А., 2011

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2009 г. в издательством «Беларуская навука» была опубликована монография А. А. Михалевича и М. В. Мясниковича «Атомная энергетика: состояние, проблемы и перспективы», весь тираж которой достаточно быстро был раскуплен. Это свидетельствует о несомненном интересе широкого круга читателей к данной проблеме.

С момента выхода этой книги произошел существенный сдвиг в сторону практического осуществления решения о строительстве АЭС в Беларуси. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 29.08.2009 г. № 1125 утверждено Соглашение между правительством Республики Беларусь и Правительством Российской Федерации о сотрудничестве в области использования атомной энергии в мирных целях. В развитие этого соглашения 15 марта 2011 г. между Россией и Беларусью подписано Межправительственное соглашение о сотрудничестве в строительстве на территории Беларуси атомной электростанции, которое предусматривает возведение российской стороной (ЗАО «Атомстройэкспорт») «под ключ» двух энергоблоков суммарной мощностью около 2400 МВт с пуском в 2017 и 2018 гг. на Островецкой площадке в Гродненской области. В межправительственном соглашении указано, что для строительства Белорусской АЭС был выбран проект «АЭС-2006», разработанный ОАО «СПб Атомэнергопроект» и отличающийся повышенными

характеристиками безопасности и технико-экономическими показателями. Кроме того, проект полностью соответствует международным нормам и рекомендациям МАГАТЭ.

Следует также отметить, что Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28.08.2009г. № 1116 была утверждена Государственная программа «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009–2010 годы и на период до 2020 года».

В предлагаемое читателям новом издании включены дополнительно результаты социологических исследований, проведенных в Республике Беларусь в 2010 г., и сравнительный анализ динамики изменения общественного мнения на основе сопоставления с предыдущими опросами.

Мировой опыт показывает, что развитие атомной энергетики в любой стране усиливает не только энергетическую безопасность, но, по-существу, создает новую высоконаучную и высокотехнологическую отрасль, которая находит широкое применение в здравоохранении, промышленности, сельском хозяйстве и т. д. Поэтому в новой книге представлена глава об использовании атомной энергии в других сферах, кроме энергетики.

И, наконец, в 2011 г. мировая атомная энергетика подверглась очень серьезному испытанию в Японии. Автор не мог не учитывать этого обстоятельства, и хотя тщательный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Fukushima Daiichi» еще далек от завершения, читателям предлагаются предварительные итоги рассмотрения этих вопросов в МАГАТЭ в главе 11 «Уроки Фукусимы».

Материалы по этим темам автору любезно предоставили В. Т. Казазян, В. А. Брылева, И. В. Котляров, М. Н. Хурс, В. И. Богданов, П. А. Михалевич и Г. З. Цапелик, которым автор выражает свою искреннюю благодарность. Автор не может не отметить с благодарностью большую роль М. В. Мясникова в качестве

Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси и ученого-экономиста в решении проблемы развития атомной энергетики в стране в целом и поддержке издания этой книги в частности.

Глава 1

ЗАЧЕМ НУЖНА АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В МИРЕ?

Вопрос о необходимости существования и дальнейшего развития атомной энергетики обсуждается давно, но до последних лет в основном на национальном уровне, т. е. каждая страна решает самостоятельно быть или не быть атомной энергетике. Здесь существуют разные подходы.

США, Франция, Япония, Россия, на долю которых приходится 57% количества атомных энергоблоков в мире, не видят вариантов развития энергетической базы экономики в своих странах, исключая атомную энергетику, по крайней мере до середины XXI в.

Австрия уже давно построила *атомную электростанцию (АЭС)*¹, но до сих пор не ввела ее в эксплуатацию. В этой стране, где, кстати, расположена штаб-квартира Международной организации по использованию атомной энергии (МАГАТЭ), существует мораторий на использование АЭС.

Некоторые страны (Италия, Польша, Беларусь и др.), которые в свое время остановили развитие атомной энергетики, объявили о целесообразности строительства АЭС.

Парламенты Германии и Швеции приняли политическое решение не сооружать новых ядерных энергоблоков и естественным путем прекратить эксплуатацию прежних после исчерпания их ресурса. Но в последние годы в этих странах возобновились субсидии на научные исследования, связанные с развитием атомной энергетики, в том числе и с продолжением эксплуатации действующих энергоблоков. Кроме того, в 2008 г. канцлер ФРГ А. Меркель

¹ Объяснение основных понятий и терминов, выделенных курсивом, приведено в конце книги.

назвала указанное политическое решение «абсолютно неправильным».

Наконец, в последние годы несколько стран заявили о своей готовности развивать атомную энергетику: Турция, Казахстан, Бангладеш, Индонезия, Таиланд, Иордания (для опреснения морской воды), даже богатейшая в мире нефтяная страна Объединенные Арабские Эмираты и др.

В начале нового столетия проблема развития атомной энергетики переходит с национального уровня на глобальный. Предотвращение всеобщего потепления климата становится мировой задачей. Одним из наиболее реальных и экономически оправданных путей ее решения на ближайшие десятилетия наряду с развитием возобновляемых источников энергии является замещение ископаемых органических энергоносителей (нефти, природного газа, угля) ядерным топливом.

Второй глобальный аспект рассматриваемой проблемы связан с неизбежным истощением ископаемых топливных ресурсов и ограниченностью доступного потенциала возобновляемых источников энергии на земном шаре. Рассмотрим эти вопросы более подробно.

1.1. Мировые энергетические ресурсы

В начале 70-х годов XX в. в советских и зарубежных изданиях вышли публикации об исчерпаемости органических энергоресурсов. Даже такое непрофильное издание, как журнал «Коммунист» — орган ЦК КПСС, поместило посвященную этой теме большую статью директора Курчатовского института академика Анатолия Петровича Александрова, будущего Президента Академии наук СССР.

Согласно этим публикациям, при сохранении текущего используемого в то время уровня потребления энергоресурсов в мире запасов нефти оставалось на 45—50 лет, природного газа — на 50—55 лет, а угля — на 130—135 лет. Картина, прямо скажем, не очень оптимистичная, а если учесть, что суммарное ежегодное потребление всех видов энергии за период с 1973 по 2005 г. увеличилось почти в 1,9 раза, то мы бы сейчас дожигали остатки угля, а от за-

пасов нефти и природного газа остались бы только воспоминания.

Тем не менее прошло десять лет, а оставшиеся запасы опять оценивались примерно теми же цифрами, хотя потребление энергоресурсов непрерывно возрастало. Примерно такая же картина повторилась снова через десять лет, правда, запасов угля стало больше — почти на 170 лет.

Попытаемся разобраться, в чем же дело.

1.1.1. Классификация ресурсов

Данные о запасах энергетических ресурсов заметно различаются как в масштабах всей планеты, так и по отдельным регионам. Это связано, во-первых, с достоверностью геологических оценок и, во-вторых, с техническими возможностями и экономической целесообразностью извлечения и использования данных ресурсов.

По степени убывания достоверности геологических оценок ресурсы классифицируют по следующим категориям (рис. 1):

- ♦ установленные (разведанные), которые подразделяют на доказанные и прогнозные (оцененные);
- ♦ неразведанные — предполагаемые (ожидаемые) и теоретические.

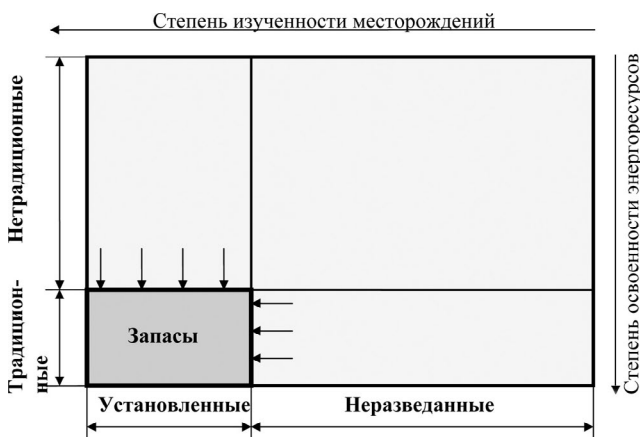


Рис. 1. Классификация энергетических ресурсов

Установленные ресурсы представляют собой месторождения, для которых известны размещение, вид, количество и качество энергоресурсов. При этом оценки могут быть сделаны в результате как прямых измерений и расчетов, так и косвенных, основанных на специфических геологических проявлениях. Незазведанные ресурсы определяются обычно по признакам аналогии геологических формаций. Кроме того, разделяют следующие виды энергетических ресурсов:

- ◆ традиционные;
- ◆ нетрадиционные.

К традиционному виду относятся месторождения, разрабатывать которые технически возможно, а также экологически и экономически целесообразно, т. е. это доступные ресурсы. Существует техника для их добычи, технологии их использования, при этом не наносится ущерба окружающей среде. Традиционными считаются *нефть, природный газ, определенные сорта угля, часть месторождений урана*.

Нетрадиционными называют такие энергоресурсы, которые подходят хотя бы под одну из перечисленных категорий: труднодоступность; неумение их использовать; их применение экономически невыгодно; их использование наносит существенный ущерб окружающей среде. К нетрадиционным нефтяным ресурсам относятся *горючие (битуминозные) сланцы, смоляные нефтеносные пески, тяжелая нефть*.

Следует отметить, что в настоящее время из традиционных месторождений извлекается только 35% нефти. Однако уже разработаны методы, с помощью которых можно добывать ее до 65%. Одним из таких методов является закачка в нефтяные пласты воды в сверхкритическом состоянии (давление в 220 раз выше атмосферного, температура более 375 °С), извлечение образовавшейся водно-нефтяной эмульсии с последующим ее разделением на нефть и воду. При этом потребуются затраты энергии, равные примерно 20% теплотворной способности добытой нефти. Оставшаяся часть нефти представляет собой вязкую массу (тяжелая нефть), промышленная добыча которой весьма затруднена.

К нетрадиционным газовым ресурсам относятся месторождения следующих энергоносителей: *метана из угольных пластов; плотного газа; кристаллогидратов газа (кластеров); геологически сжатого газа (газа с избыточным давлением из водоносных слоев)*. Иногда нетрадиционным газовым ресурсом считают оставшийся после выработки месторождения газ (степень коммерческого извлечения в настоящее время составляет в среднем 70%), а также сверхглубокие газовые месторождения.

Совершенно иные принципы положены в основу классификации угля и ядерного топлива — урана. Традиционным энергоресурсом считается каменный уголь, при сгорании 1 кг которого выделяется 16 500 кДж (3942 ккал, или 0,56 кг *условного топлива*) и более тепловой энергии, а нетрадиционным — бурый уголь, *теплотворная способность* которого ниже этой величины.

Для ядерного топлива (урана) был принят метод, который вообще не выдерживает никакой критики с точки зрения физики. Здесь к категории традиционного ресурса относился уран, цена добычи которого была меньше 130 долл. США за 1 кг. Такой подход имел бы смысл, если бы курс доллара был стабилен, но теперь граница между традиционным и нетрадиционным ураном количественно довольно заметно меняется.

Правда, есть еще и другие виды нетрадиционного ядерного топлива: уран, растворенный в морской воде, а также содержащийся в граните, фосфатных отложенных и даже в угле. Но об этом речь пойдет ниже.

Традиционные установленные энергетические ресурсы принято называть **запасами** (в английском языке — *reserves*).

Необходимо отметить, что с развитием геологических изысканий, а также технологий добычи и использования одни категории энергоресурсов могут переходить в другие: как правило, из ресурсов в запасы. Однако бывают и противоположные явления, когда, например, после частичной разработки месторождения оставшаяся часть оказывается трудноизвлекаемой или низкосортной и поэтому экономически нерентабельной. Поэтому проведенная выше классификация является до некоторой степени условной.

1.1.2. Запасы мировых органических энергоресурсов (деловая игра)

Ниже читателю должно стать понятным, почему на протяжении последних десятилетий запасы нефти газа и угля как бы оставались неизменными, несмотря на непрерывно возрастающее их потребление. Есть такое понятие «деловая игра». Собираются несколько умных людей, которые проигрывают возможные варианты развития какого-либо процесса, например в бизнесе: «а что будет, если...»

Мы сыграем в деловую игру на тему, рассмотренную выше: **на сколько лет нам хватит органических ресурсов?** Теперь мы знаем, что есть две категории: ресурсы и запасы. Вначале рассмотрим запасы.

Прежде всего условимся о правилах игры. Ранее прогнозы исчерпаемости (на сколько лет хватит) определялись из условия, что потребление энергоресурсов не будет увеличиваться. Насколько это соответствует реальной картине?

На рис. 2 (см. цветную вклейку) показано распределение потребления в мире различных видов топлива по данным (2007 г.) Международного энергетического агентства (**International Energy Agency**). **Всего в мире потреблялось 11,4 млрд т нефтяного эквивалента** (н. э.) энергоресурсов (16,3 млрд т условного топлива). Из них доля нефти, угля и природного газа составила вместе 81%. В табл. 1 представлены запасы и динамика потребления этих видов топлива по данным Международного энерге-

Таблица 1. Запасы и динамика потребления органических ископаемых энергоносителей в мире

Энергоноситель	Потребление в 2007 г.	Рост потребления по сравнению с уровнем			Запасы*
		1973 г.	2002 г.	2006 г.	
Нефть, млрд т	3,94	1,37	1,11	1,00	174
Природный газ, трлн м ³	3,03	2,47	1,16	1,02	178
Каменный уголь, млрд т	5,54	2,48	1,44	1,03	529

* Усредненные данные из различных источников.

тического агентства, Oil & Gas Journal, Energy Information Administration и др., опубликованным в 2007—2008 гг.

Видно, что рост ежегодного потребления нефти, угля и газа за последние 5 лет был весьма значительным, но в 2007 г. рост потребления нефти практически прекратился, газа стал 2%, а угля — 3%. Учитывая современное состояние финансового рынка, можно в первом приближении допустить, что уровень потребления этих энергоносителей не сильно изменится по сравнению с 2007 г. Тогда из табл. 1 следует, что запасов нефти осталось на 44 года, природного газа — на 59 лет, угля — на 95 лет. Мы получили результат примерно такой же, как и 35 лет назад. О чем это говорит? Прежде всего о том, что истощение запасов нефти и газа компенсируется разведкой их новых месторождений. Особенно следует отметить открытия новых месторождений в морском шельфе. К сожалению, возможности геологов исследовать то, что находится под морским дном, ограничены, так как в настоящее время предельная глубина бурения составляет 3 км, а примерно половина (по площади) Мирового океана имеет большую глубину. Таким образом, большая часть поверхности земного шара еще не доступна для геологических изысканий.

Разведкой месторождений угля в последние годы занимались мало в связи с относительно большими его запасами по сравнению с нефтью и газом.

Тем не менее цифры, свидетельствующие о том, что проблема исчерпаемости запасов нефти и газа отодвигается всего лишь на полстолетия, а угля — на одно столетие, не могут не вызывать беспокойства. Означает ли это «энергетическую смерть»? **Конечно же, нет. Ведь мы посчитали только запасы**, т. е. установленные традиционные ресурсы. Оценки, несмотря на их приближенный характер, показывают, что неразведанные ресурсы нефти, газа и угля примерно равны их запасам, а ресурсы нетрадиционных нефтяных энергоносителей примерно в 7 раз превышают запасы нефти, ресурсы бурого угля — в 10 раз запасы каменного угля; больше всего нетрадиционных газовых энергоносителей — они почти в 80 раз превышают запасы природного газа.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Зачем нужна атомная энергетика в мире?	6
1.1. Мировые энергетические ресурсы	7
1.1.1. Классификация ресурсов	8
1.1.2. Запасы мировых органических энергоресурсов (деловая игра)	11
1.2. Возобновляемые источники энергии	13
1.2.1. Гидроресурсы	14
1.2.2. Биомасса	15
1.2.3. Энергия ветра	17
1.2.4. Геотермальная энергия	18
1.2.4. Энергия Мирового океана	19
1.2.5. Энергия солнечного излучения	20
1.2.6. Продолжение деловой игры	21
1.3. Роль атомной энергетики	23
1.3.1. Ядерное топливо	24
1.3.2. Воспроизводство ядерного топлива	25
1.4. Необходимость дальнейшего развития атомной энергетики	27
1.4.1. Краткая история	27
1.4.2. Современное состояние	29
1.4.3. Предпосылки развития	32
Глава 2. Зачем нужна атомная энергетика в Беларуси?	35
2.1. Потребности в энергоресурсах в Республике Беларусь	35
2.2. Топливо-энергетические ресурсы Беларуси	41
2.2.1. Ископаемые ресурсы	41
2.2.2. Возобновляемые источники	43
2.3. Энергетическая безопасность	46

2.3.1. Определение энергетической безопасности .	47
2.3.2. Угрозы энергетической безопасности государства.....	49
2.3.3. Основные направления обеспечения энергетической безопасности	50
2.4. Что может дать атомная энергетика?	54
Глава 3. Физические основы ядерной энергетики.....	57
3.1. Строение атомного ядра	57
3.2. Особенности ядерных реакций.....	59
3.3. Основные элементы и принципы работы ядерного реактора.....	63
Глава 4. Атомные электростанции.....	67
4.1. Одноконтурные АЭС с кипящими реакторами....	67
4.2. АЭС с водо-водяными реакторами под давлением	69
4.3. АЭС с реактором на быстрых нейтронах.....	73
4.4. АЭС с другими реакторами.....	75
4.5. Разработки АЭС в Беларуси.....	76
4.5.1. Передвижная атомная электростанция (ПАЭС) «Памир»	79
4.5.2. АЭС с реактором на быстрых нейтронах БРИГ-300.....	82
Глава 5. Ядерный топливный цикл и обращение с радиоактивными отходами	86
5.1. Ядерный топливный цикл.....	86
5.2. Обращение с радиоактивными отходами	90
5.2.1. Источники отходов	90
5.2.2. Радиоактивные отходы АЭС.....	90
5.3. Хранение и захоронение ОЯТ	96
5.4. Переработка ОЯТ.....	101
5.5. Трансмутация — альтернативный способ обращения с РАО.....	103
Глава 6. Атомная энергетика и окружающая среда	107
6.1. Воздействие энергоисточников на окружающую среду.....	109
6.2. Воздействие АЭС на окружающую среду.....	116

<i>Глава 7. Экономика ядерной энергетики</i>	120
7.1. Структура цены ядерного топлива	121
7.2. Прогноз изменения стоимости ядерного топлива	123
7.3. Стоимость оборудования АЭС	127
<i>Глава 8. Ядерное законодательство</i>	129
8.1. Закон «Об использовании атомной энергии»	129
8.2. Закон «О радиационной безопасности населения»	133
8.3. Госатомнадзор	137
8.4. Международные соглашения в области использования атомной энергии	139
<i>Глава 9. Атомная энергетика и общественное мнение</i>	145
9.1. Ситуация за рубежом	145
9.2. Отношение к атомной энергетике в Беларуси	147
9.3. Исследование 2010 г. и сравнительный анализ	153
9.3.1. Оценка эффективности работы и перспектив развития энергетической отрасли	153
9.3.2. Оценка перспектив использования различных источников для развития энергетики страны	162
9.3.3. Отношение к атомной энергетике	165
<i>Глава 10. Использование атомной энергии в других сферах, кроме энергетики</i>	181
10.1. Использование радиоактивных изотопов и радиационных технологий	181
10.1.1. Основные понятия	182
10.1.2. Здравоохранение	187
10.1.3. Промышленность, сельское хозяйство и другие отрасли	195
10.3. Реакторные методы получения радиоизотопов	202
<i>Глава 11. Уроки Фукусимы</i>	205
11.1. Хроника событий	206
11.2. Выводы и уроки Фукусимы	213
11.3. Пассивные системы безопасности	218
Словарь терминов в атомной энергетике	225
Литература	257

Научное издание

Михалевич Александр Александрович

**АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА:
ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ БЕЛАРУСИ**

Редактор *Г. В. Малахова*

Художественный редактор *Т. Д. Царева*

Технический редактор *М. В. Савицкая*

Компьютерная верстка *Н. И. Кашуба*

Подписано в печать 28.09.2011. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,86+0,74 вкл. Уч.-изд. л. 11,6.

Тираж 200 экз. Заказ 209.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука». ЛИ № 02330/0494405 от 27.03.2009. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.