

ВАРИАНТЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

О.В. Марченко, С.В. Соломин

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130*



Цель работы – прогнозирование развития ядерной энергетики России и мира на период до 2050 г. при различных сценариях ограничений на эмиссию диоксида углерода. Проведён краткий сравнительный анализ основных характеристик прогнозов Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA) и Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (International Renewable Energy Agency, IRENA). Дополнительно выполнены расчёты с использованием разработанных в ИСЭМ СО РАН математических моделей мировой энергетики GEM и GEM-Дуп. Определено оптимальное соотношение ядерных и неядерных энергоисточников. Показано, что ядерная энергетика, в том числе атомные электростанции, работающие по замкнутому топливному циклу, наряду с возобновляемыми источниками энергии является эффективной технологией, которая позволяет решить проблему снижения выбросов диоксида углерода. Расчёты показали, что в сценарии устойчивого развития мощность АЭС в России в период с 2020 по 2050 гг. может вырасти в 2,7 раза, а их доля в производстве электроэнергии достигать 21 – 25% в 2030 г. и 26 – 35% в 2050 г. Средний годовой темп прироста (за 30 лет) установленной мощности на АЭС в России в сценарии устойчивого развития равен 3,1% по сравнению с 2,7% для мира в целом. В выполненных авторами расчётах на моделях GEM и GEM-Дуп масштабы использования ядерной энергии оказались примерно на 30% выше, чем в сценариях Международного энергетического агентства в связи с более консервативными оценками возможностей улучшения характеристик возобновляемых источников энергии и учетом необходимости дублирования их мощности.

Ключевые слова: ядерная энергетика, атомные электростанции, экологические ограничения, эффективность, энергетическая модель, прогноз.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы многие политики и учёные говорят о необходимости борьбы с глобальным потеплением. При этом утверждается, что меры по борьбе с изменением климата являются неотложными, так как последствия такого изменения могут оказаться хуже, чем ожидалось ранее [1].

Парижское соглашение по климату 2015 г. устанавливает ориентир ограничения роста глобальной температуры – «намного ниже 2°C», и в идеале до 1,5°C по срав-

© О.В. Марченко, С.В. Соломин, 2022

нению с доиндустриальным уровнем. Для реализации этого соглашения потребуются глубокая трансформация мировой энергетики. Поскольку использование ископаемого топлива увеличивает эмиссию парниковых газов, его дальнейшее использование должно быть ограничено [2 - 4].

Одним из наиболее эффективных средств уменьшения эмиссии парниковых газов, в первую очередь, диоксида углерода CO_2 , является дальнейшее развитие ядерной энергетики [5 - 12]. Тем не менее, ее доля в общем объеме выработки электроэнергии в мире сократилась с 17% в 2000 г. до примерно 10% в 2020 г., несмотря на увеличение мощности и повышение эффективности современных реакторов [13]. Эта тенденция в значительной степени обусловлена действием политических факторов.

Цель работы – прогнозирование развития ядерной энергетики России и мира на период до 2050 г. Рассматриваются различные сценарии ограничений на эмиссию диоксида углерода, некоторые характеристики прогнозов международных организаций и результаты расчётов перспектив развития энергетики с помощью разработанных в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева статической [5, 8, 10] и динамической [11, 14] моделей мировой энергетической системы.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Математическое описание задачи определения оптимальной технологической структуры мировой энергетической системы в статической (квазидинамической) постановке имеет следующий вид. Найти минимум целевой функции

$$z = \sum_r \sum_j c_{rj} x_{rj}, \quad (1)$$

где c_{rj} – удельные приведенные затраты; x_{rj} – установленные мощности; индексы r и j обозначают множества регионов (узлов модели) $R = \{1, \dots, r_u\}$ и энергетических технологий $J = \{1, \dots, j_u\}$ соответственно.

Минимум целевой функции находится при условии выполнения ряда ограничений: обеспечение заданных потребностей в энергии и пиковой мощности, выполнение баланса производства и потребления первичной, вторичной и конечной энергии, финансовых, экологических и прочих ограничений. Среди технологий производства электроэнергии в модели описаны базовые и пиковые электростанции на органическом топливе и на водороде, АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами, гидравлические (ГЭС), солнечные (СЭС), ветровые (ВЭС) и геотермальные (ГеотЭС) электростанции.

Статическая модель описывает энергетику в предположении, что на каждом временном интервале структура энергетики меняется полностью (все существующие технологии будут выведены из эксплуатации и заменены новыми или полностью реконструированы). Непрерывное развитие энергетики описывает динамическая модель, которая при переходе к новому временному интервалу учитывает существующую структуру энергетических технологий в регионах, сроки вывода объектов из эксплуатации, различия в сроках службы технологий и динамику технико-экономических показателей технологий. Целевая функция задачи в динамической постановке имеет вид

$$Z = \sum_t \sum_r \sum_j c_{trj} x_{trj}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R, \quad \forall j \in J. \quad (2)$$

Здесь по-прежнему c_{trj} – удельные приведенные затраты; x_{trj} – установленные мощности, а индекс t относится к интервалам времени t_u , на которые разделен весь рассматриваемый период $T = \{1, \dots, t_u\}$. В дополнение к ограничениям статической модели решение задачи должно удовлетворять условиям непрерывности на грани-

цах интервалов времени. Как показал опыт применения этих двух модификаций модели мировой энергетической системы, при рассмотрении периода времени в несколько десятилетий (в настоящей работе – до 2050 г.), расчётные структуры на конец периода различаются несущественно.

Модели в указанных постановках наиболее подробно описаны в [5, 14]. Модель в квазидинамической постановке (1) названа GEM (Global Energy Model), модель в динамической постановке (2) – GEM-Dyn.

СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ МИРА И РОССИИ

В таблице 1 приведены значения глобальной эмиссии диоксида углерода в сценариях, предложенных Международным энергетическим агентством (IEA). В сценарии 1 (STEPS, или сценарий заявленной политики) эмиссия приблизительно постоянна и остается на современном уровне (34 Гт CO₂/г.), в сценарии 2 (APS, или сценарий объявленных обещаний) эмиссия плавно снижается до 21 Гт/г. к 2050 г., в сценарии 3 (SDS, или сценарий устойчивого развития) – до 8 Гт/г. В сценарии 4 (NZE, или сценарий нулевых выбросов) к 2050 г. полностью прекращаются выбросы диоксида углерода [13]. Последний сценарий, по-видимому, не имеет шансов на реализацию и рассматривается лишь для полноты картины.

Таблица 1
Современная и прогнозная эмиссия диоксида углерода, Гт CO₂/г.

Сценарии		Годы				
		2010	2020	2030	2040	2050
1	STEPS	32,3	34,2	36,3	35,3	33,9
2	APS	32,3	34,2	33,6	26,7	20,7
3	SDS	32,3	34,2	28,5	16,4	8,2
4	NZE	32,3	34,2	21,1	6,3	0,0

Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA) предложило два сценария эмиссии: инерционный (35 Гт в 2030 г. и 33,1 Гт в 2050 г.) и REMap (24,9 Гт в 2030 г. и 9,8 Гт) [3]. Первый сценарий аналогичен сценарию STEPS Международного энергетического агентства, второй – сценарию устойчивого развития SDS (см. табл. 1).

В таблице 2 приведены удельные капиталовложения для основных технологий производства электроэнергии в сценариях IEA (верхняя часть таблицы), а в табл. 3, которая имеет иллюстративный характер, – результаты расчёта стоимости электроэнергии (удельных дисконтированных затрат на производство электроэнергии) и ранжирование технологий по этому критерию с учётом неопределённости как технико-экономических показателей, так и места расположения энергоисточника.

Удельные капиталовложения – наиболее важный показатель, влияющий на экономическую эффективность энергоисточника. Кроме этого важную роль играют стоимость топлива, а для возобновляемых источников энергии – климатические и метеорологические условия, определяющие коэффициент использования установленной мощности.

Стоимость электроэнергии аккумулирует в себе все основные технико-экономические показатели энергоисточника и обычно используется для предварительных оценок и попарных сравнений. Следующее приближение для оценки экономической эффективности – математическое моделирование, учитывающее связи энергоисточников между собой и с окружающей средой. Это особенно важно при рассмотрении возобновляемых источников энергии, работающих в неуправляемом режиме,

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

поскольку для бесперебойного электроснабжения потребителей они должны дублироваться другими источниками энергии. В частности, в моделях GEM переменные, описывающие возобновляемые источники энергии, входят не только в балансы энергии, но и в балансы мощности с коэффициентами, которые учитывают негарантированность их выработки.

Таблица 2

Удельные капиталовложения для ключевых технологий, \$/кВт

	2030 г.			2050 г.		
	Европа / США	Индия/ Китай	Россия	Европа / США	Индия / Китай	Россия
Модель МЭА (2021)						
АЭС	4800 / 5100	2800	–	4500	2500 / 2800	–
СЭС (ФЭП)	510 / 640	340 / 380	–	370 / 440	260 / 330	–
ВЭС	1390 / 1280	990 / 1160	–	1391 / 1200	960 / 1090	–
Уголь	2000 / 2100	1200 / 800	–	2000 / 2100	1200 / 800	–
Газ	1000	700 / 560	–	1000	700 / 560	–
Модель GEM (2022)						
АЭС (тепловые)	4800	3000	3200	4500	3200	3500
АЭС (БР)	5200	5000	3600	5000	4700	3500
СЭС (ФЭП)	850	750	1000	750	500	800
ВЭС	1300	1050	1100	1200	1000	1000
ГЭС	4100 / 3950	2500 / 2400	2500	4100/3950	2800 / 2700	2600
Уголь	1500	1250	1400	1450	1200	1350
Газ	1000	900	1050	1000	900	1100

Таблица 3

Ранжирование ключевых технологий по стоимости электроэнергии в 2050 г.

Энергоисточник	Ранг	Приведенная стоимость электроэнергии, цент/кВт·ч	
		2030 г.	2050 г.
СЭС	1	2,0 – 4,5	1,5 – 4,0
ВЭС	2	3,0 – 5,5	3,0 – 4,5
АЭС	3	6,5 – 12,0	6,0 – 11,5
ГЭС	4	6,0 – 12,0	7,0 – 12,0
Газ	5	6,0 – 12,0	12,5 – 13,5
Уголь	6	6,5 – 14,0	12,5 – 14,0

В период до 2050 г. предполагается резкое удешевление солнечных электростанций на базе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). В связи с этим атомные и гидравлические электростанции уступают по стоимости электроэнергии солнечным и ветровым электростанциям (СЭС и ВЭС), расположенным в благоприятных для них условиях (см. табл. 3).

При таких предпосылках прогнозируемая в сценариях IEA и IRENA структура мировой энергетики предполагает кардинальное повышение роли возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В сценарии REMар доля ВИЭ в мировом производстве электроэнергии к 2050 г. увеличивается до 86%. В сценариях IEA аналогичный показатель составляет от 42 до 88%, а доля АЭС уменьшается с 10 до 8 – 9% (табл. 4). Максимальный объём мирового производства электроэнергии на АЭС в сценариях IEA составляет 5,5 тыс. ТВт·ч/г. (рост по сравнению с существующим уровнем в течение 30-ти лет чуть более чем в два раза, или около 2,4% в год).

Таблица 4

Производство электроэнергии (тыс. ТВт·ч/г.) и доля АЭС в производстве электроэнергии (%) в сценариях МЭА (IEA)

	2020 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.
Мир, всего	26,7	33,5 – 37,3	40,5 – 56,5	46,7 – 71,1
В т.ч. АЭС	2,7	3,1 – 3,8	3,5 – 4,9	3,8 – 5,5
Доля АЭС, %	10,1	9,3 – 10,1	8,7 – 9,4	7,7 – 8,1
Россия, всего	1,1	1,3	1,4	1,5
В т.ч. АЭС	0,2	0,2 – 0,3	0,3	0,3 – 0,4
Доля АЭС, %	20,3	17,5 – 20,2	18,0 – 23,5	18,5 – 27,2

В настоящей работе для первых трёх сценариев IEA (см. табл. 1) были выполнены расчёты на моделях GEM и GEM-Dyn с показателями технологий из табл. 2 (нижняя часть таблицы). Их результаты в сопоставлении с аналогичными результатами IEA (модель WEM) [13] представлены в табл. 5, 6.

Таблица 5

Прогноз выработки электроэнергии в России, ТВт·ч/г.

Энергисточники	Годы						
	2020	2030			2050		
		Сц. 1	Сц. 2	Сц. 3	Сц. 1	Сц. 2	Сц. 3
Сценарии МЭА (2021)							
ВИЭ	195	236	236	332	432	432	867
Ядерная энергия	216	219	219	254	275	275	409
Орг. топливо	646	798	798	666	780	780	232
<i>Всего</i>	1057	1253	1253	1255	1488	1488	1508
Сценарии авторов (2022)							
ВИЭ	209	270	290	310	410	420	600
Ядерная энергия	216	290	300	330	420	490	540
Водород	0	0	0	20	0	50	130
Орг. топливо	639	850	760	540	820	640	290
<i>Всего</i>	1064	1400	1350	1300	1650	1600	1560

По мере ужесточения ограничений на эмиссию диоксида углерода масштабы развития ядерной энергетики в целом увеличиваются (в сценариях 1 и 2 IEA остаются постоянными). Согласно прогнозам, на моделях GEM и GEM-Dyn масштабы исполь-

зования ядерной энергии во всех сценариях превышают прогнозы IEA, в сценарии устойчивого развития примерно на 30%. Это связано с тем, что в расчётах заложены более консервативные оценки снижения удельных капиталовложений в СЭС и ВЭС и учтена необходимость дублирования их мощности пиковыми энергоисточниками. Одновременно с этим расчёты показывают целесообразность частичного перехода атомной энергетики на реакторы на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом, что повышает их ресурсную базу, эффективность использования ядерного топлива и позволяет решать некоторые задачи, связанные с утилизацией радиоактивных отходов. Атомные станции в сценариях 2 и 3 оказывается целесообразным использовать не только для производства электроэнергии, но и водорода для пиковых электростанций.

Таблица 6

Удельный вес в производстве электроэнергии, %

Энергоисточники	Годы						
	2020	2030			2050		
		Сц. 1	Сц. 2	Сц. 3	Сц. 1	Сц. 2	Сц. 3
Сценарии МЭА (2021)							
ВИЭ	18,5	18,8	18,8	26,5	29,0	29,0	57,5
Ядерная энергия	20,4	17,5	17,5	20,2	18,5	18,5	27,1
Орг. топливо	61,1	63,7	63,7	53,1	52,4	52,4	15,4
<i>Всего</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Сценарии авторов (2022)							
ВИЭ	19,6	19,3	21,5	23,8	24,8	26,3	38,5
Ядерная энергия	20,3	20,7	22,2	25,4	25,5	30,6	34,6
Водород	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	3,1	8,3
Орг. топливо	60,1	60,7	56,3	41,5	49,7	40,0	18,6
<i>Всего</i>	100,0	100,7	100,0	92,3	100,0	100,0	100,0

Прогнозируемая на моделях GEM доля АЭС в общероссийском производстве электроэнергии также существенно превышает оценки МЭА (35% против 27% в сценарии устойчивого развития в 2050 г.) и прогнозы работы [15], согласно которым доля АЭС останется практически постоянной (чуть более 20%) в период до 2050 г.

Результаты расчёта оптимального по экономическому критерию развития установленных мощностей АЭС в мировой и российской энергетике показаны на рис. 1, 2.

Средний годовой темп прироста (за 30 лет) установленной мощности АЭС в России в сценарии устойчивого развития составляет 3,1% по сравнению с 2,7% для мира в целом. В рассмотренных сценариях оптимальным с точки зрения экономики является увеличение установленных мощностей АЭС до 56 – 72 ГВт к 2050 г. (рост в 1,9 – 2,5 раза по сравнению с 2020 г.).

Следует отметить, что полученные в результате расчётов высокие темпы роста атомной энергетики в России вряд ли могут быть реализованы с учётом финансовых, политических и других ограничений, но они выявляют тенденцию, в соответствии с которой целесообразно развивать атомную энергетику в предстоящие десятилетия.

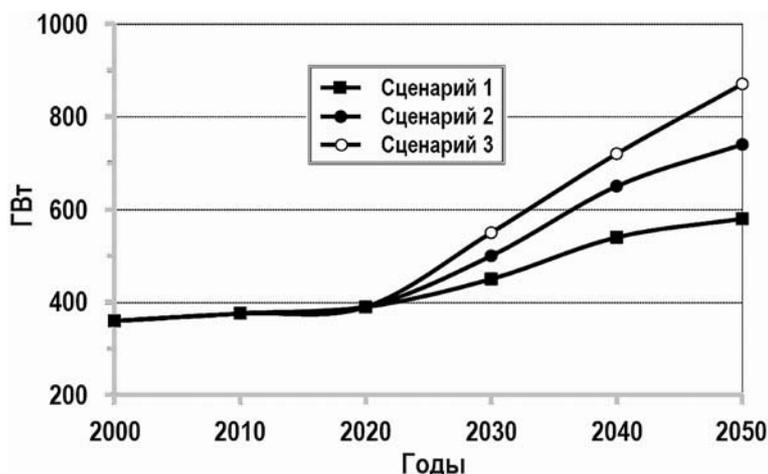


Рис. 1. Установленные мощности АЭС (ГВт) в мире

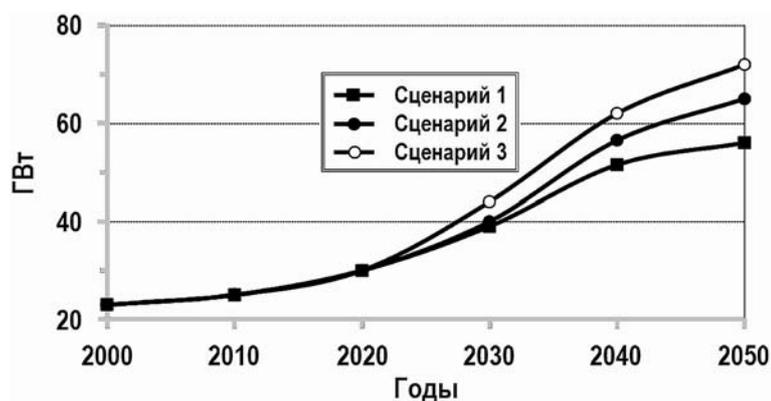


Рис. 2. Установленные мощности АЭС (ГВт) в России

ВЫВОДЫ

1. Проведены оптимизационные расчёты технологической структуры энергетики мира и России для разных сценариев ограничений на эмиссию диоксида углерода с помощью математических моделей GEM (Global Energy Model) и GEM-Dyn. Определено оптимальное соотношение ядерных и неядерных энергоисточников для условий России.

2. Показано, что ядерная энергетика, в том числе атомные электростанции, работающие по замкнутому топливному циклу, наряду с возобновляемыми источниками энергии является эффективной технологией, которая позволяет решить проблему снижения выбросов диоксида углерода. В России удельный вес АЭС в производстве электроэнергии может составлять 21 - 25% в 2030 г. и 26 - 35% в 2050 г.

3. В расчётах на моделях GEM и GEM-Dyn масштабы использования ядерной энергии оказались примерно на 30% выше, чем в сценариях Международного энергетического агентства в связи с более консервативными оценками возможностей улучшения характеристик возобновляемых источников энергии и учетом необходимости дублирования их мощности.

Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021 – 2030 гг.

Литература

1. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. – IPCC, 2019. – 616 p.
2. Hansen K., Breyer C., Lund H. Status and perspectives on 100% renewable energy systems. // *Energy*. – 2019. – Vol. 175. – PP. 471-480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>.
3. Future of solar photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. – Abu Dhabi: IRENA, 2019. – 73 p.
4. Gielen D., Boshell F., Saygin D., Bazilian M., Wagner N., Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. // *Energy Strategy Reviews*. – 2019. – Vol. 24. – PP. 38-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.
5. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P. et al. World energy and transition to sustainable development. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 264 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3705-0>.
6. Мурогов В.М., Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная технология – гарант стабильности России в XXI веке. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2005. – № 2. – С. 3-8.
7. Зродников А.В. Быстрые реакторы в энергообеспечении устойчивого развития России. // *Атомная энергия*. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 183-185.
8. Беляев Л.С., Марченко О.В., Соломин С.В. Исследование долгосрочных тенденций развития энергетики России и мира. // *Известия РАН. Энергетика*. – 2011. – № 2. – С. 3-11.
9. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // *Атомная энергия*. – 2013. – Т. 112. – Вып. 6. – С. 319-330.
10. Каграманян В.С., Коробейников В.В., Поплавская Е.В., Беляев Л.С., Марченко О.В., Соломин С.В. Оценка экономического риска, обусловленного задержкой ввода АЭС с быстрыми реакторами. // *Атомная энергия*. – 2013. – Т. 114. – Вып. 2. – С. 67-76.
11. Марченко О.В., Соломин С.В. Исследование влияния экологических ограничений на конкурентоспособность атомных электростанций. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2015. – № 3. – С. 20-30. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.02>.
12. Adamov E.O., Rachkov V.I., Kashirsky A.A., Orlov A.I. Global outlook on large-scale nuclear power development strategies. // *Nuclear Energy and Technology*. – 2021. – Vol. 7. – No. 4. – PP. 263-270. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.7.74217>.
13. World Energy Outlook 2021. – Paris: IEA, 2021. – 386 p.
14. Филиппов С.П., Лебедев А.В. Мультирегиональная динамическая модель мировой энергетической системы. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2003. – 74 с.
15. Лагерева А.В., Ханаева В.Н. Влияние ограничений на выбросы CO₂ на инновационное развитие ТЭС. // *Энергетическая политика*. – 2021. – № 7. – С. 16-25. DOI: https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_7161_16.

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

Авторы

Марченко Олег Владимирович, старший научный сотрудник, доцент, канд. техн. наук
E-mail: marchenko@isem.irk.ru

Соломин Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, канд. техн. наук
E-mail: solomin@isem.irk.ru

UDC 621.039.003

THE DEVELOPMENT OPTIONS OF NUCLEAR POWER UNDER CARBON DIOXIDE EMISSIONS CONSTRAINTS

Marchenko O.V., Solomin S.V.

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130 Lermontov Str., 664033 Irkutsk, Russia

ABSTRACT

The aim of the work is forecasting the development of nuclear power in Russia and the world for the period up to 2050 under various scenarios of constraints on carbon dioxide emissions. A brief comparative analysis of the main characteristics of the forecasts of the International Energy Agency (IEA) and the International Renewable Energy Agency (IRENA) has been carried out. Additionally, calculations were performed using the mathematical models of the world energy system GEM and GEM-Dyn developed at the ISEM SB RAS. The optimal ratio of nuclear and non-nuclear energy sources has been determined. It is shown that nuclear power, including nuclear power plants operating on a closed fuel cycle, along with renewable energy sources, is an effective technology that can solve the problem of reducing carbon dioxide emissions. Calculations have shown that in the sustainable development scenario, the capacity of nuclear power plants in Russia in the period from 2020 to 2050 can increase by 2.7 times, and their share in electricity generation can reach 21 – 25% in 2030 and 26 – 35% in 2050. The average annual growth rate (for 30 years) of the installed capacity of nuclear power plants in Russia in the sustainable development scenario is 3.1% compared to 2.7% for the world as a whole. In the GEM and GEM-Dyn calculations performed by the authors, the scale of nuclear energy use turned out to be about 30% higher than in the scenarios of the International Energy Agency due to more conservative estimates of the opportunities for improving the performance of renewable energy sources and taking into account the need to back-up their capacity.

Key words: nuclear power, nuclear power plants, environmental constraints, efficiency, energy model, forecast.

REFERENCES

1. *Global Warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. IPCC, 2019. 616 p.
2. Hansen K., Breyer C., Lund H. Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*. 2019, vol. 175, pp. 471-480; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>.
3. *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects*. Abu Dhabi: IRENA, 2019. 73 p.
4. Gielen D., Boshell F., Saygin D., Bazilian M., Wagner N., Gorini R. The Role of Renewable Energy in the Global Energy Transformation. *Energy Strategy Reviews*. 2019, v. 24, pp. 38-54; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.
5. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P. et al. *World Energy and Transition to Sustainable development*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2002. 264 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3705-0>.
6. Murogov V.M., Ponomarev-Stepnoy N.N. Nuclear Technology – Guarantee of the Stable Development Russia in the 21 Century. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya energetika*. 2005, no. 2, pp. 3-8 (in Russian).

7. Zrodnikov A.V. Fast Reactors in the Energy Security for the Stable Development of Russia. *Atomic Energy*. 2010, v. 108, iss. 4, pp. 230-233; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9282-3>.
8. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Solomin S.V. Investigation of Long Term Trends of Russia and World Energy Systems Development. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2011, no. 2, pp. 3-11 (in Russian).
9. Adamov E.O., Dzhilavyan A.V., Lopatkin A.V., Molokanov N.A., Muravyov E.V., Orlov V.V., Kal'akin S.G., Rachkov V.I., Troyanov V.M., Avrorin E.N., Ivanov V.B., Aleksakhin R.M. Conceptual Framework of a Strategy for the Development of Nuclear Power in Russia to 2100. *Atomic Energy*. 2012, v. 112, iss. 6, pp. 391-403; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9574-x>.
10. Kagramanyan V.S., Korobeynikov V.V., Poplavskaya E.V., Belyaev L.S., Marchenko O.V., Solomin S.V. Assessment of the Economic Risk due to Delayed Startup of NPP with Fast Reactors. *Atomic Energy*. 2013, v. 114, iss. 2, pp. 83-93; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9676-0>.
11. Marchenko O.V., Solomin S.V. Investigation of Ecological Constraints Influence on Competitiveness of Nuclear Power Plants. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2015, no. 3, pp. 20-30; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.02> (in Russian).
12. Adamov E.O., Rachkov V.I., Kashirsky A.A., Orlov A.I. Global Outlook on Large-Scale Nuclear Power Development Strategies. *Nuclear Energy and Technology*. 2021, v.7, no. 4, pp. 263-270; DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.7.74217>.
13. *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA, 2021. 386 p.
14. Filippov S.P., Lebedev A.V. *Multi-Regional Dynamic Model of the World Energy System*. Irkutsk. ISEM SO RAN Publ., 2003, 74 p. (in Russian).
15. Lagerev A.V., Hanaeva V.N. Impact of Restrictions on CO₂ Emissions on Innovative Development of Thermal Power. *Energeticheskaya Politika*. 2021, no. 7, pp. 16-25; DOI: https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_7161_16 (in Russian).

Authors

Marchenko Oleg Vladimirovich, Senior Researcher, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: marchenko@isem.irk.ru

Solomin Sergei Vladimirovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: solomin@isem.irk.ru