

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ XXI столетия: тенденции развития

## Часть I. Энергетические технологии производства электро- и теплоэнергии, использующие невозобновляемые энергоресурсы

### Прогнозные оценки будущего энерго- и электропотребления мировой экономики

Одним из главных итогов исследований, проводившихся Международным энергетическим агентством (МЭА) в последние годы, является вывод о том, что в отсутствии новой, инновационной стратегии развития мировой экономики ее потребность в энергии к 2050 году может более чем удвоиться по сравнению с уровнем 2005 года, что также будет сопровождаться соответствующим ростом выбросов CO<sub>2</sub> в глобальную атмосферу, чрезмерная концентрация которых может привести к опасным и необратимым изменениям в окружающей среде обитания человечества [1]. Поэтому **единственной стратегией сохранения устойчиво-**

**го и безопасного развития мировой экономики в XXI столетии является ее развитие, направленное на всемерное совершенствование энергетических технологий производства, транспорта, распределения и потребления энергии во всех ее формах с целью существенного повышения их энергетической и экологической эффективности.** Особая роль в реализации этой стратегии отводится **развитию энергетических технологий электроэнергетического сектора мирового ТЭК**, расширять который прогнозируется не только в анализируемом периоде до 2050 года, но и особенно в отдаленной перспективе.

В исследовании МЭА [1] рассматривались три варианта развития мировой экономики и ее ТЭК. **По базовому варианту** предполагается рост потребления электроэнергии со средним темпом 2,2% в год в период с 2005 по 2050 год, что определяет ее как наиболее растущий вид энергоресурса среди конечных потребляемых видов. Абсолютный объем потребляемой электроэнергии в этом варианте прогнозируется увеличить с 18 196 млрд кВт ч в 2005 году до 49 934 млрд кВт ч в 2050-м, то есть в 2,75 раза (рис. 1). При этом доля электричества в конечном потреблении энергии увеличится с 17% в 2005 году до 25% в 2050-м [1]. Такой бурный рост потребности в электроэнергии в мировой экономике будет обусловлен, в первую очередь, быстрым ростом населения и ростом ВВП на душу населения в развивающихся странах вслед-

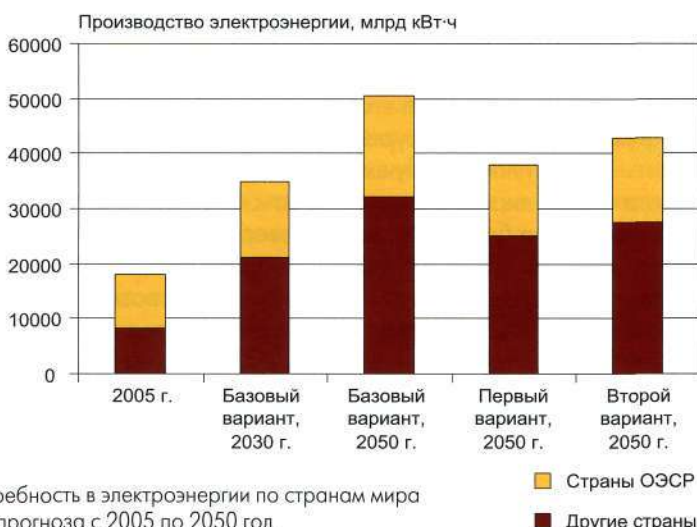


Рис. 1 [1]. Потребность в электроэнергии по странам мира по вариантам прогноза с 2005 по 2050 год

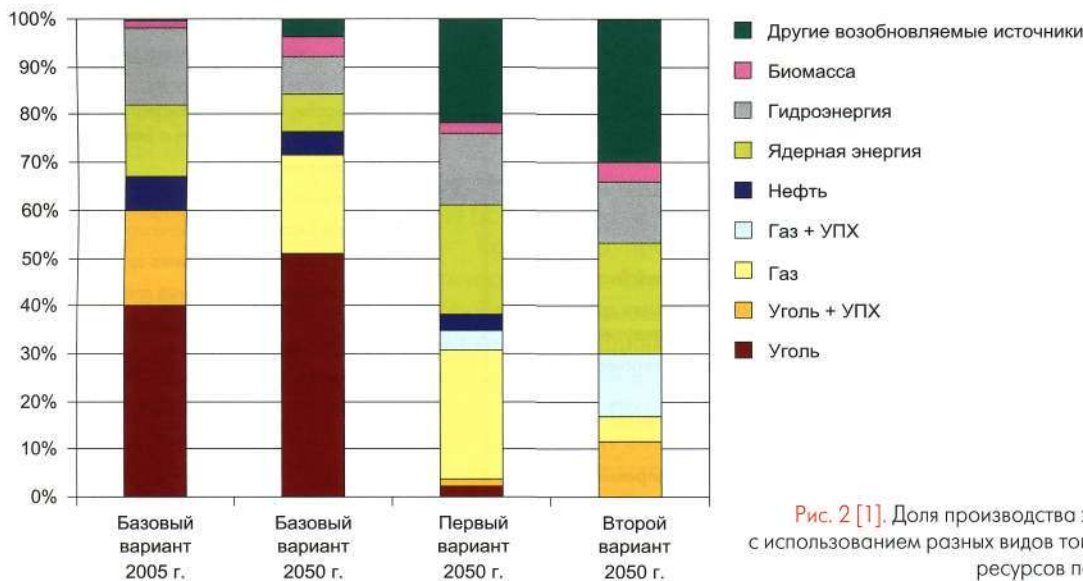


Рис. 2 [1]. Доля производства электрической энергии с использованием разных видов топливно-энергетических ресурсов по вариантам прогноза

ствие ускоренной электрификации их национальных экономик.

В первом варианте прогноза развития мировой экономики [1] темп спроса на электроэнергию снижается до 1,6% в год, что определяет абсолютную потребность в 2050 году в объеме 39 471 млрд кВт ч, то есть на 21 % ниже, чем в базовом варианте. Три четверти этого снижения будет обусловлено уменьшением электропотребления в жилищно-коммунальном секторе благодаря применению энергетически эффективных технологий электропользования.

Во втором варианте развития мировой экономики [1] (при 50%-м снижении уровня эмиссии CO<sub>2</sub> в 2050 году по сравнению с уровнем 2005 года) абсолютное потребление электроэнергии составит 42 340 млрд кВт ч в 2050 году.

Соответственно будет меняться и структура используемых первичных энергетических источников для производства электроэнергии в направлении увеличения доли новых, возобновляемых видов (рис. 2), что, в свою очередь, потребует совершенствования технологий транспорта и управления потоками энергии в объединенных электроэнергетических системах, а также развития и широкого применения технологий улавливания, поглощения и хранения (УПХ) эмиссий парниковых газов.

По мнению Нобелевского лауреата по химии Ричарда Смолли, к 2050 году «человечество должно прекратить совершенно бессмысленную транспортировку огромных масс топлива (угля, нефти, природного газа и т.д.) по всей планете, следует научиться передавать энергию именно в виде

«энергии», то есть электроэнергии. Для этого нужно, прежде всего, создать нечто вроде глобального «хранилища» энергии в виде сетки или «паутины» (из сотен миллионов соединенных друг с другом энергетических сайтов), позволяющей наиболее эффективным образом перераспределять потоки электрической энергии» [2].

Принципиально важным для создания и надежного функционирования такой глобальной электрической сети является решение проблемы хранения электроэнергии в узлах ее потребления, особенно при выработке электроэнергии на солнечных электростанциях (СЭС) и на электростанциях, использующих энергию ветра (ВЭС).

Существующие в настоящее время устройства хранения электроэнергии не позволяют их использовать в широких промышленных масштабах из-за высокой стоимости и громоздкости (даже самые современные свинцовые аккумуляторы мощности 1000 кВт занимают несколько десятков квадратных метров и стоят около 10 тысяч долларов США)\*. Однако благодаря достижениям в нанотехнологиях уже в близком будущем можно ожидать появления на рынке конденсаторов такой же мощности, имеющих размеры небольшой стиральной машины, стоимостью лишь около 1000 долларов [2]. Почти наверняка следующее поколение устройств хранения энергии будет создано на основе нанотехнологической модификации поверхностей, наноразмерных частиц катализаторов и других элементов. Именно в энергетике (и особенно в решении проблем хранения энергии)

\* Здесь и далее все цены указаны в долларах США за 2005 год.

### Новые технологии производства энергии

- Тепловые электростанции (ТЭС), использующие ископаемые виды топлива, оборудованные УПХ-технологиями.
- Атомные электростанции нового поколения.
- Ландшафтные и прибрежные ВЭС.
- Интегрированные комбинированные энергоустановки (ИКУ) с газификацией биомассы.
- Солнечные фотоэлектрические системы и другие установки прямого преобразования энергии (СФЭС).
- Концентрированные солнечные энергетические станции (КСЭС).
- Интегрированные комбинированные энергоустановки с газификацией угля.
- ТЭС с оборудованием на сверх- и ультравысокие параметры пара.
- Энергетические установки с использованием биотоплива второго поколения.

### Новые технологии потребления энергии

- Энергосберегающие технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве и энергопотреблении.
- Тепловые насосы.
- Солнечные водо- и воздушонагреватели.
- Энергосберегающие транспортные технологии.
- Электрические и гибридные транспортные средства.
- Водородные транспортные средства.
- Использование УПХ-технологий, переход на водород и диверсификация топлива.
- Внедрение промышленных электродвигательных систем.

конструкторских и демонстрационных разработок.

Для реализации указанных выше стратегических задач развития мирового ТЭК не менее масштабные проблемы предстоит решить и в развитии новых технологий производства и использования энергии, особенно тех из них, которые основаны на применении новых (ядерной и водородной энергии) и возобновляемых источников энергии (солнца, ветра, биомассы и др.).

Эксперты МЭА провели тщательный анализ потенциала всех видов энергетических технологий, находящихся в стадии разработки или демонстрационных испытаний, и определили «дорожные карты» новых ключевых энергетических тех-

Рис. 3 [1]. Новые ключевые энергетические технологии XXI века

нанотехнологии могут проявить свою исключительную эффективность [2].

Массовое использование нанотехнологических устройств передачи и хранения энергии наряду с устройствами сверхпроводимости кардинальным образом может изменить инфраструктуру электроэнергетических систем и существенно повысить их устойчивость и надежность работы. Однако для этого требуется проведение серьезных научных исследований и опытно-

Рис. 4 [1]. Схема функционирования инновационной системы





нологий (рис. 3), развитие которых наряду с высокоэффективными существующими технологиями способно обеспечить устойчивое, безопасное и эффективное развитие глобальной мировой энергетики в долгосрочной перспективе при условии широкого международного сотрудничества и поддержки мирового делового сообщества [1].

Как видно из рис. 3, количество новых энергетических технологий, разделенных на группы производства и потребления энергии, примерно одинаково. При этом выбор ключевых энергетических технологий осуществлялся из более ста видов технологий только производства энергии и был, прежде всего, подчинен приоритетным целям развития мировой энергетики в XXI столетии — обеспечить ее эффективное и эколо-

гически безопасное развитие и, в частности, сохранить на уровне 2005 года выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу (первый вариант прогноза) или снизить их на 50% в 2050 году (второй вариант прогноза), а также допустить возможное потепление планеты не более чем на 2-3 °С.

Кроме того, при выборе новых энергетических технологий, включенных в список ключевых, учитывалось, что они находятся на разных стадиях инновационного развития (рис. 4), и в случае предполагаемого ввода этих технологий в эксплуатацию в период между 2015 годом и 2030-м могут быть решены поставленные целевые задачи развития мировой энергетики.

При включении энергетических технологий в перечень ключевых также принималась во внимание и возможность их исполь-

**Таблица 1 [1]**

**Объемы снижения эмиссий CO<sub>2</sub> и финансовых затрат на инновационное развитие и промышленное освоение ключевых энергетических технологий по вариантам прогноза**

Сектор мировой экономики и вид энергетической технологии	Объемы экономии эмиссий CO <sub>2</sub> , Гт		Затраты на ИРК и ПО, млрд долл. США	
	Первый вариант	Второй вариант	Первый вариант	Второй вариант
<b>Энергетический сектор</b>	<b>8,96</b>	<b>15,13</b>	<b>3200-3760</b>	<b>3860-4470</b>
ТЭС, использующие ископаемые виды топлива с УПХ-технологиями	2,89	4,85	700-800	1300-1500
АЭС	2,00	2,80	600-750	650-750
ВЭС (ландшафтные и прибрежные)	1,30	2,14	600-700	600-700
ИКУ с газификацией биомассы	0,22	1,45	100-120	110-130
СФЭС	0,67	1,32	200-240	200-240
КСЭС	0,56	1,19	300-350	300-350
ИКУ с газификацией угля	0,66	0,69	350-400	350-400
ТЭС с оборудованием на ультра-высокие параметры пара	0,66	0,69	350-400	350-400
<b>Жилищно-коммунальный сектор</b>	<b>6,98</b>	<b>8,24</b>	<b>320-400</b>	<b>340-420</b>
Энергосберегающие технологии в ЖКХ	6,50	7,00	Н/д	Н/д
Тепловые насосы	0,27	0,77	70-100	90-120
Солнечные водо- и воздухонагреватели	0,21	0,47	250-300	250-300
<b>Транспорт</b>	<b>8,20</b>	<b>12,52</b>	<b>260-310</b>	<b>7600-9220</b>
Энергосберегающие транспортные технологии	5,97	6,57	Н/д	Н/д
Энергетические установки с использованием биотоплива второго поколения	1,77	2,16	90-100	100-120
Электрические и гибридные транспортные средства	0,44	2,00	170-200	4000-4600
Водородные транспортные средства	0,00	1,79	Н/д	3500-4500
<b>Промышленность</b>	<b>3,00</b>	<b>5,68</b>	<b>700-900</b>	<b>1400-1700</b>
Использование УПХ-технологий, переход на водород и диверсификация топлива	2,00	4,28	700-900	1400-1700
Внедрение промышленных электродвигательных систем	1,00	1,40	Н/д	Н/д
<b>Всего</b>	<b>27,14</b>	<b>41,57</b>	<b>4480-5370</b>	<b>13 200-15 810</b>
<b>На тонну экономии CO<sub>2</sub></b>	—	—	<b>165,1-197,9</b>	<b>317,5-380,3</b>

Таблица 2 [1]

**Инвестиции на НИОКР и коммерциализацию паротурбинных ТЭС со сверх- и ультракритическими параметрами пара в течение 2005–2050 годов**

Регионы	Доля новых ТЭС по регионам в 2025 г., %	Инвестиции на НИОКР в 2005–2025 гг., млрд долл. США	Инвестиции на коммерциализацию новых ТЭС в 2005–2025 гг., млрд долл. США
ОЭСР страны Северной Америки	40,0	145–155	100–110
ОЭСР страны Европы	25,0	90–100	30–40
ОЭСР страны Тихоокеании	20,0	70–80	30–40
Китай и Индия	15,0	50–60	120–130
Другие	0,0	0,0	50–55

зования как на глобальном, так и на региональных энергетических рынках.

Реализация окончательных стадий инновационного развития ключевых энерготехнологий, промышленное освоение и их коммерциализация, сопровождающиеся громадными финансовыми затратами (табл. 1), требуют широкого международного сотрудничества для реализации задач «дорожных карт» развития конкретных энергетических технологий, их финансирования, обмена информацией, трансфера технологий\* и других действий.

Из табл. 1 видно, что сохранение эмиссий CO<sub>2</sub> в 2050 году в мире на уровне 2005 года потребует не менее 165–200 долл./т эмиссий, а их снижение на 50% по сравнению с уровнем эмиссий 2005 года — 320–380 долл./т соответственно (второй вариант прогноза), учитывая только затраты на создание новых энергетических технологий.

В прогнозе МЭА [1] «дорожные карты» разработаны для каждого вида новых энергетических технологий и предназначены для оценки соответствия их параметров целевым ориентирам развития мировой энергетики, а также для выявления конкретных мер научного, технического, финансового и коммерческого характера, которые необходимо принять для каждого вида ключевых энергетических технологий с целью их коммерциализации и последующего продвижения на региональные энергетические рынки. Более подробно это рассматривается на примере «дорожной карты» инновационного развития ТЭС с паротурбинным оборудованием со сверх- и ультракритическими параметрами пара.

По прогнозу МЭА [1] к 2050 году в мировой экономике предполагается сократить выбросы CO<sub>2</sub> в объемах 0,66 и 0,69 Гт соответственно в первом и во втором его вариантах по сравнению с уровнем эмиссий CO<sub>2</sub> 2005 года только за счет инновационного развития и ввода в промышленную эксплуатацию паротурбинных ТЭС со сверх- и ультракритическими параметрами пара в разных регионах мира (табл. 2).

Для реализации поставленных стратегических целей планируется решить следующие технологические задачи (табл. 3) по последовательным стадиям их инновационной цепи в течение прогнозируемого периода (рис. 5).

Анализ технических возможностей решения указанных в табл. 3 технологических задач позволил определить следующие необходимые для этого первоочередные меры в развитии фундаментальных и прикладных исследований, а также опытно-конструкторских работ и организационных мероприятий:

- производство новых дешевых материалов для условий использования пара сверхвысоких температур, что может быть обеспечено применением нанотехнологий и новых сплавов;
- изготовление труб из высокотемпературных сплавов (включая сварку);
- разработка методов быстрого тестирования высокопрочных и высокотемпературных материалов;
- развитие технологий обогащения топлива кислородом для применения УГХ-технологий;
- разработка теории динамики режимов обогащения топлива кислородом;
- создание стимулов для производственной инфраструктуры, способной обеспечить будущий спрос на соответствующие новые материалы, оборудование и технологии.

\* Под трансфером технологий в [1] понимается процесс трансформации бизнесом научных результатов исследовательских центров в полезные продукты, а не межграничная передача технологий — определение, часто используемое в экономической литературе при передаче технологий одной страны другим.

**Перечень технологических задач для инновационного развития, ввода в эксплуатацию и коммерциализацию паротурбинных ТЭС со сверх- и сверхкритическими параметрами пара по двум вариантам прогноза**

Технологические задачи по стадиям инновационной цепи	Вариант 1: стабилизация эмиссий CO <sub>2</sub> к 2050 г.	Вариант 2: снижение эмиссий CO <sub>2</sub> на 50% к 2050 г.
<b>Научно-исследовательские исследования и опытно-конструкторские разработки</b>		
Проведение научно-исследовательских работ и конструкторских разработок 10 пилотных ТЭС с параметрами пара 700 °С	К 2020 г.	Не предусматривается
Ввод в эксплуатацию 10 ТЭС мощностью 100 МВт с использованием топлива, обогащенного кислородом	К 2025 г.	К 2020 г.
Использование технологий предварительного подсушивания лигнитов для крупных электростанций	Широкомасштабное применение и демонстрация для других видов угля	
Разработка материалов, способных выдерживать температуры более 700 °С при давлении свыше 250 бар	Возможность разработки материалов до 2015 г. Испытания элементов будут закончены к 2020 г.	Возможность разработки материалов до 2012 г. Испытания элементов будут закончены к 2015 г.
Внедрение обогащающих технологий для высокосолевых углей	К 2020 г.	
Разработка монопередающих мембран для сепарации окислов кислорода	Достижение 50%-й эффективности к 2025 г.	Достижение 52%-й эффективности к 2025 г.
Разработка форсунок и паровых котлов для топлива, обогащенного кислородом	Пилотные испытания до 2015 г.	Пилотные испытания до 2012 г.
Строительство 10 ТЭС со сверх- и сверхкритическими параметрами пара (температура пара более 700 °С с давлением 250 бар)	Производство кислорода с электропотреблением 150 кВт ч на тонну к 2025 г.	Производство кислорода с электропотреблением 150 кВт ч на тонну к 2020 г.
<b>Продвижение</b>		
Ценовая задача	Достижение инвестиций в размере 1400 долл. США на 1 кВт мощности станций	

Также анализ «дорожной карты» для инновационного развития ТЭС с паротурбинным оборудованием на ультра- и сверхкритические параметры пара позволил опреде-

лить и основные ключевые направления для международного сотрудничества, в частности, в развитии фундаментальных исследований по созданию высокотемператур-



Рис. 5 [1]. Временная последовательность разработки технологий новых ТЭС на ультра- и сверхкритические параметры пара



ных материалов и развитию теории динамики жидкостей, а также в разработке экономически приемлемых проектов новых ТЭС на ультра- и сверхвысокие параметры пара и осуществление их пилотных испытаний.

По «дорожным картам» были выполнены соответствующие исследования и других 16 ключевых энергетических технологий XXI столетия, результаты которых позволили определить возможный перспективный статус существующих и новых энергетических технологий производства, распределения и потребления энергии, основные технико-экономические характеристики которых рассматриваются ниже более подробно.

### Технико-экономические характеристики перспективных энергетических технологий производства энергии, использующих невозобновляемые виды топлива

В настоящее время в мировом электроэнергетическом комплексе основными производителями электрической энергии являются тепловые электростанции, потребляющие в качестве топлива уголь и природный газ и производящие соответственно 40 и 20% всей потребляемой электроэнергии. В некоторых странах мира ТЭС, работающие на угле, вырабатывают существенно большую долю электроэнергии: например, в США и Германии — 50%, в Китае и Австралии — до 80%, а в Юж-

ной Африке и Польше — до 90%. Однако энергетическая и социально-экологическая эффективность ТЭС, потребляющих ископаемые виды топлива, и в частности уголь, имеет крайне низкие значения: в среднем в мире в настоящее время КПД угольных ТЭС составляет 35%, достигая на лучших из них 47% [1]. Поэтому проблема повышения энергетической и экологической эффективности ТЭС, потребляющих уголь в качестве топлива, является приоритетной для реализации стратегических целей развития мировой энергетики в прогнозируемом периоде. В первую очередь, это касается ТЭС с пылевидным сжиганием топлива (ПЖТ) с докритическими параметрами пара (с давлением до 180 барр и температурой пара 540 °С), в настоящее время составляющих до 97% общей установленной мощности угольных ТЭС мира.

Средняя энергетическая эффективность ТЭС, использующих газ в качестве топлива, в настоящее время составляет 42%. Однако, как и в угольных станциях, в них имеется достаточно высокий потенциал повышения энергетической и экологической эффективности, достигаемой, главным образом, применением комбинированного газотурбинного цикла производства электроэнергии (КГТЦ) или интегрированных комбинированных циклов с газификацией топлива (ИКЦГТ), которые с 1990 года являются предпочтительной технологией на газовых ТЭС. Энергетическая эффективность ТЭС с ИКЦГТ-технологиями достигает 60% (табл. 4), а на строя-

Таблица 4 [1]

Технико-экономические параметры разных типов ТЭС

Параметры	Тип станции/топливо/паровой цикл/параметры пара					
	ПЖТ*	ПЖТ	ПЖТ	ПЖТ	КГТЦ*	ИКЦГТ*
	Уголь	Уголь	Уголь	Уголь	Газ	Уголь
	Докритический	Типовой суперкритический	Ультрасуперкритический	Ультрасуперкритический (AD700)	Тройной форсаж давления	Тройной форсаж давления
	180 бар 540 °С 540 °С	250 бар 560 °С 560 °С	300 бар 600 °С 620 °С	350 бар 700 °С 700 °С	124 бар 566 °С 566 °С	124 бар 563 °С 563 °С
Номинальная мощность, МВт	500	500	500	500	500	500
Собственные нужды, МВт	42	42	44	43	11	67
Мощность на выходе, МВт	458	458	456	457	489	433
Номинальный КПД брутто, %	43,9	45,9	47,6	49,9	59,3	50,9
КПД нетто, %	40,2	42,0	43,4	45,6	58,1	44,1
Эмиссии, т/ч	381	364	352	335	170	321
Удельные эмиссии, т/МВт-ч	0,83	0,80	0,77	0,73	0,35	0,74

\*\* ПЖТ — пылевидное сжигание топлива (угля); КГТЦ — комбинированный газотурбинный цикл; ИКЦГТ — интегрированный комбинированный цикл с газификацией топлива.

щейся компанией «Сименс» в германской энергосистеме E. ON ТЭС с указанной усовершенствованной технологией показатель превысит 60% [1].

Повышение энергетической эффективности ТЭС приводит к существенному снижению эмиссий CO<sub>2</sub> и других парниковых газов (рис. 6).

В прогнозируемом периоде до 2050 года рост энергетической и экологической эффективности тепловых электростанций может быть достигнут применением многих новых энергетических технологий, в числе которых следует отметить: усовершенствованные паровые технологии; комбинированные газотурбинные технологии; интегрированные комбинированные технологии с газификацией топлива и когенерацию (совместное производство электро- и тепловой энергии). Среди усовершенствованных паровых циклов наиболее перспективными являются технологии с суперкритическими и ультрасуперкритическими (580 °C и выше) параметрами пара.

ТЭС с ультракритическими технологиями (с температурой пара 540 °C и выше) в настоящее время используются во многих странах, в частности в Китае, где в 2006 году было установлено более чем 18 ГВт мощности станций с паровыми агрегатами на суперкритические параметры пара [1]. Тепловые электростанции с ультрасуперкритическими параметрами пара эксплуатируются в Японии, Дании и Германии. ТЭС с ультрасуперкритическими параметрами пара 700 °C и выше сегодня находятся в стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских исследований, в частности проект AD 700 в Германии, возможные технико-экономические параметры которого также приведены в табл. 4. По мнению экспертов, для промышленного производства этой новейшей технологии требуются суперсплавы на никелевой основе для паровых котлов и турбин наподобие тех, которые используются в газовых турбинах.

В общем случае переход от суперкритических параметров пара на ТЭС к ультрасуперкритическим приводит к повышению их энергетической эффективности на 4%, что позволяет обеспечивать КПД станций в диапазоне от 50 до 55% [1]. При этом общие инвестиции в строительство ТЭС с оборудованием на ультрасуперкритические параметры пара увеличиваются на 12-15%, однако не снижается их конкурентоспособность, поскольку благодаря существенной экономии топлива общие

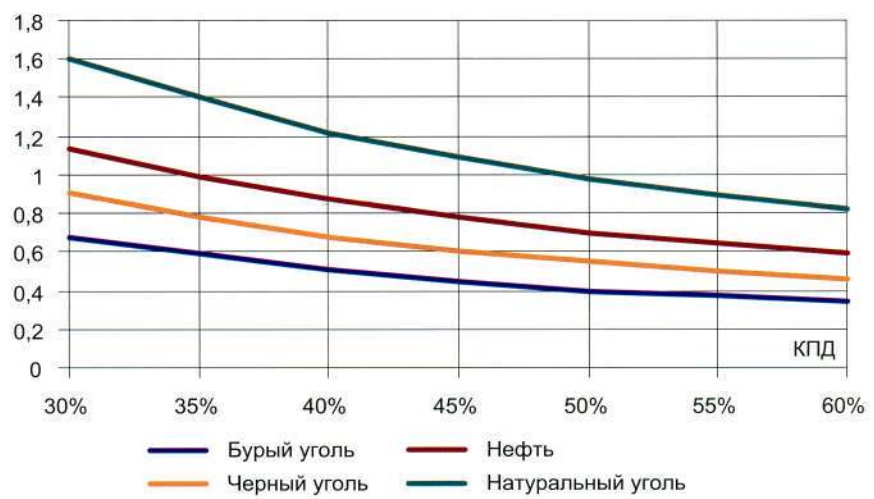


Рис. 6 [1]. Зависимость между энергетической эффективностью (КПД) и уровнем эмиссий CO<sub>2</sub> ТЭС, использующих разные виды топлива

издержки, связанные с их эксплуатацией, уменьшаются на 13-16%, несмотря на то, что стоимость отдельных агрегатов и турбин увеличивается на 40-50% по сравнению с оборудованием на ультравысокие параметры пара.

Главными препятствиями на пути к широкому применению в мировой энергетике ТЭС на суперкритические и ультрасуперкритические параметры пара являются проблемы с получением новых металлов для труб теплообменников котлов и отработка систем управления и контроля режимов нового оборудования, чтобы обеспечить его устойчивость и гибкость в эксплуатации.

Определенные преимущества в энергетической и экологической эффективности ТЭС связываются также с расширением новых, но уже отработанных технологий сжигания топлива в кипящем и вихревом состояниях.

Основными преимуществами комбинированных газотурбинных технологий являются:

- более высокая энергетическая эффективность, достигающая 60%;
- низкие удельные капиталовложения: от 600 до 750 долл./кВт по сравнению с 1400-2000 долл./кВт типовых угольных ТЭС;
- меньшие сроки строительства станций;
- низкие уровни эмиссий парниковых газов: примерно на 50% меньше, чем эмиссии угольных ТЭС.

Энергетическая эффективность комбинированных газотурбинных ТЭС была существенно улучшена благодаря технологическому совершенствованию газовых турбин. В перспективе она еще может быть



повышена посредством применения новых материалов, увеличения температуры сгорания газов, а также совершенствования системы охлаждения газовых турбин, что позволит снизить эмиссии CO<sub>2</sub> от 3 до 6% на каждый киловатт-час генерируемой электроэнергии. Однако дальнейшее повышение энергетической и экологической эффективности комбинированных газотурбинных технологий связано с проведением НИОКР в направлении применения новых материалов, выдерживающих более высокие температуры; использования новейшего газового цикла; применения повторного нагрева; улучшения аэродинамических характеристик; усовершенствования статора турбины, охлаждающей системы, и других.

Однако наибольшие надежды на повышение энергетической и экологической эффективности газотурбинных ТЭС связываются с применением в мировой энергетике интегрированных комбинированных технологий с газификацией топлива (ИКТГТ), имеющих следующие производственные стадии:

- генерирование топочного газа посредством частичного сжигания твердых топлив под давлением в условиях ограниченного объема воздуха или кислорода;

- изъятие твердых частиц и компонентов серы и азота;
- сжигание чистого газа в газовых турбинах для получения электроэнергии;
- направление нагретых выхлопных газов газовых турбин в парогенераторы для получения нагретого пара;
- использование нагретого пара в паровых турбинах для производства электроэнергии.

Интегрированные комбинированные технологии с газификацией топлива являются наиболее «чистыми» и высокоэффективными среди всех технологий, использующих уголь в качестве топлива. Главная особенность этих технологий заключается в возможности применения всех углеродосодержащих ресурсов, включая уголь, отходы промышленности, остаточную нефть, биомассу и твердые бытовые отходы. В настоящее время в мире в эксплуатации находятся 17 электростанций суммарной мощностью 4000 МВт, использующих технологию ИКТГТ, среди которых только пять станций работают на угле.

Чистая эффективность существующих ТЭС с установками ИКТГТ находится в диапазоне от 40 до 43% [1]. Однако применение новейших газовых турбин, разработанных, например, компанией

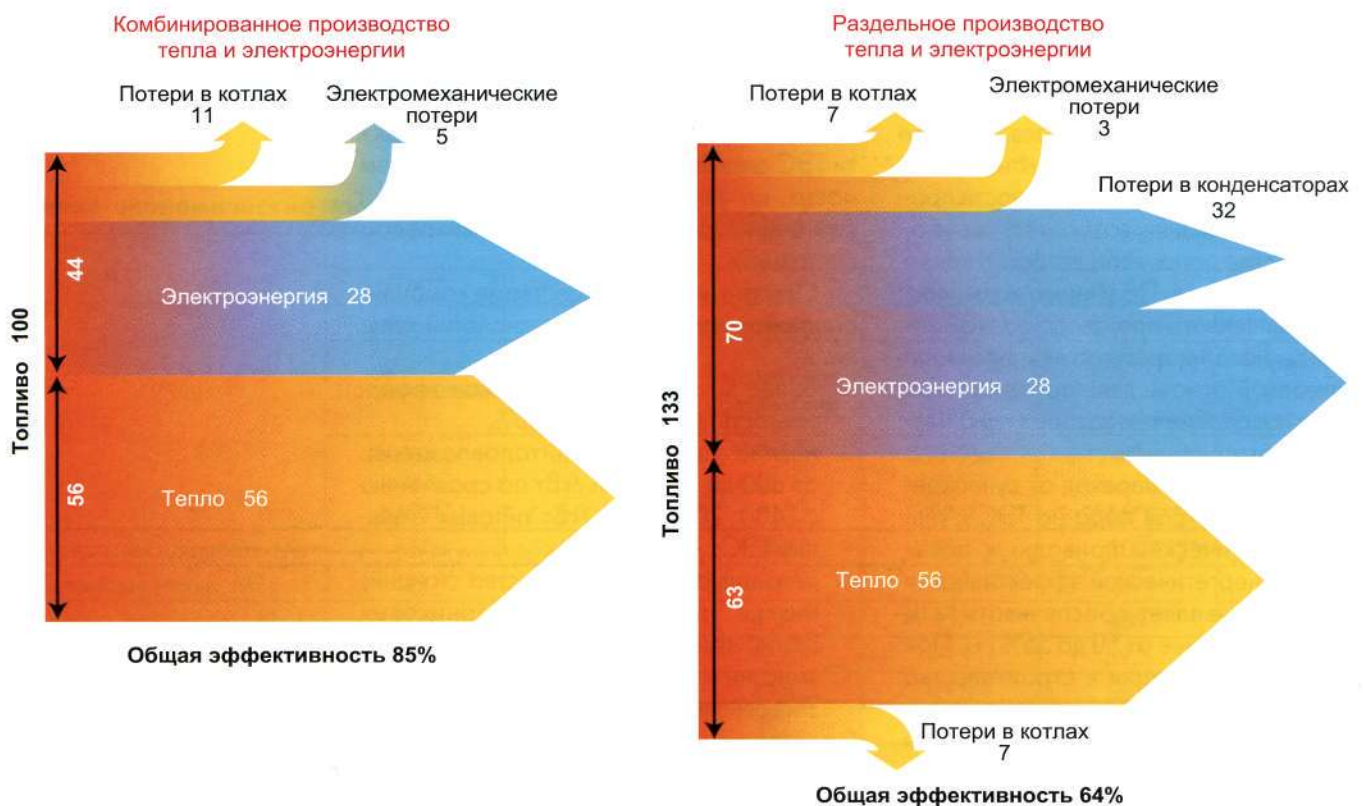


Рис. 7 [1]. Сравнение потоков энергии комбинированного (когенерация) и раздельного производства тепла и электроэнергии, %

## Перспективы развития технологий когенерации в глобальном масштабе

Параметр	2003-2015 г.	2015-2030 г.	2030-2050 г.
Стадия развития технологий	НИОКР, демонстрация, коммерциализация	Демонстрация, коммерциализация	Коммерциализация
Внутренняя норма возврата капитала, %	10	10-15	10-15
Экономия энергии, %	с 20	10-20	15-30
Сокращение эмиссий CO <sub>2</sub> , Гт/год	0-0,05	0,01-0,1	0,1-0,4

General Electric, позволяет повысить этот показатель до 50% и более.

Инвестированная стоимость ТЭС с установками ИКПТГ на 20% выше стоимости типовых станций с пылевидным сжиганием топлива. Однако исследования, проведенные в странах, где установки ИКПТГ планируются к промышленному использованию, например в Канаде, Австралии и Германии, показывают, что ТЭС второго поколения с установками ИКПТГ будут иметь примерно такие же инвестиции на их сооружение, как и станции с суперкритическими параметрами пара. Однако их конкурентоспособность в существенной степени будет зависеть от цены на газ.

ТЭС с ИКПТГ очень удобны также для установки УПХ-технологий, о которых речь пойдет несколько позже.

Дальнейшее повышение энергетической и экологической эффективности ТЭС с установками ИКПТГ может быть достигнуто посредством проведения серии НИОКР в области систем газификации, совершенствования газовых турбин, систем производства кислорода, развития газификаторов большой производительности, а также интеграции топливных элементов с использованием водорода.

Основным преимуществом **систем когенерации** является более высокая степень использования энергии, достигающая 85-90%, по сравнению с раздельным производством тепла и электроэнергии (рис. 7).

В отличие от типовых ТЭС с пылевидным сжиганием топлива на ТЭС могут использоваться все виды топлива, однако предпочтительными для них являются природный газ и уголь.

В мировой энергетике когенерация имеет весьма высокий потенциал развития. Так, только в США планируется доведение мощности крупномасштабных ТЭС до 50 ГВт. Помимо ТЭС двойного назначения широкое применение найдут ТЭС тройного назначения для производства тепла, холода и электроэнергии, в первую очередь, в пищевой промышленности.

Перспективные возможности экономии энергии и снижения эмиссий CO<sub>2</sub> в глобальном масштабе по мере развития технологий ТЭС приведены в табл. 5.

Основные направления НИОКР для совершенствования технологий когенерации сводятся к повышению входных и выходных температур газовых турбин, к разработке систем когенерации малой и средней мощности для теплоснабжения и холодоснабжения, к повышению их надежности и увеличению сроков службы оборудования посредством применения новых материалов и др.

Коммерциализация систем когенерации также требует соответствующей стимулирующей политики, направленной на регулирование тарифов отпускаемой энергии, на решение проблем выдачи их электроэнергии в объединенные энергосистемы и на привлечение соответствующих инвестиций для развития крупномасштабных систем когенерации.

Эффективность тепловых электростанций, основанных на газификации топлива, может быть повышена посредством дополнительной установки **тепловых элементов** (ТЭ), то есть электрохимических устройств, генерирующих электроэнергию и тепло, используя водород или водородообогащенное топливо совместно с кислородом из воздуха.

В настоящее время в мире производятся несколько ТЭ-систем в год. Большая часть из них представляет собой стационарные установки малой мощности, сотни предназначены для стационарных установок большой мощности, а оставшиеся несколько сотен установлены на автомобилях и автобусах для демонстрационных целей,

Общая установленная мощность 3000 стационарных установок ТЭ для производства электроэнергии составляет 50 МВт [1].

Основной системой ТЭ являются электролитные мембраны, которые производятся из различных материалов и предназначены для разных областей применения

**ФЕДОРОВ**

**Михаил Петрович** — ректор ГОУ «СПбГПУ», член-корреспондент РАН, Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1969 г. окончил ЛПИ, кафедру использования водной энергии. В 1985 г. защитил докторскую диссертацию. Область научных интересов: гидроэнергетика и охрана окружающей среды. Автор более 300 научных публикаций, в том числе 56 учебников, пособий, монографий, авторских свидетельств и патентов на изобретения. Лауреат премий Правительства РФ в области образования и Правительства Санкт-Петербурга в области технических наук. Награжден орденами «Знак Почета», «Почета», «За заслуги перед Отечеством» IV степени, медалью академика А.Н. Крылова.





## ОКОРОКОВ

**Василий Романович** — директор Международной высшей школы управления СПбГПУ.

Доктор экономических наук, профессор.

Заслуженный деятель науки РФ. Действительный член РАЕН и МЭА.

Область научных интересов: экономика и управление энергетическими системами, обеспечение их надежности и риск-менеджмент в электроэнергетике.

Автор более 30 монографий, учебников и более 400 научных статей и докладов на научно-практических конференциях.

(табл. 6). ТЭ с полимерными электролитами мембранами (ТЭПЭМ) предназначены для транспортных целей и порядка 70-80% из них — для стационарных установок малой мощности, в то время как ТЭ с фосфоритно-оксидными мембранами (ТЭФОМ) были приоритетными для стационарных установок большой мощности, однако они в настоящее время уступают этот рынок ТЭ с карбонато-плавленными мембранами (ТЭКПМ) и ТЭ с твердооксидными мембранами (ТЭТОМ). Они в основном используются в качестве пиковых и резервных источников электроэнергии. ТЭТОМ в настоящее время представляют 15-20% рынка стационарных установок, но их доля может увеличиться в будущем. ТЭ с чистометанольными мембранами (ТЭЧММ) предполагается использовать в качестве портативных установок получения электроэнергии.

Стоимость систем ТЭТОМ и ТЭКПМ мощностью 200~300 кВт колеблется от 12 тысяч до 15 тысяч долларов США на киловатт мощности, при этом стоимость самих топливных элементов составляет примерно половину этой величины. Однако крупномасштабное производство топливных элементов и технологические усовершенствования могут снизить стоимость систем с топливными элементами до 1500-1600 долл./кВт мощности, что позволит обеспечить их конкурентоспособность в течение нескольких лет, особенно для распределенных систем электроснабжения.

Одним из основных направлений повышения экологической эффективности современных и перспективных энергетических технологий является применение технологий улавливания, поглощения и хране-

ния (УПХ) эмиссий CO<sub>2</sub> при производстве энергии, ее последующей трансформации и потребления. Технологии УПХ в течение десятков лет широко используются в нефте- и газохимической промышленности, однако при промышленном производстве энергии интерес к ним возник недавно,

В настоящее время в мире существуют только четыре крупномасштабных промышленных объекта с УПХ-технологиями в Слейпнере (Норвегия) производительностью свыше 1 млн т CO<sub>2</sub> в год; в Уейбурне (Канада — США) производительностью свыше 1,7 млн т CO<sub>2</sub> в год; в Салахе (Алжир) производительностью 1 млн т CO<sub>2</sub> в год и в Снохвосте (Норвегия) производительностью 0,7 млн т CO<sub>2</sub> в год, из которых только на одном объекте (в Уейбурне) эмиссии CO<sub>2</sub> изымаются при производстве электроэнергии на ТЭС с газификацией угля, в то время как на остальных — при добыче природного газа с повышенным содержанием CO<sub>2</sub>.

Технологический процесс улавливания, поглощения и хранения эмиссий CO<sub>2</sub> состоит из трех возможных вариантов (рис. 8):

- 1) улавливание CO<sub>2</sub> из уходящих газов при низком давлении, в которых концентрация CO<sub>2</sub> находится в пределах от 2 до 25%;
- 2) поглощение CO<sub>2</sub> из топлива до его сжигания;
- 3) обогащение топлива в процессе его сгорания в парогенераторах воздухом или кислородом, что позволяет улавливать до 95% углекислого газа.

Большая часть стоимости проектов применения УПХ-технологий составляет собственно стоимость самих техноло-

Таблица 6 [1]

### Параметры и области применения разных типов топливных элементов

Параметры	Типы			
	ТЭПЭМ	ТЭТОМ	ТЭКПМ	ТЭЧММ
Рабочая температура, °С	80-150	800-1000	>650	80-100
Топливо	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , гидрокарбонаты	Природный газ и другие карбонаты	Метанол
Эффективность производства электроэнергии	35-40	<45	44-50	15-30
Области применения	Транспорт, стационарные установки	Стационарные установки	Стационарные установки	Портативные установки
<b>Срок службы, часы</b>				
Транспорт	2000	6000	8000	Н/д
Стационарные установки	30 000	20 000	20 000	Н/д
<b>Целевой срок службы, часы</b>				
Транспорт	4000	40 000	40 000	Н/д
Стационарные установки	25 000	60 000	60 000	Н/д



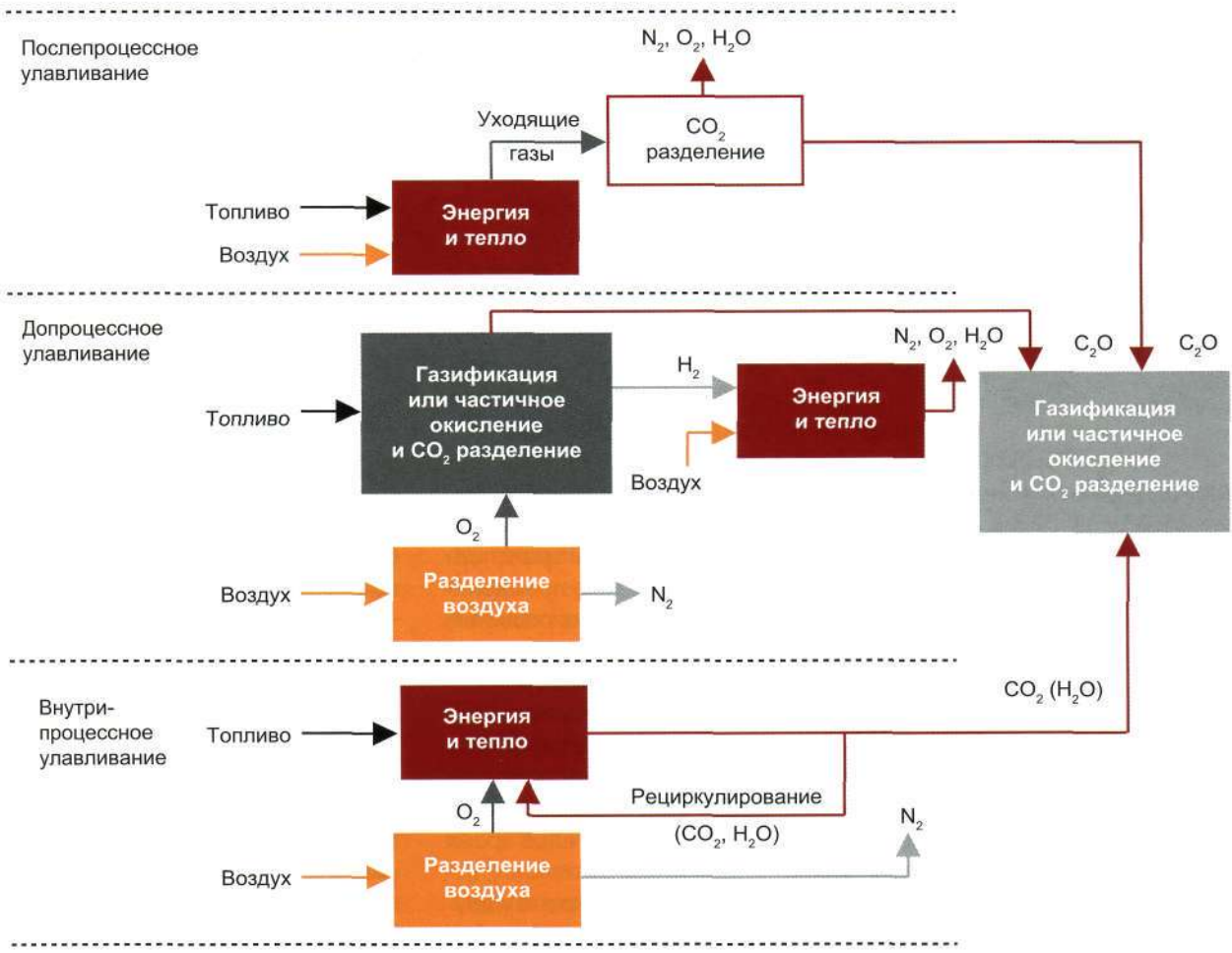


Рис. 8 [1]. Возможные варианты улавливания, поглощения и хранения CO<sub>2</sub> на ТЭС и в других промышленных процессах

гий улавливания и поглощения CO<sub>2</sub>. Она колеблется в диапазоне от 40 до 90 долларов США на 1 т сокращения эмиссий CO<sub>2</sub> и зависит от вида топлива и технологий производства энергии на тепловых электростанциях. Для наиболее эффективных ТЭС эта стоимость может составлять от 25 до 50 долларов на 1 т сокращения эмиссий CO<sub>2</sub>, к которой добавляется около 10 долл./т, что связано с транспортом и хранением CO<sub>2</sub> [1].

При использовании УПХ-технологий стоимость производства электроэнергии на новых ТЭС, использующих натуральный газ или каменный уголь, возрастает на 0,02-0,04 доллара США на 1 кВт ч производимой электроэнергии. Однако вследс-

твие применения многих инноваций, являющихся результатом проводимых НИОКР, эта дополнительная стоимость может снизиться до 0,01-0,03 долл./кВт-ч электроэнергии [1].

По прогнозу МЭА [1] к 2050 году при цене 50 долларов на 1 т сокращения эмиссий в мире может быть захоронено только 5 Гт эмиссий CO<sub>2</sub> в год (или около 100 Гт за период 2006-2050 годов) с помощью УПХ-технологий, причем 68% приходится на электроэнергетический сектор, что существенно меньше потенциально возможных емкостей захоронения эмиссий CO<sub>2</sub> (табл. 7). Поэтому необходимо ускоренное осуществление соответствующих НИОКР, общественное признание УПХ-технологий

Таблица 7 [3]  
Потенциально возможные емкости для хранения CO<sub>2</sub> в мире, Гт

Оценка	Глубокие формации	Отработанные нефтяные и газовые поля	Отработанные угольные пустоты
Минимальная	1 000	600	3
Максимальная	>10 000	1 200	200

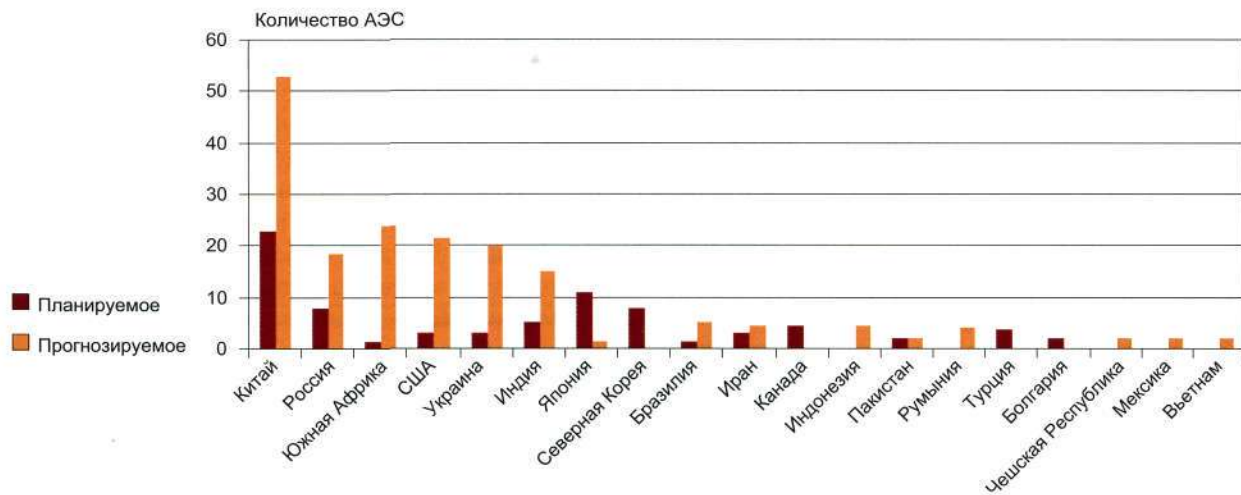


Рис. 9 [1]. Планируемое и прогнозируемое строительство АЭС по 19 странам мира

и развитие широкомасштабной транспортной инфраструктуры, а также преодоление многих барьеров на пути их развития, в частности правовых и регулирующих, коммерческих и финансовых, международных и технических, которые по прогнозу МЭА будут сняты в период между 2040—2050 годами [1].

Третьими по объему производимой электроэнергии в мире в настоящее время являются **атомные (ядерные) технологии**, использующие ядерную энергию урана и других радиоактивных ресурсов.

В августе 2007 года в эксплуатации находилось 428 ядерных реакторов в 30 странах мира общей мощностью 372 ГВт. Суммарная выработка АЭС составила в 2006 году 2700 ТВт·ч электроэнергии, или 16% общемировой выработки [1].

Кроме этого в 19 странах мира планируется или прогнозируется в будущем строительство от одной АЭС (Болгария, Чехия, Мексика и Вьетнам) до нескольких (США, Россия и другие страны), рис. 9.

При этом под планируемым понимается состояние, когда имеются разрешение и источники финансирования, а под прогнозируемым — только намерение строить

без соответствующего разрешения и источников финансирования.

**Отличительной особенностью АЭС** от обычных тепловых электростанций является отсутствие эмиссии CO<sub>2</sub> при выработке энергии, что определяет их весьма важную роль в декарбонизации мировой электроэнергетики. По прогнозу МЭА к 2050 году суммарная выработка АЭС может составить около 10 000 ТВт·ч в год, что позволит уменьшить эмиссии CO<sub>2</sub> на 6% [1]. Однако для этого потребуется ежегодно вводить 30 ГВт мощности АЭС в период с 2006 года по 2050-й.

**Ядерные реакторы** различаются по энергии нейтронов (тепловые или быстрые), по виду охладителя (вода, газ или жидкий металл), по типу замедлителя (легкая вода, тяжелая вода и графит) и по поколению реакторов. Реакторы поколения I были разработаны в 50-60-х годах прошлого столетия, из которых только несколько в настоящее время находятся в эксплуатации. Большое число реакторов поколения II были построены в 70-х годах в качестве оборудования крупных коммерческих АЭС, большинство из которых в настоящее время находятся в эксплуатации, часто с лицензиями на продление физического срока службы (как правило, до 60 лет). Реакторы поколения III были разработаны в 1990-х годах на основе новых технологических изменений, что позволило увеличить их безопасность и повысить экономическую эффективность. Реакторы поколения III+ отличаются новыми эволюционными и революционными изменениями их конструкционного дизайна. Следующее поколение реакторов IV будет отличаться повышенной безопасностью и экономической конкурентоспособностью

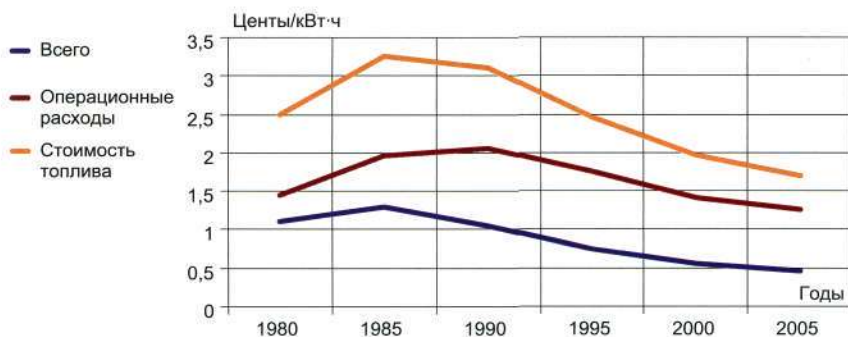


Рис. 10 [1]. Динамика стоимости производства электроэнергии на АЭС США

тью, а также минимальными рисками для окружающей среды, связанными с хранением радиоактивных отходов.

82% АЭС мира используют в настоящее время обычную воду в качестве замедлителя и охладителя. Другие водоохлаждающие реакторы, преимущественно в Канаде и Индии, используют тяжелую воду также в качестве замедлителя и охладителя. Газоохлаждающие реакторы используют окись углерода в качестве охладителя.

Возможность масштабного производства электроэнергии на АЭС зависит от запасов урана. При существующей потребности всех АЭС мира в 67 тысячах т урана (2004) известные его запасы (4,7 млн т) достаточны для работы АЭС в течение 85 лет. Однако по оценке геологов в мире имеется еще порядка 10 млн т дополнительных ресурсов урана, что удлинит обеспеченность работы АЭС с 85 до 270 лет [1]. Однако применение быстрых реакторов-бридеров позволяет использовать АЭС для производства энергии в мировом масштабе в течение практически неограниченного времени.

В последние годы в мире происходит переоценка роли АЭС по следующим причинам. Во-первых, разработка новых проектов АЭС, а также практический опыт эксплуатации их существующих типов показывают, что стоимость производства электроэнергии на АЭС вполне конкурентоспособна со стоимостью энергии, вырабатываемой на ТЭС, использующих в качестве топлива уголь и природный газ (рис. 10). Во-вторых, вследствие доступности урана и меньшей доли его стоимости в себестоимости вырабатываемой электроэнергии АЭС менее зависимы от колебаний цены на уран, чем ТЭС, использующие ископаемые виды топлива. В-третьих, появились новые, более надежные прототипы ядерных реакторов, что изменило негативное общественное мнение относительно их социальной опасности. И наконец, не последнюю роль играет осознание факта, что АЭС являются важным фактором обеспечения региональ-

ной, национальной и глобальной энергетической безопасности.

Вследствие этих причин в прогнозах МЭА доля производства электроэнергии на АЭС колеблется, как минимум, от 18 до 30% [1], при этом более широкое применение могут получить усовершенствованные реакторы третьего поколения, уже работающие в Японии и сооружаемые в Европе, а также реакторы малой и средней мощности, применяемые для локального теплоснабжения, опреснения воды и других промышленных нужд.

Новой тенденцией в развитии АЭС является строительство станций малой и средней мощности преимущественно в развивающихся странах, в которых отсутствуют централизованное электроснабжение на больших территориях, а также применение АЭС для производства водорода и опреснения воды.

Однако широкое использование АЭС как важных источников энергии для будущего экономического развития может сдерживаться отсутствием геологически надежных мест для захоронения высокотоксичных отходов АЭС.

В заключение данного исследования следует подчеркнуть, что технологический потенциал энергетических технологий, использующих традиционные, невозобновляемые энергетические ресурсы, еще не исчерпан полностью и новые их виды с улучшенными технико-экономическими характеристиками могут по-прежнему играть ведущую роль в удовлетворении спроса мировой экономики в энергии в прогнозируемом периоде ее развития. Однако постепенное истощение запасов традиционных невозобновляемых энергетических ресурсов и, главным образом, высокие социально-экологические последствия их применения (изменение климата и рост затрат на их добычу) снижают их конкурентоспособность по сравнению с нетрадиционными энергетическими технологиями, использующими возобновляемые энергетические ресурсы, запасы которых в природе практически неограниченны.



## ОКОРОКОВ

**Роман Васильевич** — профессор кафедры «Экономика и менеджмент в энергетике и природопользовании» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ). Доктор экономических наук, профессор. Родился в 1967 г. в Ленинграде. Область научных интересов: управление технологической и финансовой устойчивостью и безопасностью энергетических систем и их моделирование. Автор 7 монографий и более 70 научных статей и докладов на научных конференциях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050. OECD/ IEA, Paris, 2008. 644 p.p.
2. Смолли Р. Нанотехнологии и глобальная энергетика // Фостер Л. Нанотехнологии: наука, инновации и возможности М.: Техносфера, 2008. 352 с.

М. П. Федоров, В. Р. Окороков, Р. В. Окороков

Продолжение статьи читайте в следующем номере