

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ  
ЭНЕРГЕТИКИ

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ  
ТРАНСФОРМАЦИИ МИРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЫНКОВ<sup>1</sup>

© 2017 г. А. А. Макаров, Т. А. Митрова, Ф. В. Веселов\*, А. А. Галкина\*\*, В. А. Кулагин\*\*\*

*Институт энергетических исследований РАН, 117186, Россия, Москва, Нагорная ул., д. 31, корп. 2*

*\*e-mail: info@eriras.ru*

*\*\*e-mail: anne.galkina@gmail.com*

*\*\*\*e-mail: vakulagin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.02.2017 г.

Принята в печать 15.03.2017 г.

Представлен сценарный прогноз эволюции в период до 2040 г. мировых энергетических рынков, разработанный на модельно-информационном комплексе SCANNER. Рассмотрены перспективы развития важных для электроэнергетики топливных рынков с прогнозами спроса, производства и цен нефти, газа, угля и неуглеродных ресурсов по регионам мира. Прогнозируемое замедление роста мирового спроса на ископаемые топлива и достаточность их ресурсов с относительно низкими затратами на добычу удержат цены топлива (здесь и далее по тексту данные приводятся в ценах 2014 г.) ниже пика их значений в 2012 г. Показан опережающий рост спроса на электроэнергию по сравнению с другими энергоресурсами по регионам и крупным странам мира. Исследованы условия межтопливной конкуренции в электроэнергетике с учетом изменения прогнозных цен топлива и стоимостных показателей разных технологий электрогенерации. Для этого оценены соотношения дисконтированных затрат на производство электроэнергии новыми газовыми и угольными ТЭС, ветровыми и солнечными электростанциями. Показано, что учет системных эффектов [режимов работы, необходимого дублирования и резервирования мощности электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ)] заметно ухудшает конкурентоспособность возобновляемой энергетики и далеко не всегда компенсируется ожидаемым снижением ее капиталоемкости и ростом цен топлива для ТЭС. Но даже при сдержанном (относительно других прогнозов) росте роли электростанций на ВИЭ выработка электроэнергии на них в мире утроится. При этом тепловые электростанции сохраняют свою ведущую роль, обеспечивая до 60% мирового производства электроэнергии, в том числе около половины — за счет использования газа.

*Ключевые слова:* электроэнергия, газ, уголь, возобновляемые источники энергии, энергопотребление, добыча топлива, рынки топлива, межтопливная конкуренция, общественная эффективность, стоимость производства электроэнергии

**DOI:** 10.1134/S0040363617100083

Мировой прогноз развития энергетических рынков, включая производство и потребление всех видов топлива для 94 стран мира, выполнен ИНЭИ РАН с использованием своего модельного комплекса SCANNER [1, 2] по благоприятному, вероятному и критическому сценариям. В благоприятном сценарии ожидаются достаточно высокие (3.4% за 2014–2040 гг.) темпы роста мировой экономики, успешная реализация заявленных целей национальных энергополитик, отсутствие геополитических конфликтов и свободный трансфер технологий между странами. В вероятном сценарии экономический рост сдержанный (2.9% за 2014–2040 гг.), цели национальных энергополитик реализуются неполно, ограничен трансфер технологий. Критический сценарий показывает

негативные последствия реализации различных экономических и геополитических рисков при отсутствии глобального трансфера технологий. Прогноз спроса по видам энергоресурсов, построенный на основе анализа национальных целей в энергетике, ретроспективных трендов энергопотребления и других факторов, используется в оптимизационных моделях развития отраслей энергетического комплекса для расчета сценариев добычи, объемов межгосударственной торговли и рыночных цен на основные энергоресурсы (подробнее описание сценариев дано в [3], методологии расчетов — в [4]).

ПРОГНОЗ МИРОВОГО  
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Ретроспективный анализ [5] показал, что мир вступил в новый этап развития энергетики, когда

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке гранта Российского гуманитарного научного фонда (проект № 15-37-11129).

**Таблица 1.** Прогноз спроса на первичную энергию по регионам мира, млн т н. э.\*

Регион	2000 г.	2014 г.	2040 г.		
			вероятный сценарий	благоприятный сценарий	критический сценарий
Северная Америка	2730	2726	2754	2817	2709
Южная и Центральная Америка	466	699	975	1038	908
Европа	1936	1870	1646	1670	1571
СНГ	908	1045	1153	1202	1087
Развитые страны Азии	858	884	814	823	800
Развивающиеся страны Азии	2234	4905	7762	8179	7250
Ближний Восток	395	782	1151	1211	1063
Африка	510	788	1321	1401	1221
<b>Всего</b>	<b>10037</b>	<b>13699</b>	<b>17576</b>	<b>18341</b>	<b>16609</b>

\* Источники: ретроспектива [5], прогноз [3].

Примечание. Н. э. – нефтяной эквивалент.

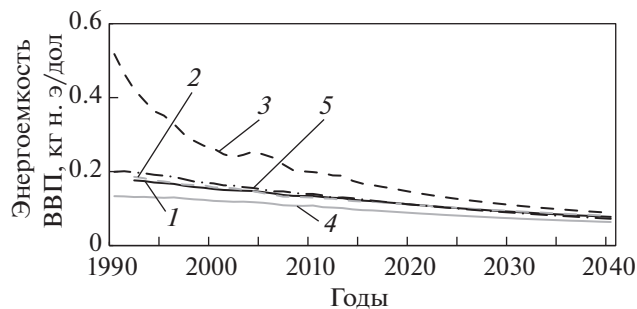
после многих десятилетий экономический рост стал отрываться от роста потребления энергии. В наиболее экономически и технологически развитых странах – членах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) потребление первичной энергии стабилизировалось, а в некоторых (отдельные страны Европы, Япония) уже начало снижаться. С учетом этого фундаментального изменения, а также в связи с более сдержанным ростом мировой экономики (особенно таких стран, как Китай) в вероятном сценарии, по прогнозу авторов, расход первичной энергии за 2015–2040 гг. увеличится в 1.28 раза, или почти вдвое меньше, чем в предыдущие 25 лет.

Как показано в табл. 1, среди стран, не входящих в ОЭСР, наиболее быстро будет расти энергопотребление в развивающихся странах Азии (1.8% ежегодно) и Африки (2.1%). Лидерами по абсолютному росту энергопотребления станут Индия и Китай, дающие более половины мирового прироста. Уже к 2030 г. энергопотребление Китая и Индии превысит энергопотребление всех стран

ОЭСР. Доля последних снизится с 40 до 30% мирового энергопотребления.

Энергоемкость мирового ВВП будет снижаться во всех регионах мира и за 2014–2040 гг. сократится на 38% (рис. 1). Темпы снижения энергоемкости ВВП по регионам мира зависят от особенностей структуры ВВП и инвестиционных возможностей для внедрения новых технологий. Сокращению межрегиональных различий в уровнях энергоемкости ВВП в значительной мере способствуют расширение и унификация технологий.

В производстве первичной энергии наибольший прирост до 2040 г. придется на газ (табл. 2), что выравнивает доли ископаемых топлив: нефть, газ и уголь обеспечат примерно по четверти мирового энергопотребления. Наиболее быстро (более чем втрое) увеличится использование ВИЭ<sup>2</sup>: солнечной, ветровой, геотермальной энергии и др. В целом нетопливные энергоресурсы к 2040 г. обеспечат оставшуюся четверть спроса на энергию. В табл. 1 и 2 разница между значениями добычи и потребления отражает изменение запасов.



**Рис. 1.** Динамика энергоемкости ВВП в мире и по группам стран: ретроспектива 1990–2014 гг. [5, 7], прогноз [3] – вероятный сценарий.

1 – весь мир; 2 – страны, не входящие в ОЭСР, кроме Китая; 3 – Китай; 4 – страны, входящие в ОЭСР, кроме США; 5 – США

## ПРОГНОЗ СПРОСА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

При расчете размеров электропотребления по странам и регионам мира совмещены два подхода: демографический (по динамике численности населения [6] и душевого электропотребления) и экономический (на основе прогнозов динамики ВВП [7] и его электроемкости), затем полученные результаты согласованы между собой (см. [4]).

Мировой спрос на электроэнергию – самую удобную для потребителей форму энергии – повышается вместе с ростом благосостояния насе-

<sup>2</sup> В статье к ВИЭ относятся новые возобновляемые источники энергии, кроме традиционной крупной гидроэнергетики: солнечная, ветровая, геотермальная энергия, энергия морей и океанов.

**Таблица 2.** Прогноз производства первичной энергии в мире, млн т н. э.\*

Источник энергии	2000 г.	2014 г.	2040 г.		
			вероятный сценарий	благоприятный сценарий	критический сценарий
Нефть	3704	4313	4688	4841	4474
Газ	2064	2928	4192	4506	3846
Уголь и торф	2275	3972	4428	4521	4300
Атомная энергия	676	661	1157	1231	1084
Гидроэнергия	225	335	484	494	469
Биоэнергия	1027	1413	1970	2008	1898
Солнечная энергия	5	48	223	253	171
Ветровая энергия	3	62	236	263	197
Другие возобновляемые источники энергии	52	72	199	225	169
<b>Всего</b>	<b>10031</b>	<b>13803</b>	<b>17576</b>	<b>18342</b>	<b>16609</b>

\* Источники: ретроспектива [5], прогноз [3].

Примечание. Разница с данными, представленными в табл. 1, отражает изменение запасов энергетических ресурсов.

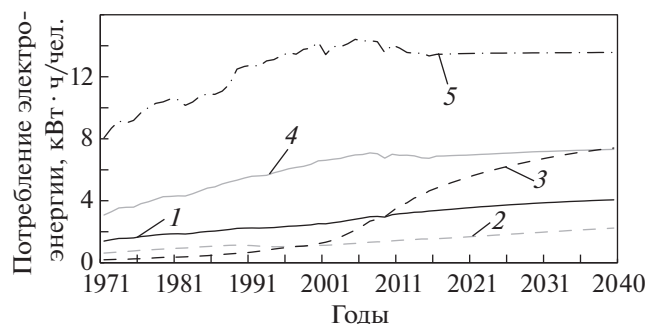
ления. С 1974 по 2014 г. потребление электроэнергии в мире увеличилось в 3.8 раза и достигло 23.8 трлн кВт · ч, но этот рост очень неравномерен по странам мира. В развитых странах умеренный рост экономики и постоянное повышение энергоэффективности способствовали замедлению роста, стабилизации, а в ряде стран (Япония, Бельгия, Греция) – и снижению спроса на электроэнергию. За 30 лет электропотребление развитых стран выросло в 2.5 раза. Напротив, активный рост населения и экономики в развивающихся странах обеспечил почти девятикратное увеличение электропотребления, особенно в связи с колоссальным его ростом в Китае (с 1.6 трлн кВт · ч в 2000 г. до 6 трлн кВт · ч в 2014 г.) [5].

Электропотребление на душу населения в среднем по миру хорошо описывается линейной зависимостью. В 1990 г. оно составляло 2.2 МВт · ч/чел., в 2014 г. – 3.3 МВт · ч/чел., а к 2040 г. согласно вероятному сценарию увеличится до 4.1 МВт · ч/чел. Значительная разница уровней благосостояния по странам определяет различия по душевому электропотреблению: в развитых странах оно составляет 8.5 МВт · ч/чел., в развивающихся почти вчетверо ниже – 2.2 МВт · ч/чел., а если исключить Китай, то 1.5 МВт · ч/чел. (рис. 2). Столь низкие показатели во многом обусловлены энергетической бедностью в странах Африки, на которую приходится всего 3% общемирового электропотребления при численности населения 1.2 млрд чел. (16% населения мира) [5, 6]. Даже при двукратном росте электропотребления при прогнозируемой ООН численности населения 2.1 млрд чел. в 2040 г. показатели на душу населения в Африке останутся очень низкими (0.9 МВт · ч/чел. в 2040 г. при 0.7 МВт · ч/чел. в 2014 г.). Для этого региона и наименее развитых стран Азии и Океании (по классификации ООН – всего 48 стран [6]) про-

блема доступа к электроэнергии в прогнозный период останется очень острой.

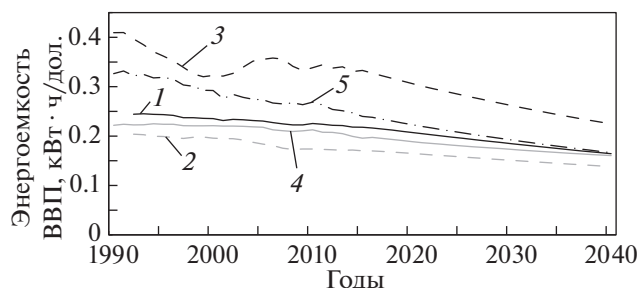
Электроемкость ВВП в целом по миру снижается, но медленнее, чем энергоемкость ВВП. В отличие от душевого электропотребления, динамика электроемкости по группам стран кардинально не различается (рис. 3). До полутора-двух раз выше среднемирового уровня останется электроемкость ВВП в Китае, Канаде, Швеции, Норвегии, в отдельных странах СНГ и Юго-Восточной Европы. Уровень электроемкости ВВП США сравняется со среднемировым. В некоторых странах, особенно в Африке, за счет интенсивной электрификации рост экономики будет сопровождаться ростом электроемкости ВВП.

По результатам расчетов (табл. 3) мировое электропотребление по вероятному сценарию к 2040 г. увеличится более чем на 50% (среднегодовой рост на 1.7%). Темпы роста потребления электроэнергии замедлятся (за прошлые 26 лет они составили в среднем 3%) аналогично росту потребления



**Рис. 2.** Динамика потребления электроэнергии на душу населения в мире и по группам стран: ретроспектива 1971–2014 гг. [5, 6], прогноз [3] – вероятный сценарий.

Обозначения см. рис. 1



**Рис. 3.** Динамика электроёмкости ВВП в мире и по группам стран: ретроспектива 1990–2014 гг. [5, 7], прогноз [3] — вероятный сценарий. Обозначения см. рис. 1

первичных энергоносителей — мировая энергетика вступила в новый этап развития с умеренным ростом потребления. В благоприятном и кризисном сценариях среднегодовые темпы роста спроса составят 2.0 и 1.4% соответственно.

В 1974 г. на производство электроэнергии в мире расходовалось менее четверти первичной энергии, а в 2014 г. — 36% [5]. Электроэнергия продолжит замещать другие энергоносители на транспорте, в домохозяйствах (особенно при развитии накопителей энергии), продолжится электрификация промышленных процессов. Самый быстрый рост электропотребления ожидается в развивающихся странах Азии, в Африке и на Ближнем Востоке (3% ежегодно), наиболее медленно (менее 1% в год) оно будет расти в развитых странах. Наибольший абсолютный рост будет в развивающихся странах Азии, где электропотребление увеличится на 8 трлн кВт·ч (более 60% мирового роста), из них 6.4 трлн кВт·ч придется на Китай и Индию. В результате в 2040 г. две трети мирового объема электроэнергии будет производиться в развивающихся странах, тогда как в 2014 г. их доля составляла 55%, а в 1990 г. — 35%. Поскольку в сценариях особенно различны темпы

роста экономики развивающихся стран (прежде всего Китая), то именно они в основном и определяют изменения в объеме мирового потребления электроэнергии между благоприятным и критическим сценариями (см. табл. 3).

### ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ МИРОВЫХ ТОПЛИВНЫХ РЫНКОВ

Критически важной для перспективной структуры производства электроэнергии является конъюнктура топливных рынков (в первую очередь — газового и угольного), которая во многом будет определять конкурентоспособность и востребованность тепловых электростанций в электроэнергетике.

В настоящее время газ доминирует по темпам роста потребления среди ископаемых топлив и до 2040 г. останется лидером по абсолютному приросту потребления среди всех энергоресурсов, прежде всего благодаря росту спроса в развивающихся странах Азии, а также в странах — производителях газа (например, в США — на 180 млрд м<sup>3</sup>, странах Ближнего Востока — на 250 млрд м<sup>3</sup>). Спрос на газ в вероятном сценарии увеличится в 1.4 раза и достигнет 5 трлн м<sup>3</sup> (табл. 4). Основным мотивом роста спроса на газ является экономический рост, а более высокая экологичность газообразного топлива в сравнении с угольным поддерживает, но не определяет спрос на газ, поскольку по цене он уступает углю, в особенности местным.

Китай обеспечит до четверти мирового прироста спроса на газ (свыше 350 млрд м<sup>3</sup>/год), но он обладает существенным потенциалом наращивания собственной добычи, и поэтому в некоторых сценариях прогнозируется пик импорта газа Китаем после 2035 г. Другие развивающиеся страны Азии в сумме обеспечат еще четверть мирового прироста спроса на газ. В странах Европы после

**Таблица 3.** Прогноз спроса на электроэнергию по регионам мира по сценариям, ТВт·ч\*

Регион	2000 г.	2014 г.	2040 г.		
			вероятный сценарий	благоприятный сценарий	критический сценарий
Северная Америка	4837	5277	6338	6614	5919
Южная и Центральная Америка	803	1291	2071	2144	1962
Европа	3406	3647	4008	4141	3798
СНГ	1249	1539	1959	2122	1825
Развитые страны Азии	1626	1934	2271	2333	2175
Развивающиеся страны Азии	2636	8314	16672	18382	14920
Ближний Восток	472	1051	2120	2215	1978
Африка	442	762	1779	1881	1634
<b>Всего</b>	<b>15471</b>	<b>23813</b>	<b>37217</b>	<b>39832</b>	<b>34212</b>

\* Источники: ретроспектива [5], прогноз [3].

**Таблица 4.** Прогноз спроса на газ по регионам мира и его добычи по сценариям, млрд м<sup>3</sup>\*

Показатель	2000 г.	2014 г.	2040 г.		
			вероятный сценарий	благоприятный сценарий	критический сценарий
<b>Потребление газа в мире, всего</b>	<b>2507</b>	<b>3524</b>	<b>5037</b>	<b>5413</b>	<b>4624</b>
В том числе:					
Северная Америка	794	946	1137	1229	1038
Южная и Центральная Америка	96	169	294	320	266
Европа	505	480	502	549	437
СНГ	568	636	717	738	679
развитые страны Азии	131	223	189	194	192
развивающиеся страны Азии	182	490	1225	1358	1106
Ближний Восток	174	451	726	742	676
Африка	57	129	247	283	230
<b>Добыча газа в мире, всего</b>	<b>2502</b>	<b>3533</b>	<b>5269</b>	<b>5819</b>	<b>4744</b>
В том числе:					
месторождения традиционного газа:					
действующие	2451	3077	2179	2178	2157
новые	0	0	2003	2479	1637
сланцевый газ	12	390	896	943	795
метан угольных пластов и газификация угля	39	66	190	220	154
<i>Справочно: сжиженный природный газ (СПГ)</i>	<i>137</i>	<i>325</i>	<i>742</i>	<i>878</i>	<i>655</i>

\* Источники: ретроспектива [5], прогноз [3].

Примечание. Разница между добычей и потреблением отражает изменение запасов, расчет произведен с учетом использования хранилищ газа.

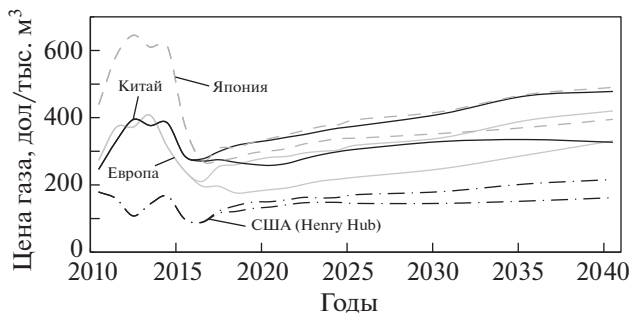
прохождения пика, согласно вероятному сценарию, спрос на газ вернется к уровню 2015 г., поскольку повышение энергоэффективности и развитие ВИЭ (особенно в странах ЕС), сдерживающие спрос на газ, компенсируются экономическим ростом. Спрос в развитых странах Азии из-за возвращения в эксплуатацию АЭС в Японии уменьшится в 2040 г. по отношению к 2015 г. на 20–30 млрд м<sup>3</sup>/год.

Действующие месторождения газа обеспечат лишь 40% мирового потребления газа в 2040 г., еще более трети потребления придется на новые месторождения традиционного газа (см. табл. 4). Доля нетрадиционного газа приблизится к четверти мировой добычи в 2040 г., основной прирост его производства ожидается до 2030 г., после чего его пик в США будет пройден, и дальнейший рост добычи сланцевого газа обеспечат Канада, Мексика, Аргентина, Китай и др.

Добыча газа увеличится во всех регионах мира, за исключением Европы, где ее пик был пройден в 2004 г., и по результатам расчетов она снизится к 2040 г. до 165 млрд м<sup>3</sup>. В ближайшие годы пройдет пик добычи Норвегия, а геологические, экономические и экологические ограничения не позволят поднять добычу сланцевого газа в этом регионе

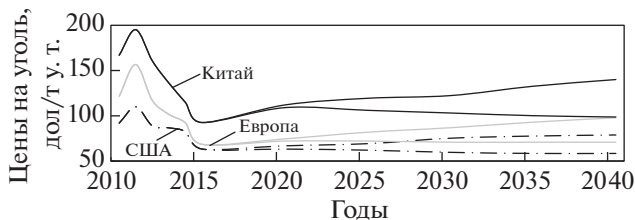
более чем до 10–15 млрд м<sup>3</sup>. Крупнейшим производителем газа в мире до 2040 г. останутся США, несмотря на прохождение пика добычи сланцевого и традиционного газа. Более чем в 2.5 раза увеличится добыча газа в Австралии, втрое – в Китае. Россия в течение прогнозного периода будет оставаться мировым лидером по экспорту газа, вторым крупнейшим производителем газа в мире. Активный рост добычи газа ожидается в странах Ближнего Востока (Иране, Ираке, Саудовской Аравии), а после 2025 г. предполагается выход на мировой рынок сжиженного природного газа (СПГ) из Восточной Африки (Танзании, Мозамбика), тогда как в странах Северной Африки внутренний спрос будет повышаться быстрее, чем собственная добыча. Таким образом, в рассматриваемой перспективе на мировом рынке газа конкуренция между производителями газа будет повышаться, что будет сдерживать рост цен.

Хотя роль спотовых цен газа, отражающих краткосрочный баланс спроса и предложения, постепенно увеличивается (в основном благодаря росту этого сегмента торговли газом в Европе при его постепенном расширении в Азии), определяющими для мирового рынка газа остаются цены нефти. По результатам расчетов на оптимизационных моделях мирового рынка нефти и газа, цены на



**Рис. 4.** Динамика цен на газ по регионам мира: ретроспектива 2010–2015 гг., прогноз: диапазон по сценариям 2016–2040 гг. [3].

Для Европы, Китая и Японии представлены цены, средневзвешенные между ценами долгосрочных контрактов и спотовыми ценами с учетом объемов потребления



**Рис. 5.** Динамика цен на уголь по регионам мира: ретроспектива 2010–2015 гг., прогноз по сценариям [3]

газ в вероятном сценарии к 2040 г. не достигнут уровня 2012 г. (рис. 4). Цены газа в США заметно повысятся до 2025 г., но после выхода на мировой рынок СПГ из США будут расти<sup>3</sup> сдержанно и достигнут 190 дол./тыс. м<sup>3</sup> в соответствии с вероятным сценарием. Цены на газ в Европе будут достаточно стабильны в период избытка СПГ, но после 2020–2025 гг. начнут повышаться и к 2040 г. достигнут 360–370 дол./тыс. м<sup>3</sup> по вероятному сценарию (диапазон цен на газ в Европе по сценариям составляет 330–420 дол./тыс. м<sup>3</sup>). С 2020 по 2025 г. прогнозируется наибольший рост мирового спроса на газ за рассматриваемый период при одновременном замедлении вводов мощностей по сжижению газа. В 2025–2040 гг. рост мировой потребности в газе постепенно замедлится, а затраты на добычу и транспортировку повысятся, поддерживая соответствующий рост цен. В Азии цены газа по вероятному сценарию будут традиционно на 50–100 дол./тыс. м<sup>3</sup> превышать европейские цены. Согласно критическому сценарию, где наибольшие изменения коснутся экономического развития Китая, в перспективе цены на газ будут сближаться с уровнями цен в Ев-

<sup>3</sup> Здесь и далее прогноз представлен в ценах 2014 г., поскольку долларовая инфляция авторами не прогнозируется.

ропе. Диапазон цен на газ в Японии составит 400–490 дол./тыс. м<sup>3</sup> к 2040 г.<sup>4</sup>

На мировом рынке угля до 2040 г. продолжит замедляться рост его потребления в связи с реализацией экологических приоритетов национальных энергетических политик стран, расширением использования газа и ВИЭ и общим замедлением роста энергопотребления (табл. 5). Если в предыдущую четверть века мировой спрос на уголь увеличился в 1.8 раза [5], то в следующую рост составит 13%. При этом снижении потребления угля в развитых странах ускорится, а рост спроса в развивающихся существенно замедлится. Мировой рынок угля очень концентрирован — на Китай и Индию приходится более 60% потребления, поэтому перспективы его развития напрямую зависят от энергетических политик этих двух стран. Прогнозируется, что к 2020–2025 гг. Китай пройдет пик потребления угля и продолжит диверсифицировать свой энергетический баланс, в том числе из-за экологии, тогда как спрос на уголь в Индии будет расти до конца прогнозного периода, обеспечивая прежде всего потребности электроэнергетики. Доля Китая и Индии в мировом потреблении угля к 2040 г. увеличится до 70%.

Рынок угля имеет лучшие соотношения запасов к добыче среди ископаемых топлив. В перспективе до 2040 г. добычу угля будет сдерживать умеренный рост спроса, а в отдельных странах — также рост затрат на добычу и транспортировку. В долгосрочной перспективе крупнейшими производителями угля останутся США, Россия, Китай, Индия, Австралия и Индонезия. Важной тенденцией для мирового рынка угля станет индийский импорт, но для сдерживания его роста правительство стимулирует инвестиции в собственную добычу с амбициозной целью удвоить ее (до 1 млрд т) к 2020 г. Добыча угля в Китае, США и Европе будет снижаться вместе с уменьшением спроса (см. табл. 5). Добыча и экспорт российского угля в 2040 г. останутся примерно на уровне 2014 г.

Большой избыток предложения угля на мировом рынке в долгосрочной перспективе, несмотря на умеренный рост затрат на добычу и транспортировку, не позволит ценам восстановиться до уровня 2012 г. По результатам расчетов цены на уголь в США к 2040 г. будут находиться в диапазоне (по сценариям) 60–80 дол./т у. т., в Европе — в пределах 70–100 дол./т у. т., в Китае (где средняя энергетическая ценность потребляемых углей ниже, чем в Европе и США) — в диапазоне 100–140 дол./т у. т. (рис. 5).

<sup>4</sup> Источники: SEGH, NCG, GME, Департамент энергетики США, таможенная статистика Японии, ИНЭИ РАН.

**Таблица 5.** Прогноз спроса на уголь по регионам мира и его добычи по сценариям, млн т у. т.\*

Показатель	2000 г.	2014 г.	2040 г.		
			вероятный сценарий	благоприятный сценарий	критический сценарий
<b>Потребление угля в мире, всего</b>	<b>3304</b>	<b>5591</b>	<b>6326</b>	<b>6459</b>	<b>6144</b>
В том числе:					
Северная Америка	817	663	459	434	476
Южная и Центральная Америка	29	47	64	65	62
Европа	508	449	228	208	245
СНГ	259	258	266	272	262
развитые страны Азии	269	347	248	239	255
развивающиеся страны Азии	1282	3654	4808	4959	4635
Ближний Восток	11	14	14	14	13
Африка	128	160	239	268	196
<i>Справочно: потребление коксующегося угля в мире</i>	<i>451</i>	<i>997</i>	<i>1168</i>	<i>1207</i>	<i>1064</i>
<b>Добыча угля в мире, всего</b>	<b>3250</b>	<b>5674</b>	<b>6338</b>	<b>6458</b>	<b>6143</b>
В том числе:					
развитые страны	1377	1388	1045	1002	1066
Китай	1019	2699	2826	2866	2800
Индия	187	362	1037	1097	966
другие развивающиеся страны	667	1224	1430	1493	1311

\* Источники: ретроспектива [5], прогноз [3].

Примечание. Разница между добычей и потреблением отражает изменение запасов.

### ОЦЕНКА УСЛОВИЙ МЕЖТОПЛИВНОЙ КОНКУРЕНЦИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Условия межтопливной конкуренции определяются не только прогнозными ценами газа и угля и соответствующими затратами на производство электроэнергии в регионах мира. В отношении неуглеродной (особенно возобновляемой) энергетики не меньшее влияние оказывают цели и механизмы реализации энергетической политики в разных странах (включая те, что предусмотрены национальными планами стран к климатической конференции ООН COP-21). Именно они вместе с развитием и трансфером технологий являются основными факторами роста коммерческой привлекательности ВИЭ.

За последнее десятилетие существенно снизилась стоимость технологий ветровой и особенно солнечной энергетики, где в 2009–2015 гг. примерно четырехкратное удешевление PV-модулей привело к почти двукратному снижению удельной стоимости строительства солнечных электростанций (СЭС) [8]. Для отдельных проектов в Европе, США и Китае стоимость электроэнергии от ветровых станций (ВЭС) практически сравнялась с показателями новых газовых и угольных установок. Однако в основной массе электроэнергия от возобновляемых источников остается более дорогой по сравнению с вырабатываемой

на тепловых электростанциях во всех основных регионах мира.

Это подтверждают расчеты, выполненные с использованием данных Международного энергетического агентства [9] и инструментария, который применяется МЭА для экономического сопоставления энергетических технологий [10] (табл. 6). При существующей стоимости сооружения и ценах топлива наземные ВЭС по стоимости электроэнергии (удельным дисконтированным затратам) остаются в 1.6–1.9 раза дороже новых парогазовых электростанций (ПГЭС) в Европе и США, сближаясь с ними в Китае и Индии из-за более высоких цен газа. Повсеместно электроэнергия от ВЭС остается на 20–60% дороже, чем от угольных ТЭС. Для морских ВЭС этот разрыв составляет 2.5–5.0 раз. Электроэнергия от крупных СЭС в настоящее время остается в 1.5–2 раза дороже, чем от тепловых станций (а в США в 3.0–4.5 раза, что обусловлено показанной МЭА 70%-ной разницей в удельных капиталовложениях в солнечные электростанции в США против Европы, Китая и Индии). Изменение нормы дисконта с 8 до 5% несколько снижает стоимостной разрыв для электроэнергии на базе ВИЭ, однако он по-прежнему остается заметным (за исключением наземных ВЭС в Китае и Индии, которые станут лучше парогазовых установок, но будут

**Таблица 6.** Удельные дисконтированные затраты на производство электроэнергии для основных типов тепловой и возобновляемой энергетики в энергосистемах крупнейших экономик мира, дол/(МВт·ч) (в ценах 2015 г.)\*

Страна, регион	ТЭС		ВЭС на суше		ВЭС на шельфе		СЭС	
	на угле	на газе	без СЭ	с СЭ	без СЭ	с СЭ	без СЭ	с СЭ
2015 г. – дисконт 8%								
США	55.6	34.9	65.9	88.7	175.9	194.1	166.0	217.3
Китай	48.2	62.3	65.0	89.9	146.3	160.3	102.1	142.5
Индия	50.6	67.3	74.7	102.9	161.9	177.9	100.7	144.8
Европа	61.9	60.3	97.2	128.7	152.4	170.3	99.4	150.7
2015 г. – дисконт 5%								
США	46.3	31.0	53.4	72.2	143.2	158.2	129.9	172.3
Китай	44.6	60.1	52.5	73.7	119.2	131.1	80.0	114.3
Индия	45.3	64.6	60.4	84.1	132.0	145.4	78.9	116.0
Европа	52.1	56.3	78.6	104.7	124.1	138.8	77.9	120.3
2040 г. – дисконт 8%								
США	57.7–64.5	45.1–54.4	58.6	81.4	98.0	116.3	80.6	131.9
Китай	47.0–60.3	67.5–93.8	61.7	86.6	84.8	98.9	54.6	95.0
Индия	52.5–62.7	73.9–97.9	69.4	97.6	92.6	108.6	50.5	94.6
Европа	61.1–69.6	73.9–89.1	87.9	119.4	88.5	106.4	56.0	107.3
2040 г. – дисконт 5%								
США	48.3–55.2	41.2–50.4	47.5	66.4	80.7	95.8	64.7	107.1
Китай	43.5–56.7	65.3–91.7	50.0	71.1	69.8	81.7	43.5	77.9
Индия	47.2–57.4	71.2–95.1	56.2	79.9	76.1	89.6	40.5	77.5
Европа	51.3–59.8	70.0–85.2	71.1	97.2	72.8	87.6	44.6	87.0

\* Источники: [9] (исходные данные), ИНЭИ РАН (расчеты).

Примечания: 1. СЭ – системный эффект в виде дублирующей мощности ГТУ. 2. Цветом выделена ВИЭ-генерация, конкурентоспособная с ТЭС на угле или на газе.

уступать традиционным для этих стран угольным конденсационным электростанциям).

До сих пор интенсивное развитие возобновляемой энергетики осуществляется за счет мощных (хотя и снижающихся по мере удешевления технологий) финансовых и других механизмов поддержки со стороны государства и потребителей. В последние годы из-за избыточности генерирующей мощности при крайне слабом росте спроса, снижении цен топлива и практически нулевых текущих издержках генерации электроэнергии на ВИЭ оптовые цены электроэнергии снижаются (в отдельные часы до нулевых и даже отрицательных значений), что препятствует созданию на рынке устойчивых инвестиционных стимулов и приводит к отрицательным финансовым показателям отдельных компаний в борьбе за рынок. Цены электроэнергии для конечных потребителей, наоборот, продолжают увеличиваться за счет роста налоговой и сетевой составляющих затрат, в которые транслируется основной объем финансовой поддержки ВИЭ. Это приводит в итоге к увеличению разрыва между розничными и оптовыми ценами на электроэнергию [11].

Вводы мощностей на базе ВИЭ в мире в последние годы превышают вводы тепловых электростанций. Помимо дополнительной ценовой нагрузки на потребителей это создает и технические проблемы интеграции ВИЭ-генерации в

энергосистемы: требуются усиление и перестройка магистральных и распределительных сетей, создание дублирующих и увеличение резервных мощностей тепловой генерации, растет необходимость более гибкой работы ТЭС в сильно переменных режимах [12, 13]. Эти мероприятия являются неотъемлемой частью инвестиционных решений по развитию ВИЭ и должны учитываться при их экономическом сопоставлении с технологиями тепловой энергетики в виде необходимых системных эффектов. Оценки для одного из способов учета системного эффекта – строительства дублирующих газотурбинных мощностей при вводе ВЭС и СЭС – показывают, что при этом удельные дисконтированные затраты на ВИЭ-генерацию увеличиваются в 1.3–1.5 раза и, следовательно, снижается ее конкурентоспособность с ТЭС.

Большое влияние на структуру электроэнергетики может оказать развитие технологий накопления электроэнергии, которые обеспечат управляемость выдачи мощности от ВЭС и СЭС в энергосистему, снизят инвестиции в резервные и дублирующие мощности, увеличат доступность электроэнергии в удаленных регионах и гибкость электроэнергетики в целом. Применение накопителей в комбинации с ВИЭ также должно учитываться при экономической оценке последних в виде системного эффекта, но в настоящее время они еще слишком дороги для массового исполь-



**Таблица 7.** Прогноз производства электроэнергии в мире по видам энергоресурсов по сценариям, ТВт · ч\*

Источники производства электроэнергии	2000 г.	2014 г.	2040 г.		
			вероятный сценарий	благоприятный сценарий	критический сценарий
Нефть	1259	1033	733	773	677
Газ	2753	5155	9506	9935	8999
Уголь	5997	9697	11598	12790	10484
Атомная энергия	2591	2535	4433	4718	4154
Гидроэнергия	2619	3895	5629	5715	5457
Биоэнергия	164	493	930	958	902
Солнечная энергия	2	198	1397	1611	1038
Ветровая энергия	31	717	2702	3018	2253
Другие ВИЭ	54	90	287	313	247
<b>Всего</b>	<b>15470</b>	<b>23813</b>	<b>37217</b>	<b>39832</b>	<b>34212</b>

\* Источник: ретроспектива [5], прогноз [3].

зования в комбинации с ВИЭ-генерацией. Фактор стоимости усугубляется потерями при аккумуляровании, эксплуатационными затратами, а также деградацией аккумулирующих элементов при сотнях и тысячах рабочих циклов, снижением их способности набирать и хранить требуемый объем электроэнергии. Технологические улучшения привели к удешевлению вдвое за 2013–2016 гг. аккумуляторных батарей большой мощности с продолжительным временем работы. По экспертным оценкам, к 2020 г. ожидается снижение их стоимости еще на 40%, после чего темпы удешевления накопителей будут снижаться при отсутствии “прорывных” решений на базе новых физико-химических процессов.

В отличие от ТЭС, в предстоящие 25 лет ожидается существенное удешевление технологий возобновляемой энергетики, но более умеренными темпами. Технологий ВЭС на суше уже считаются зрелыми, и по оценкам МЭА [9] удельные капиталовложения в них уменьшатся к 2040 г. всего на 10–15%. Потенциал снижения затрат на морские ВЭС оценивается в 35–45%, а на СЭС еще больше – до 45–60% к 2040 г.

Для оценки условий межтопливной конкуренции в электроэнергетике крупнейших стран мира в табл. 6 приведены удельные дисконтированные (при норме 5 и 8%) затраты в 2040 г. на производство электроэнергии ТЭС на газе и угле (с учетом роста цен топлива по кризисному и благоприятному сценариям), ВЭС на суше и шельфе и СЭС без учета и с учетом их системного эффекта. Ввиду удешевления ВИЭ и существенного удорожания топлива (см. рис. 4, 5) стоимость электроэнергии от ВЭС и особенно СЭС (при почти двукратном снижении в них удельных капиталовложений) повсеместно (кроме морских ВЭС и СЭС в США) окажется в диапазоне показателей ТЭС на газе и даже на угле. Но учет системного эффекта ВИЭ-электростанций на 20–80% повсеместно делает

их электроэнергию более дорогой, чем от угольных ТЭС, а в Европе и США – и от газовых электростанций. Меры энергетической политики, в частности введение существенной платы за эмиссию парниковых газов, могут компенсировать такую потерю конкурентоспособности ВИЭ-электростанций, но ценой соответствующего удорожания электроэнергии для всех потребителей.

### ПРОГНОЗ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ВИДАМ ТОПЛИВА

Прогноз производства электроэнергии по регионам выполнен на базе анализа межтопливной конкуренции и с учетом приоритетов энергетической политики отдельных стран в отношении АЭС и ВИЭ (табл. 7). До 2040 г. производство электроэнергии на газе увеличится в 1.8 раза и обеспечит наибольший рост по сравнению с другими видами энергоресурсов. Потребление газа в электроэнергетике увеличится во всех регионах мира, и до половины его прироста придется на страны – производители газа: США, Россию, Иран, Ирак, Саудовскую Аравию, Индонезию, Алжир и Египет. Производство электроэнергии на угле в связи с ограничениями национальных энергополитик вырастет значительно меньше – в 1.2 раза. Несмотря на снижение роли, уголь останется лидером в мировом производстве электроэнергии, обеспечивая около 30% его объема к 2040 г. В общей сложности на тепловых электростанциях будет выработано до 60% мирового производства электроэнергии.

Доля ГЭС несколько снизится, а доля АЭС возрастет, и они сохранят третье и четвертое места в мировом производстве электроэнергии, суммарно обеспечивая 27% выработки в 2040 г., как и в 2014. Наибольшие темпы роста производства электроэнергии дадут ВИЭ, их выработка увеличится к 2040 г. более чем втрое и по приросту лишь немного

Таблица 8. Прогноз производства электроэнергии по регионам мира в 2014 и 2040 гг. по видам энергоресурсов (вероятный сценарий), ТВт · ч\*

Источники производства электроэнергии	Мир в целом	Северная Америка	Южная и Центральная Америка	Европа	СНГ	Развитые страны Азии	Развивающиеся страны Азии	Ближний Восток	Африка
Нефть	1033	81	167	70	13	139	141	351	72
Газ	5155	1395	244	552	696	642	701	642	282
Уголь	9697	1811	69	920	308	764	5535	31	258
Атомная энергия	2535	948	21	904	272	156	216	4	14
Гидроэнергия	3895	683	701	627	245	127	1368	20	123
Биоэнергия	493	89	64	194	4	42	99	0	2
Солнечная энергия	198	27	1	98	1	33	37	1	1
Ветровая энергия	717	213	19	264	1	19	196	0	5
Другие ВИЭ	90	31	4	18	0	11	20	0	4
<b>Всего</b>	<b>23813</b>	<b>5277</b>	<b>1290</b>	<b>3647</b>	<b>1539</b>	<b>1934</b>	<b>8314</b>	<b>1051</b>	<b>762</b>
2040 г.									
Нефть	733	38	91	25	2	34	105	315	124
Газ	9506	2200	453	854	779	651	2242	1583	745
Уголь	11598	1292	55	391	303	582	8482	15	479
Атомная энергия	4433	1002	69	762	393	556	1494	102	54
Гидроэнергия	5629	707	1111	661	304	129	2433	32	253
Биоэнергия	930	147	156	233	10	76	287	1	20
Солнечная энергия	1397	245	33	236	86	138	530	67	64
Ветровая энергия	2702	609	93	787	81	69	1030	5	29
Другие ВИЭ	287	97	10	60	1	36	70	0	11
<b>Всего</b>	<b>37217</b>	<b>6338</b>	<b>2071</b>	<b>4008</b>	<b>1959</b>	<b>2271</b>	<b>16672</b>	<b>2120</b>	<b>1779</b>

\* Источник: данные за 2014 г. [5], прогноз на 2040 г. [3].

уступит газовым ТЭС (3.6 против 4.1 трлн кВт · ч). Для сравнения, общий прирост выработки электроэнергии угольными ТЭС, АЭС и ГЭС ожидается в пределах 1.5–2.0 трлн кВт · ч.

Производство электроэнергии до 2040 г. увеличится менее чем на 20% в развитых и почти вдвое в развивающихся странах (табл. 8). Развитые страны в текущем десятилетии проходят пик производства на ТЭС, и затем оно стабилизируется при вытеснении угля и мазута газом. Потенциал роста ГЭС в развитых странах практически исчерпан, а АЭС ограничен: Япония будет наращивать их выработку, Польша и Турция построят первые энергоблоки, но многие страны Европы (Бельгия, Германия, Великобритания, Франция, Швеция, Испания и др.) приняли решение об отказе от АЭС или их сокращении. Предстоит вывод из эксплуатации АЭС, выработавших проектный срок службы, и в развитых странах их мощности будут вчетверо больше, чем в развивающихся странах [14]. Основной рост производства электроэнергии в развитых странах обеспечат ВИЭ – 1.6 из 1.7 трлн кВт · ч.

Более половины из 25 трлн кВт · ч электроэнергии, произведенной в 2040 г. развивающимися странами, придется на Китай (свыше 10 трлн кВт · ч) и Индию (3.8 трлн кВт · ч), которая станет мировым лидером по численности населения, второй экономикой мира (после Китая) и увеличит электропотребление почти втрое. В соответствии с ее национальными планами, этот рост обеспечит преимущественно угольная энергетика – на Индию придется 1.6 из 2.9 трлн кВт · ч прироста производства электроэнергии угольными ТЭС в развивающихся странах (наращивать угольную генерацию будут еще и страны Африки).

В отличие от Индии, Китай ставит цель снижения доли угольной генерации при сильном замедлении роста электропотребления: если за последние 25 лет оно выросло в 8.7 раза, то к 2040 г. увеличится в 1.6 раза. В Китае наибольший прирост производства электроэнергии дадут ВИЭ и АЭС (в сумме до 2 трлн кВт · ч), прогнозируется быстрый рост генерации на ТЭС на газе и ГЭС (до 1 трлн кВт · ч). В целом по развивающимся странам теплоэнергетика обеспечит к 2040 г. больше половины прироста производства электроэнергии (28% на газе и 24% на угле), тогда как за последние 25 лет она дала 71% прироста.

В развивающихся странах существенно увеличится выработка на АЭС и ГЭС (по 1.5 трлн кВт · ч); ГЭС наиболее активно будут развиваться в Бразилии, Китае, Индии и других странах Азии. Ввод мощностей АЭС планируется в Саудовской Аравии, ОАЭ, Иордании, Израиле, Белоруссии, Чили, Индонезии, Малайзии, Вьетнаме. Лидером по выработке электроэнергии на АЭС станет Китай (к

2040 г. свыше 1 трлн кВт · ч), большой прирост ожидается и в других развивающихся странах Азии.

В итоге совместное влияние факторов межтопливной конкуренции и энергетической политики ведет к тому, что в развитых странах доля тепловой генерации снизится с 60% в 2014 г. до 48% в 2040 г. и в развивающихся – с 72 до 64%. Доля ВИЭ в производстве электроэнергии увеличится с 9 до 22% в развитых и с 4 до 10% в развивающихся странах. Доля гидроэнергии будет умеренно снижаться как в развитых, так и в развивающихся странах. Доля атомной энергии сохранится в развитых и удвоится в развивающихся странах. Хотя основную роль в обеспечении спроса на электроэнергию в развивающихся странах будут играть тепловые электростанции, их доля в выработке электроэнергии снизится благодаря быстрому росту ее производства на ВИЭ и АЭС. Тем не менее, ожидаемые изменения объемов и структуры производства электроэнергии не достигнут целей предотвращения климатических изменений в мире [3].

## ВЫВОДЫ

1. Спрос на электроэнергию в мире в предстоящие 25 лет продолжит уверенный рост, она будет вытеснять другие энергоресурсы в основных секторах энергопотребления. При этом более 85% прироста мирового спроса на электроэнергию дадут развивающиеся страны, в том числе более половины прироста придется на Китай и Индию.

2. До 2040 г. органическое топливо останется основой энергетического баланса мира, обеспечивая три четверти энергопотребления, но рост спроса на него существенно замедлится. При достаточных запасах с относительно низкими затратами на добычу и росте конкуренции на рынках цены на основные виды топлива до 2040 г. будут восстанавливаться умеренными темпами.

3. Электроэнергетика останется ключевой сферой межтопливной конкуренции, которая обострится с учетом удешевления технологий возобновляемой энергетики и аккумулирования электроэнергии. Однако с учетом системных затрат на интеграцию ВИЭ-электростанций в энергосистему стоимость их электроэнергии останется почти до конца периода заметно более высокой, чем получаемая на ТЭС. Таким образом, определяющее влияние на развитие возобновляемой, как и атомной, энергетики будет оказывать энергетическая политика наиболее крупных стран мира.

4. В мировом производстве электроэнергии основную роль сохраняют тепловые электростанции, хотя их доля к 2040 г. уменьшится с 67 до 58–60%. Развитые страны предпочтут газ углю, лидером по темпам роста производства в этих странах станут ВИЭ. Развивающиеся страны повсеместно нарастят газовую генерацию, больше будут пола-

гаться на атомную энергетику и все виды ВИЭ, а рост угольной генерации прогнозируется только в Азии и Африке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **SCANER** — модельно-информационный комплекс / А.А. Макаров, Ф.В. Веселов, О.А. Елисеева, В.А. Кулагин, В.А. Малахов, Т.А. Митрова, С.П. Филиппов. М.: ИНЭИ РАН, 2011.
2. **Макаров А.А.** Модельно-информационная система для исследования перспектив энергетического комплекса России (SCANER). Управление развитием крупномасштабных систем. М.: Физматлит, 2012.
3. **Прогноз** развития энергетики мира и России / под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Т.А. Митровой. М.: ИНЭИ РАН-АЦ при Правительстве РФ, 2016. ISBN 978-5-91438-023-3.
4. **Эволюция** мировых энергетических рынков и ее последствия для России / под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Т.А. Митровой. М.: ИНЭИ РАН-АЦ при Правительстве РФ, 2015. ISBN 978-5-91438-019-6.
5. **IEA** World energy statistics and balances 2016. OECD/IEA, 2016.
6. **World** population prospects 2015 revisio, medium scenario. UN population division of the department of economic and social affairs, 2015.
7. **World** economic outlook database april 2016. IMF, 2016.
8. **IRENA** renewable cost database. The power to change: solar and wind cost reduction potential to 2025. IRENA, 2016.
9. **IEA**. WEO-2016 Power Generation Assumptions. <http://www.worldenergyoutlook.org/weomodel/investmentcosts/>
10. **IEA/NEA** projected costs of generating electricity. OECD/IEA, 2015.
11. **Eurostat**. Energy statistics database. <http://ec.europa.eu/eurostat/>.
12. **Energy** technology perspectives. OECD/IEA, 2016. ISBN: 978-9-26425-233-2.
13. **Фортв В.Е., Попель О.С.** Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13. doi 10.1134/S0040363614060022
14. **Прогноз** развития энергетики мира и России до 2040 года / под ред. А.А. Макарова. М.: ИНЭИ РАН-АЦ при Правительстве РФ, 2013. ISBN: 978-5-91438-012-7.

## Perspectives of the Electric Power Industry Amid the Transforming Global Power Generation Markets

A. A. Makarov, T. A. Mitrova, F. V. Veselov, A. A. Galkina, and V. A. Kulagin

*Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186, Russia*

*\*e-mail: info@eriras.ru*

*\*\*e-mail: anne.galkina@gmail.com*

*\*\*\*e-mail: vakulagin@yandex.ru*

Received February 28, 2017; in final form, March 15, 2017

**Abstract**—A scenario-based prognosis of the evolution of global power generation markets until 2040, which was developed using the Scanner model-and-information complex, was given. The perspective development of fuel markets, vital for the power generation industry, was considered, and an attempt to predict the demand, production, and prices of oil, gas, coal, and noncarbon resources across various regions of the world was made. The anticipated decline in the growth of the global demand for fossil fuels and their sufficiency with relatively low extraction expenses will maintain the fuel prices (the data hereinafter are given as per 2014 prices) lower than their peak values in 2012. The outrunning growth of demand for electric power is shown in comparison with other power resources by regions and large countries in the world. The conditions of interfuel competition in the electric power industry considering the changes in anticipated fuel prices and cost indicators for various power generation technologies were studied. For this purpose, the ratios of discounted costs of electric power production by new gas and coal TPPs and wind and solar power plants were estimated. It was proven that accounting the system effects (operation modes, necessary duplicating and reserving the power of electric power plants using renewable energy sources) notably reduces the competitiveness of the renewable power industry and is not always compensated by the expected lowering of its capital intensity and growth of fuel for TPPs. However, even with a moderate (in relation to other prognoses) growth of the role of power plants using renewable energy sources, they will triple electric power production. In this context, thermal power plants will preserve their leadership covering up to 60% of the global electric power production, approximately half using gas.

**Keywords:** electric power, gas, coal, renewable power sources, power consumption, fuel extraction, fuel markets, interfuel competition, social efficiency, cost of electric power production