

СТАТЬИ

УДК 621.039.003

РОЛЬ АЭС В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ВЫБРОСОВ УГЛЕРОДА

Адамов Е.О., Толстоухов Д.А., Панов С.А. (АО «Прорыв», г. Москва),

Веселов Ф.В., Хоршев А.А., Соляник А.И. (ИНЭИ РАН, г. Москва)

e-mail: epos@eriras.ru

На конец 2020 г. в нашей стране по данным АО «Системный оператор ЕЭС» эксплуатируются 11 АЭС суммарной установленной мощностью 29,3 млн кВт. Почти все АЭС размещены в европейской части и работают в составе ЕЭС России.

Следует отметить, что последние 30 лет ядерная энергетика остается наиболее устойчивым и динамично развивающимся сектором электроэнергетики и всего топливно-энергетического комплекса. Активная роль государства в организации эффективного управления функционированием и развитием ядерной энергетике позволила АЭС с наименьшими среди других отраслей топливно-энергетического комплекса последствиями пройти период системного экономического кризиса в середине 1990-х гг. и максимально быстро выйти из него, восстановив и нарастив производственный потенциал. В 1995 г. по сравнению с 1990 г. АЭС произвели на 16% меньше электроэнергии при общем снижении ее производства по стране на 20% и еще большем падении показателей национальной экономики и промышленности. Но уже через 5 лет в 2000 г. российские АЭС превысили максимум производства в советский период 128 млрд кВт·ч в 1988 г., выработав 131 млрд кВт·ч. При этом общий объем производства электроэнергии в стране лишь после 2010 г. вернулся к уровню 1990 г.

В условиях длительной почти десятилетней стагнации общего производства электроэнергии в диапазоне 1000—1100 млрд кВт·ч не только продолжается развитие энерго мощностей ядерной энергетике, но и осуществляется последова-

тельный переход на новые типы энергоблоков. В 2020 г. совокупное производство электроэнергии на АЭС России достигло 215,7 млрд кВт·ч, что выше максимального уровня всех АЭС СССР.

Обладая низкой маневренностью, но в то же время икратно более низкими по сравнению с тепловыми электростанциями топливными затратами, АЭС являются наиболее эффективными источниками обеспечения базовой части спроса на электроэнергию. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) АЭС в течение последнего десятилетия существенно превышал средний показатель по ЕЭС России 50—53% и оставался на стабильно высоком уровне 78—83%.

Благодаря высокой загрузке генерирующего оборудования доля АЭС в суммарном производстве электроэнергии оказывается существенно выше, чем в структуре установленной мощности. При общем росте производства электроэнергии в ЕЭС России в 2010—2020 гг. на 4,2% выработка электроэнергии на атомных электростанциях увеличилась на 30,5% (табл. 1). В результате АЭС увеличили свой вес в балансе электроэнергии с 16,9% в 2010 г. до 20,6% в 2020 г. При этом в ОЭС Центра и Северо-Запада эти показатели составили 45 и 35,1% соответственно.

Развитие ядерной энергетике является одним из стратегических приоритетов государственной энергетической политики, обеспечивающих энергетическую безопасность и эффективность энергоснабжения экономики страны. Важность производства электроэнергии на АЭС

Т а б л и ц а 1. Изменение роли АЭС в производственной структуре ЕЭС России

Тип электростанции	Установленная мощность, млн кВт			Производство электроэнергии, млрд кВт·ч		
	2010 г.	2020 г.	2035 г. (генеральная схема)	2010 г.	2020 г.	2035 г. (генеральная схема)
Всего	214,7	245,3	258,3	1004,7	1047	1334,8
В том числе:						
АЭС	24,3	29,3	35,2	170,2	215,7	245,2
гидроэлектростанции	44,5	49,9	52,1	158,9	207,4	195,2
возобновляемые источники энергии	0	2,8	2,6	0	3,3	6,7
ТЭС	145,9	163,3	168,4	675,5	620,6	887,7
Доля АЭС, %	11,3	11,9	13,6	16,9	20,6	18,4

резко возрастает в контексте выполнения национальных обязательств, принятых Россией в рамках Парижского соглашения по климату. Масштабы развития АЭС на перспективу до 2035 г. определены государственным документом стратегического планирования — Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики [1]. Этим документом предполагаются умеренные темпы роста производства атомной энергии в ЕЭС России (см. табл. 1):

в базовом варианте установленная мощность АЭС по сравнению с отчетным 2020 г. повысится на 20%, что приведет к незначительному увеличению их доли в структуре генерирующих мощностей за следующие 15 лет на 1,7%;

их доля, несмотря на увеличение прогнозируемых объемов выработки электроэнергии на АЭС на 13,7%, в суммарном объеме производства снизится относительно отчетного уровня на 1,8%. Снижение связано с высокими темпами роста спроса в восточной части ЕЭС России, который будет обеспечиваться преимущественно за счет развития гидро- и тепловой угольной энергетики;

в качестве типового инвестиционного решения рассматриваются энергоблоки с реакторами нового поколения ВВЭР-ТОИ, а также предполагается развитие быстрых реакторов: ввод новых энергоблоков БН-1200 и БРЕСТ-300.

В принятой в 2020 г. Энергетической стратегии России на период до 2035 г. [2] целевые показатели объема и структуры генерирующих мощностей и производства электроэнергии не определены, требования к развитию ядерной энергетики ограничены частными показателями:

суммарная мощность АЭС с быстрыми реакторами к 2035 г. должна составить 1,78 млн кВт;

доля энергоблоков поколения III+ и модернизированных действующих энергоблоков с продленным ресурсом должна достигнуть 40% суммарной установленной мощности АЭС к 2035 г.

В проекте Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. [3], разработанном Минэкономразвития и вынесенном на обсуждение в начале 2020 г., представлены целевые показатели производства электроэнергии на АЭС на более дальнюю перспективу:

на 2030 г. объем их выработки составит 225 млрд кВт·ч, что почти совпадает с показателями базового варианта генеральной схемы на этот период;

на 2050 г. выработка повысится до 260 млрд кВт·ч, что при КИУМ около 80% эквивалентно мощности 37 млн кВт, при КИУМ 85% составляет те же 35 млн кВт, предполагаемые базовым вариантом генеральной схемы на 2035 г.

Однако важно отметить, что рассматривая ядерную энергетику, равно как и возобновляемую, в качестве возможных способов снижения выбросов парниковых газов, проект стратегии предусматривает крайне высокие темпы повышения энергетической эффективности экономики. Следствием этого является прекращение роста спроса на электроэнергию после 2030 г. и даже его небольшое снижение к 2050 г. Соответственно сокращаются и общие объемы производства электроэнергии с 1300 млрд кВт·ч в 2030 г. до 1240 млрд кВт·ч в 2050 г. в целом по

стране. В такой балансовой ситуации при не-большом приросте выработки АЭС их вклад в суммарное производство электроэнергии несущественно увеличится — для ЕЭС России в 2050 г. он составит 21,7%.

Сравнение рассмотренных государственных ориентиров развития ядерной энергетики с показателями отраслевой стратегии до 2050 г. и на период до 2100 г., разработанной Госкорпорацией «Росатом» в 2018 г. [4], показывает, что в 2035 г. диапазон развития АЭС в Стратегии-2018 немного ниже целевого уровня генеральной схемы (табл. 2). В то же время к 2050 г. масштабы развития АЭС в Стратегии-2018 оказываются заметно более высокими, чем в проекте стратегии развития с низким уровнем выбросов парниковых газов.

Перспективы совершенствования технологий производства атомной энергии в период до 2050 г. В соответствии со Стратегией-2018 уже в настоящее время начат переход на новые поколения легководных тепловых реакторов ВВЭР-ТОИ и ВВЭР-ТОИ+ с улучшенными характеристиками, все интенсивнее будет развиваться и направление быстрых реакторов, приближающих переход ядерной энергетики к смешанному и далее к замкнутому топливному циклу [5, 6]. При этом новые поколения АЭС должны отличаться не только повышенной надежностью и безопасностью, но и более низкой капиталоемкостью. Прогнозируется, что удельные капиталовложения серийных блоков ВВЭР-ТОИ+ будут на 15% ниже головных блоков ВВЭР-ТОИ (Курская АЭС-2), целевые требования к блокам с быстрыми реакторами предусматривают снижение этих значений на 20% относительно головных блоков ВВЭР-ТОИ [7]. При этом достижение целевых показателей по капиталоемкости АЭС обусловлено не толь-

ко совершенствованием технических решений, но и серийным и поточным строительством АЭС как внутри страны, так и за рубежом.

Снижение удельных капиталовложений является важным фактором повышения конкурентоспособности АЭС в сравнении с тепловой и возобновляемой энергетикой, особенно с учетом продолжающегося интенсивного удешевления солнечных и в меньшей мере ветряных электростанций.

Диапазон варьирования доли АЭС в долгосрочных прогнозах развития электроэнергетики России без учета углеродного регулирования. Представленная далее вариантная оценка роли ядерной энергетики на перспективу до 2050 г. уточняет результаты исследований ИНЭИ РАН по моделированию масштабов перестройки электроэнергетики России под влиянием технологических и климатических факторов [8] с учетом следующих условий:

динамика роста общего объема производства электроэнергии соответствует прогнозу спроса на электроэнергию и мощность по территории страны, который сформирован на основе отраслевых и региональных макроэкономических показателей базового сценария долгосрочного прогноза социально-экономического развития России, разработанного Министерством экономического развития РФ в 2018 г. Базовый сценарий с использованием методики [9] уточнен с учетом параметров среднесрочного прогноза 2019 г. и скорректирован на кризисную ситуацию 2020 г. с пролонгацией прогнозных тенденций изменения показателей роста экономики и электропотребления на период до 2050 г. В соответствии с этим прогнозом к 2035 г. суммарное производство электроэнергии в ЕЭС России увеличится на 32% относительно 2020 г. и достигнет 1384 млрд кВт·ч, что сопоставимо с

Т а б л и ц а 2. Масштабы развития АЭС в различных документах стратегического планирования, млн кВт

Документ	2030 г.	2035 г.	2050 г.
Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики	30,7	31,5—35,2	
Проект Стратегии долгосрочного развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов	30—32*		35—37*
Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективы на период до 2100 года		30—33	39—44

*Оценка при КИУМ 80—85%.

Таблица 3. Доля АЭС в производственной структуре ЕЭС России до 2050 г. при базовом сценарии Стратегии-2018

Тип электростанции	Установленная мощность, млн кВт			Производство электроэнергии, млрд кВт·ч		
	2035 г.	2040 г.	2050 г.	2035 г.	2040 г.	2050 г.
Всего	270,1	289,7	319,3	1384,4	1481,1	1650,5
В том числе:						
АЭС	35,2	36,8	44,3	259,6	281,9	335,6
гидроэлектростанции	53,3	59,4	63	200,7	227,1	243,7
возобновляемые источники энергии	5,1	7	7	9,5	17,6	17,6
ТЭС	176,6	186,4	204,9	914,7	954,5	1053,8
Доля АЭС, %	13	12,7	13,9	18,8	19	20,3

показателями базового варианта генеральной схемы. К 2050 г. производство электроэнергии повысится более чем в 1,5 раза и достигнет 1651 млрд кВт·ч (табл. 3);

максимально широкая зона оптимизации инвестиционных решений по развитию и обновлению генерирующих мощностей рассмотрена при формировании перспективных балансов мощности и электроэнергии. На каждый период времени она определяется разностью между потребностью в генерирующей мощности и мощностью действующих электростанций, не достигающих предельного ресурса эксплуатации. Также учтены уже принятые инвестиционные решения по развитию генерирующих мощностей на среднесрочную перспективу [10]. Таким образом, результаты оптимизации структуры генерирующих мощностей на 2035 г. близки, но не идентичны параметрам базового варианта генеральной схемы (см. табл. 3);

сценарий развития АЭС до 2050 г., соответствующий базовому сценарию Стратегии-2018, с достижением установленной мощности 44 млн кВт рассмотрен в качестве основного (расчетный сценарий Б). При этом также предполагается, что достигаются целевые установки Стратегии-2018 по технико-экономическим показателям новых типов блоков ВВЭР-ТОИ+ и быстрых реакторов, прежде всего в части их удельных капиталовложений.

Оптимизация перспективных балансов мощности и электроэнергии выполнена с использованием динамической модели развития электроэнергетики EPOS [11], являющейся составной частью модельно-информационного комплекса прогнозирования развития мирового и российского энергетического комплекса и рынков (СКАНЕР) [12]. Она обеспечивает оп-

тимизацию решений по развитию и использованию генерирующих мощностей, исходя из минимизации стоимости энергоснабжения народного хозяйства (суммарных дисконтированных затрат) за рассматриваемый период и с учетом затрат последствия принимаемых решений в течение еще 15 лет.

Анализ показывает, что реализация базового сценария развития АЭС по Стратегии-2018 позволит сохранить к 2040 г. долю АЭС в производстве электроэнергии на уровне 19%, к 2050 г. этот показатель составит 20,3%.

В то же время предполагаемые Стратегией-2018 целевые технико-экономические показатели новых АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами обеспечат высокую конкурентоспособность в сравнении с современными парогазовыми и угольными тепловыми электростанциями. Среди неуглеродных источников электроэнергии АЭС также будут существенно эффективнее электростанций на возобновляемых источниках энергии по показателю удельной дисконтированной стоимости электроэнергии (LCOE) даже при оптимистичных темпах научно-технического прогресса и удешевления технологий возобновляемой энергетики и без учета сопутствующих затрат по интеграции ветряных и солнечных электростанций в ЕЭС России [7]. Модельные расчеты не только подтвердили высокую конкурентоспособность АЭС, но и показали экономическую эффективность реализации более масштабной программы развития ядерной энергетики (расчетный сценарий Б1). При этом установленная мощность АЭС в 2040—2050 гг. может составить 52—63 млн кВт, что примерно на 40% выше, чем в базовом сценарии Стратегии-2018, доля атомных электростанций в структуре производства электроэнер-

гии ЕЭС России возрастет до 26,9% в 2040 г. и 28,7% в 2050 г. (табл. 4).

Расчеты при варьировании ключевых факторов, влияющих на условия межтопливной конкуренции и общий объем производства электроэнергии, показали, что и в этом случае оптимальные масштабы развития АЭС могут быть выше параметров Стратегии-2018 (табл. 5):

при более низкой динамике цен газа доля АЭС в 2040—2050 гг. уменьшится по сравнению со сценарием Б1 и составит около 23% (расчетный сценарий Б2);

при снижении вдвое темпов роста электропотребления и производства электроэнергии в ЕЭС России против базового уровня (расчетный сценарий Б3) доля АЭС в структуре производства в 2040—2050 гг. также уменьшится по сравнению со сценарием Б1 и составит 24,3—24,9%. При этом производство электроэнергии

на АЭС останется выше, чем в базовом сценарии при развитии по Стратегии-2018.

Диапазон варьирования доли АЭС в долгосрочных прогнозах развития электроэнергетики России с учетом углеродного регулирования. Дополнительным фактором, повышающим эффективность увеличения доли АЭС в производственной структуре электроэнергетики, является переход к устойчивому развитию экономики и энергетики страны при низком уровне выбросов парниковых газов. Понимание трудностей в осуществлении такого перехода только на базе возобновляемых источников энергии заставляет все большее число стран обращаться к АЭС как одному из важнейших инструментов декарбонизации [13, 14].

Для России необходимость такого перехода определяется, с одной стороны, национальными обязательствами, принятыми при ратификации

Т а б л и ц а 4. Возможности увеличения доли АЭС в производственной структуре ЕЭС России до 2050 г. сверх базового сценария Стратегии-2018

Тип электростанции	Установленная мощность, млн кВт				Производство электроэнергии, млрд кВт·ч			
	Стратегия-2018 (Б)		Оптимальный объем (Б1)		Стратегия-2018 (Б)		Оптимальный объем (Б1)	
	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.
Всего	289,7	319,3	288,9	318,6	1481,1	1650,5	1481,1	1650,5
В том числе:								
АЭС	36,8	44,3	52,2	62,5	281,9	335,6	399	473,4
гидроэлектростанции	59,4	63	59,5	63	227,1	243,7	227,8	243,7
возобновляемые источники энергии	7	7	6	6	17,6	17,6	13,8	13,8
ТЭС	186,4	204,9	171,1	187,2	954,5	1053,8	840,6	919,8
Доля АЭС, %	12,7	13,9	18,1	19,6	19	20,3	26,9	28,7

Т а б л и ц а 5. Влияние неопределенности стоимости топлива и спроса на электроэнергию на изменение доли АЭС в производственной структуре ЕЭС России до 2050 г.

Тип электростанции	Установленная мощность, млн кВт				Производство электроэнергии, млрд кВт·ч			
	Низкие цены газа (Б2)		Низкий спрос на электроэнергию (Б3)		Низкие цены газа (Б2)		Низкий спрос на электроэнергию (Б3)	
	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.
Всего	288,8	318,4	256,6	267,7	1481,1	1650,1	1303,9	1388
В том числе:								
АЭС	44,9	49,1	42,4	44,5	343	372,2	324,1	336,7
гидроэлектростанции	59,5	63	57	61,1	227,4	243,7	216,2	234,6
возобновляемые источники энергии	5,9	5,9	6,1	6,1	13,8	13,8	13,8	13,8
ТЭС	178,6	200,3	151,1	156,1	896,9	1021,1	750	803,3
Доля АЭС, %	15,5	15,4	16,5	16,6	23,2	22,5	24,9	24,3

Парижского соглашения по климату, включая регулярный пересмотр национальных целей по объему эмиссии парниковых газов в сторону все большего ограничения, с другой, такой переход должен обеспечить эффективную адаптацию экономики страны к изменению ситуации на внешних рынках, в том числе:

к снижению объема потребления и цен на традиционные углеродсодержащие энергоресурсы в результате интенсивной декарбонизации в странах, крупнейших покупателях продукции российского топливно-энергетического комплекса;

к введению трансграничных экономических механизмов, ухудшающих конкурентоспособность энергоемких экспортируемых товаров.

Электроэнергетика России, основу которой составляют тепловые электростанции, является одним из крупных эмитентов парниковых газов (около четверти общего объема эмиссии от энергетического использования топлива). При этом электроэнергия является важнейшим энергоносителем, который используется во всех отраслях экономики, в том числе и экспортно-ориентированных, а ее углеродоемкость оказывает серьезное влияние на косвенные выбросы углерода продукции неэнергетических отраслей. Таким образом, сокращение углеродной нагрузки в отечественной электроэнергетике обеспечит двойной эффект для экономики страны в глобальном снижении выбросов парниковых газов. Ядерная энергетика может сыграть в этом решающую роль, поскольку 1 млн кВт мощности АЭС при замещении производства электроэнергии на действующих тепловых электростанциях обеспечивает максимальный объем снижения выбросов CO_2 в сравнении с другими низко- или неуглеродными генерирующими технологиями (табл. 6).

Анализ структуры производства электроэнергии и потребления органического топлива в базовом сценарии Б показал, что при развитии АЭС в соответствии с параметрами Стратегии-2018 годовой объем эмиссии парниковых газов от электростанций возрастет к 2050 г. примерно на 22%. Возможности АЭС в эффективном снижении эмиссии парниковых газов в электроэнергетике были оценены путем оптимизации балансов электроэнергии и мощности при различных уровнях экологических ограничений. В частности, были рассмотрены сценарии стабилизации объема эмиссии CO_2 от электростанций на отчетном уровне (примерно 70% объема 1990 г.) до 2050 г. При развитии АЭС в параметрах Стратегии-2018 (расчетный сценарий В1) достижение такой цели будет обеспечено за счет более интенсивного технологического обновления в теплоэнергетике, включая переход на парогазовый цикл и развитие теплофикации, но главным образом за счет ускорения роста возобновляемых источников энергии (табл. 7). При этом доля АЭС в структуре производства электроэнергии сохранится на уровне базового сценария Б и к 2050 г. составит 20,3%.

В случае оптимизации (расчетный сценарий В1.1), а не заданного развития экономически эффективный объем производства электроэнергии на АЭС может превысить целевые показатели Стратегии-2018 почти в 1,5 раза в 2040 г. и в 1,7 раза в 2050 г. При этом уже в 2040 г. АЭС могут обеспечить 28% общего производства электроэнергии, к 2050 г. их вклад достигнет почти 34%.

Моделирование сценариев развития отрасли в условиях еще более жестких экологических ограничений показывает, что технически они могут быть реализованы и без более интенсивного развития АЭС. Так, для реализации сценария

Таблица 6. Вклад разных типов электростанций в снижение выбросов CO_2 при замещении производства электроэнергии на ТЭС (расчет на 1 млн кВт мощности)

Тип электростанции	КИУМ, %	Снижение выбросов CO_2 в год при замещении, млн т CO_2		
		угольной ТЭС	газотурбинной паротурбинной ТЭС	парогазовой ТЭС
Парогазовая ТЭС	80	4,7	1,2	—
АЭС	85	7,8	4	2,8
Ветряная электростанция	23—30	2,1—2,7	1,1—1,4	0,7—1
Солнечная электростанция	14—18	1,3—1,6	0,7—0,8	0,5—0,6

Таблица 7. Сценарии структурных изменений в ЕЭС России при стабилизации выбросов CO₂ на отчетном уровне к 2050 г.

Тип электростанции	Установленная мощность, млн кВт				Производство электроэнергии, млрд кВт·ч			
	АЭС по Стратегии-2018 (B1)		Оптимальный объем АЭС (B1.1)		АЭС по Стратегии-2018 (B1)		Оптимальный объем АЭС (B1.1)	
	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.
Всего	305,7	342,8	289,2	318,8	1481,1	1650,5	1481,1	1650,5
В том числе:								
АЭС	36,8	44,3	54,4	73,7	281,9	335,6	415,3	559,1
гидроэлектростанции	60,2	63,7	59,1	63	231,1	246,7	226,2	243,7
возобновляемые источники энергии	25,3	37,4	6,1	6,1	66,8	97,2	13,8	13,8
ТЭС	183,4	197,4	169,5	176	901,3	971,3	825,8	834,1
Доля АЭС, %	12	12,9	18,8	23,1	19	20,3	28	33,9

Таблица 8. Сценарии структурных изменений в ЕЭС России при снижении на 20% выбросов CO₂ к 2050 г.

Тип электростанции	Установленная мощность, млн кВт				Производство электроэнергии, млрд кВт·ч			
	Минимальный объем АЭС (B2)		Оптимальный объем АЭС (B2.1)		Минимальный объем АЭС (B2)		Оптимальный объем АЭС (B2.1)	
	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.	2040 г.	2050 г.
Всего	350,7	418,1	333,3	359,5	1481,1	1650,5	1481,4	1650,5
В том числе:								
АЭС	43,1	63,1	52,5	85	329,4	478,1	400,7	642,8
гидроэлектростанции	60,9	63,7	60,1	63,7	234	246,7	230,4	246,7
возобновляемые источники энергии	69	112,4	53	53	133	204,7	104,5	104,5
ТЭС	177,7	178,9	167,8	157,8	785,7	722,9	745,9	656,7
Доля АЭС, %	12,3	15,1	15,8	23,6	22,2	29	27	38,9

рия снижения к 2050 г. объема выбросов CO₂ от электростанций на 20% ниже отчетного значения, что эквивалентно 57% уровня 1990 г., мощность АЭС в ЕЭС России к этому времени должна составить не менее 63 млн кВт (расчетный сценарий B2), а их доля в суммарном производстве электроэнергии повыситься до 22,2% к 2040 г. и до 29% к 2050 г. (табл. 8). Остающийся объем замещения производства электроэнергии на тепловых электростанциях для выполнения экологических ограничений может быть обеспечен за счет роста ее выработки на возобновляемых источниках. Однако с точки зрения минимизации суммарных дисконтированных затрат на энергоснабжение экономики страны до 2050 г. более эффективным является сценарий еще большего роста мощности АЭС (расчетный сценарий B2.1) — до 85 млн кВт в 2050 г. При этом АЭС уже к 2040 г. могут обеспечить до 27% суммарного производства электроэнергии, к 2050 г. — почти 39%.

Таким образом, экономико-математическое моделирование при условии достижения целевых технико-экономических показателей перспективных проектов АЭС показывает большой и экономически эффективный потенциал для развития ядерной энергетики в ЕЭС России более быстрыми темпами, чем это предполагается в Стратегии-2018, особенно при ужесточении экологических ограничений и применении мер углеродного регулирования. При этом доля АЭС в суммарном производстве электроэнергии может повыситься к 2040 г. с 19% в базовом сценарии (по Стратегии-2018) до 22,2—28%, к 2050 г. — с 20,3% до 29—38,9%.

Однако такие масштабы развития АЭС требуют резкой интенсификации темпов ввода новых энергоблоков. Если для достижения целевого уровня Стратегии-2018 44 млн кВт с учетом выводимой мощности действующих АЭС к 2050 г. потребуется ввод примерно одного блока единичной мощностью 1250 тыс. кВт в

год после 2030 г., то для выхода на 63 млн кВт этот темп после 2035 г. должен увеличиться до двух блоков в год. Для достижения уровня 85 млн кВт потребуются вводить по три блока в год в период после 2035 г. Таким образом, реализуемость более амбициозных сценариев развития АЭС критическим образом будет зависеть от соответствующего развития смежных отраслей для обеспечения достаточных объемов поставки оборудования и поточного выполнения строительных работ.

Представляется, что в 2035—2050 гг. сохранятся значимые ограничения по предельным темпам развития АЭС в России. В частности, это связано с необходимостью реализации проектов сооружения АЭС за пределами страны, что является важным условием для поддержания лидирующих позиций России в глобальной технологической конкуренции в сфере ядерной энергетики. Еще одним направлением, требующим в этот период финансовых и производственных ресурсов, может стать малая ядерная энергетика для энергоснабжения удаленных территорий в восточных и арктических районах страны и диверсификации высокотехнологичного экспорта в атомной отрасли.

Все эти факторы в совокупности позволяют с умеренным оптимизмом оценить предельные возможности развития АЭС в России к 2050 г. на уровне до 63 млн кВт (темп ввода по два блока в год, начиная с 2035 г.), что выше целевых показателей Стратегии-2018, но заметно меньше оценок, полученных при экономической оптимизации структуры генерирующих мощностей в ЕЭС России.

Оценка последствий интенсивного развития АЭС для экономики страны. Анализ интегральных экономических характеристик

рассмотренных сценариев показывает, что увеличение доли АЭС в производственной структуре электроэнергетики позволяет снизить совокупные затраты на энергоснабжение народного хозяйства, которые являются критерием оптимальности при выполнении модельных расчетов (табл. 9). В пересчете на 1 млн кВт дополнительной мощности АЭС:

прирост капитальных вложений составит 53 млрд руб. (здесь и далее в ценах 2019 г.), так как дополнительные затраты на ввод мощности АЭС частично компенсируются снижением затрат на развитие тепловых электростанций;

замещение выработки тепловых электростанций обеспечивает экономию топлива к 2050 г. до 1,7 млн т усл. топл.;

экономию совокупной дисконтированной стоимости энергоснабжения (при реальной ставке дисконтирования 7%) составит 4,4 млрд руб.

Этот системный экономический эффекткратно возрастает при усилении экологических факторов, которые связаны с необходимостью снижения углеродоемкости электроэнергетики страны, влияющей в том числе и на конкурентоспособность экспорта при введении трансграничных механизмов углеродного регулирования.

При ограничении объема выбросов CO₂ на отчетном уровне в период до 2050 г. каждый дополнительный 1 млн кВт мощности АЭС обеспечит экономию почти 15 млрд руб. совокупных дисконтированных затрат на энергоснабжение. При снижении выбросов к 2050 г. на 20% ниже отчетного уровня это составит более 41 млрд руб. Для выполнения таких экологических ограничений на выбросы CO₂ при развитии АЭС в пределах целевых масштабов Стратегии-2018 основным решением низкоуглеродной пе-

Т а б л и ц а 9. Характеристика интегральных экономических результатов увеличения мощности АЭС в пересчете на 1 млн кВт в ЕЭС России при разном уровне ограничений на выбросы CO₂

Показатель	Варианты ограничений на выбросы CO ₂		
	Без ограничений	100% отчетного уровня	80% отчетного уровня
Изменение суммарных капиталовложений до 2050 г., млрд руб.	53	–36	–120
Изменение годового потребления органического топлива на ТЭС в 2050 г., млн т усл. топл.	–1,7	–0,5	–0,6
Изменение совокупной за период до 2050 г. дисконтированной стоимости энергоснабжения, млрд руб.	–4,4	–14,8	–41,3

рестройки является активное развитие электростанций на базе возобновляемых источников энергии, замещающих электроэнергию от тепловых электростанций. Ввод каждого дополнительного млн кВт АЭС с высоким КИУМ позволит снизить затраты на ввод нескольких млн кВт ветряных и солнечных электростанций, работающих с кратно более низким КИУМ. Таким образом, при усилении экологических ограничений дополнительное развитие АЭС обеспечивает не только экономию топливных, но и капитальных затрат в электроэнергетике. При этом последний фактор становится все более значимым.

Таким образом, подтвержденная модельными исследованиями эффективность более масштабного развития АЭС при рациональной корректировке существующих рыночных механизмов может привести к сокращению совокупных затрат потребителей на оптовом рынке электроэнергии и мощности относительно сценариев развития АЭС по Стратегии-2018 или ниже, что вкупе со снижением углеродоемкости производства электроэнергии создаст двойной выигрыш для экономики.

Последний раздел исследования выполнен при поддержке гранта РНФ (проект № 17-79-20354).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Распоряжение** Правительства РФ от 12.06.2017 № 1209-р «Об утверждении Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики на период до 2035 года» [Электронный ресурс]: Правительство РФ // URL: <http://static.government.ru/media/files/zzvuuhfq2f3OJIK8AzKVsrGibW8ENGp.pdf> (дата обращения 18.02.2021).
2. **Распоряжение** Правительства РФ от 9.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [Электронный ресурс]: Правительство РФ // <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110003> (дата обращения 18.02.2021).
3. **Проект** Стратегии долгосрочного развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [Электронный ресурс]: Министерство экономического развития РФ // URL: https://economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf (дата обращения 18.02.2021).
4. **Стратегия** развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года. М., ГК «Росатом», 2019.
5. **Адамов Е.О., Каширский А.А., Муравьев Е.В., Толстоухов Д.А.** Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетики при переходе к замыканию ядерного топливного цикла. — Изв. РАН. Энергетика, 2016, № 5, с. 14—32.
6. **Петров А.Ю., Шутиков А.В., Пономарев-Степной Н.Н. и др.** Перспективы создания двухкомпонентной ядерной энергетической системы. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2019, № 2, с. 5—15.
7. **Веселов Ф.В., Макарова А.С., Новикова Т.В. и др.** Конкурентные перспективы АЭС в формировании низкоуглеродного профиля российской электроэнергетики. — Энергетическая политика, 2017, № 3, с. 68—77.
8. **Веселов Ф.В., Хоршев А.А.** Оптимальные масштабы развития ядерной энергетики в ЕЭС России в период до 2050 г. — Атомная энергия, 2020, т. 228, вып. 5, с. 243—249.
9. **Макаров А.А., Филиппов С.П., Веселов Ф.В., Малахов В.А.** Предложения по развитию методики формирования среднесрочного прогноза спроса на электроэнергию с учетом динамики развития экономики страны и регионов России. — Энергорынок, 2013, № 5, с. 33—39.
10. **Приказ** Минэнерго России от 30.06.2020 № 508 «Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2020—2026 годы» [Электронный ресурс]: Министерство энергетики РФ // <https://minenergo.gov.ru/node/19166> (дата обращения 20.02.2021).
11. **Veselov F., Khorshev A.** Integrated modelling and information technology for strategic planning in the energy sector of Russia. — In: 2017 IEEE 11th Intern. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT). Moscow, 2017, p. 1—5.
12. **Макаров А.А., Веселов Ф.В., Елисеева О.А. и др.** SCANNER — модельно-информационный комплекс. М., ИНЭИ РАН, 2011.
13. **Climate Change and Nuclear Power.** Vienna: IAEA, 2020.
14. **Nuclear Power in a Clean Energy System.** Paris. IEA, 2019.

Поступила в Редакцию 16.03.21