

ОСОБЕННОСТИ И СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГНОЗОВ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ¹

Филиппов С.П., Веселов Ф.В.

Институт энергетических исследований РАН, Москва, Россия

info@eriras.ru, erifedor@mail.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены требования к формированию прогноза научно-технологического развития в энергетике России, предложена декомпозиция прогнозных задач по сопоставлению технологий и вариантов технологического облика ТЭК, определены приоритетные модельные инструменты для комплексной оценки эффектов технологического обновления для экономики.

Ключевые слова: технологии, научно-технологическое развитие, прогнозирование, топливно-энергетический комплекс, энергетическое производство, оптимизационные модели.

Введение

Энергетический комплекс (ТЭК) страны продолжает играть значительную роль в национальной экономике и формировании бюджета страны. Эффективность его развития для обеспечения энергетических нужд внутренних потребителей и конкурентоспособности в глобальной энергетической системе решающим образом зависит от выбора верной стратегии технологического обновления. Реализация климатической повестки и ориентация экономики на достижение углеродной нейтральности является еще одним важным фактором, влияющим на направления научно-технологического развития энергетического комплекса. В наибольшей степени это проявляется в сегментах электроэнергетики, теплоснабжения, новых энергоносителей, в сфере потребления электроэнергии.

Технологическое разнообразие в этих сегментах очень велико и включает в себя газовую и угольную электрогенерацию, в том числе низкоуглеродную, оснащенную технологиями улавливания CO₂, возобновляемую энергетику (солнечную, ветровую, геотермальную), распределенную генерацию, атомную энергетику, водородную энергетику и производные виды топлива, биоэнергетику, тепло- и газоснабжение, новую электрификацию. Оценка потенциальной роли этих технологических направлений в энергетике страны должна строиться на совокупности данных о состоянии и перспективах совершенствования технологий, динамике и структуре спроса на топливо и энергию, доступных ресурсов для инвестиций и приемлемых ценах на энергетическую продукцию.

Разработка прогноза НТР в части технологического обновления энергетического комплекса должна стать интегрирующей основой для нескольких документов стратегического планирования, обеспечивая непротиворечивость целей развития, энергетической безопасности и актуальных планов декарбонизации экономики. В сфере научно-технологического развития важно выделять уровни собственно долгосрочного прогнозирования возможностей, стратегического целеполагания, планирования ресурсов и программирования действий. В этой связи представляется актуальной разработка концептуально-методологических подходов, позволяющих получить научно обоснованные (опирающиеся на эффективные методы и подкрепленные комплексными энергетическими и экономическими расчетами) параметры технологического обновления ТЭК России в современных экономических условиях.

1. Особенности разработки прогноза НТР в сфере энергетики

Важнейшей научной задачей прогноза НТР в сфере энергетики является системное обоснование темпов и масштабов технологического обновления энергетического комплекса страны, а также выбор приоритетных технологий, обеспечивающих такое обновление, исходя из совокупности требований:

1) надежности и гарантированности снабжения внутренних потребителей различными видами топлива и энергии (при увеличении общего объема энергетических потребностей страны вследствие экономического роста и при изменении структуры этих потребностей по видам топлива и энергии под влиянием экономически обоснованных масштабов энергосбережения и энергозамещения);

2) обеспечения конкурентоспособности российского энергетического экспорта на рынках традиционных энергоносителей (газ, нефть и нефтепродукты, энергетический и коксующийся уголь) и

¹ Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ (проект № 21-79-30013)

при выходе на рынки новых энергоносителей (водород и проч.), а также на рынки электроэнергии (при развитии проектов межгосударственной кооперации в электроэнергетике);

3) экономической доступности энергоснабжения, т.е. приемлемой для экономики стоимости топлива и энергии, не приводящей к сдерживанию экономического роста, снижению уровня и качества жизни населения, потере глобальной конкурентоспособности российской экономики [1];

4) технологической независимости развития энергетики на основе отечественных научных разработок, конструкторских решений и собственного производства оборудования, создающей, помимо вклада в надежность энергообеспечения, мощный мультипликативный эффект для промышленности и экономики страны в целом [2];

5) ограничения экологического воздействия, как по локальным загрязнителям, так и по эмиссии парниковых газов (ПГ); в последнем случае, как показывает опыт Евросоюза и ряда других развитых стран, цели и приоритеты национальных стратегий по декарбонизации экономики, планы по достижению углеродной нейтральности (нетто) могут стать важнейшим стимулом НТР в энергетике.

Многообразие конкурирующих между собой (альтернативных) технологий энергопроизводства (включая получение новых энергоносителей) и энергопотребления (включая технологии хранения энергии) предопределяет необходимость системного подхода к формированию прогноза НТР и применению специального модельного инструментария для решения следующей совокупности задач:

Задача (1) предусматривает анализ и сравнение широкого множества альтернативных технологий (и реализующих их частных технических решений) и выбор из них ограниченного множества наиболее экономически эффективных (приоритетных).

Методической базой решения этой задачи является сопоставление энергетических технологий с различными технико-экономическими характеристиками² по показателям удельной стоимости производства энергии³ (для технологий энергопроизводства) или по показателю удельной стоимости владения (для технологий энергопотребления). Значения данных показателей определяются на основе дисконтирования потока капитальных и эксплуатационных затрат с учетом срока строительства и эксплуатации технологии; при необходимости, учитываются дополнительные капитальные затраты для продолжения эксплуатации⁴ и остаточная стоимость объектов.

Сравнение по экономической эффективности производится, во-первых, для различных технических решений, реализующих некоторую энергетическую технологию, например:

- варианты газовых турбин сопоставимой единичной мощности, но различающиеся показателями КПД, ресурсом эксплуатации, удельными капиталовложениями;
- варианты солнечных электростанций на базе фотоэлектрических панелей с разным КПД преобразования, капиталоемкостью, а также с различным коэффициентом использования мощности (КИУМ) за счет изменения направленности;
- варианты электрохимических накопителей с использованием различных материалов или компоновки.

Во-вторых, с учетом выбранных на предыдущей стадии одного или нескольких наилучших технических решений для реализации отдельных энергетических технологий проводится сопоставление уже самих классов альтернативных технологий энергопроизводства или энергопотребления, обладающих одинаковой функциональностью в системе энергообеспечения. Примеры таких функциональных классов представлены в таблице 1.

В ходе сравнения альтернативных новых технологий определяются условия, при которых они становятся конкурентоспособными с «реперными» (уже достигшими зрелости и ставшими традиционными, наиболее распространенными) технологиями в своем функциональном классе. Например, в качестве реперных технологий производства электроэнергии могут рассматриваться парогазовые блоки, для технологий накопления – ГАЭС, для технологий транспорта – бензиновые легковые, дизельные грузовые автомобили и автобусы.

Конкурентоспособность альтернативной новой технологии (относительно «реперной») может быть достигнута за счет (а) улучшения технико-экономических характеристик, (б) изменения соотношения цен энергоресурсов, используемых альтернативной и «реперной» технологиями, (в) введения

² капитальных и эксплуатационных затрат, сроков строительства и эксплуатации, показателей эффективности преобразования энергии и режимов использования мощности

³ как правило используется показатель удельных приведенных (дисконтированных) затрат (аналогичный термину *levelized cost*)

⁴ например, замена газовой турбины для ПГУ, замена стэков электролизеров при производстве водорода

углеродных платежей. Таким образом, уже при решении первой задачи могут быть обоснованы варианты повышения экономической эффективности применения приоритетных энергетических технологий, как за счет факторов НТП, так и за счет и внешних условий: параметров ценовой политики на внутренних рынках топлива и энергии, а также экономических мер углеродного регулирования. Дисконтирование затрат при экономическом сравнении позволяет также предварительно оценить влияние стоимости капитала на конкурентоспособность новых технологий.

Таблица 1 – Примеры альтернативных технологий в различных функциональных классах

Функциональный класс технологий	Перечень альтернативных новых технологий	
	Используемый энергоресурс	Технология преобразования
Производство электроэнергии (генерация с гарантированной мощностью)	Газ	Парогазовые блоки (+CCS*)
	Метано-водородная смесь	Газотурбинные блоки (+CCS)
	Уголь	Паросиловые блоки на разные параметры пара (+CCS) Парогазовые блоки с газификацией угля (+CCS)
	Атомная энергия	Крупноблочные АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах АЭС малой мощности
	Гидроэнергия	ГЭС
	Геотермальная энергия	ГеоТЭС
	Волновая энергия	Приливные ЭС
Производство тепловой энергии	Водород	Топливные элементы
	Ветровая энергия	Ветряные электростанции разной мощности (в т.ч. в комплексе с накопителями)
	Солнечная энергия	Фотовольтаические электростанции разной мощности (в т.ч. в комплексе с накопителями)
	Газ, уголь, биомасса, биогаз	Водогрейные котлы (в т.ч. в комплексе с накопителями тепла)
	Электроэнергия	Электродкотлы (в т.ч. в комплексе с накопителями тепла), системы прямого электронагрева, тепловые насосы
	Солнечная энергия	Системы прямого нагрева (в т.ч. в комплексе с накопителями тепла)
	Геотермальная энергия	Геотермальные станции теплоснабжения
Комбинированное производство электро- и тепловой энергии	Атомная энергия	Атомные станции теплоснабжения (АСТ)
	Газ, биогаз	Парогазовые ТЭЦ (+CCS*)
	Метано-водородная смесь	Газотурбинные ТЭЦ (+CCS)
	Уголь, биомасса	Паросиловые блоки ТЭЦ (+CCS)
	Атомная энергия	АТЭЦ на базе АЭС малой мощности
Производство водорода	Геотермальная энергия	ГеоТЭЦ
	-	Варианты отдельной схемы энергоснабжения «электростанция + котельная или электродкотельная»
Производство водорода	Электроэнергия	Электролизеры Протонно-обменные мембраны
	Газ	Паровая конверсия (+CCS) Паровая конверсия с теплом от АЭС с ВТГР Пиролиз
Автомобильный транспорт	Бензин Дизельное топливо, Биодизель Газомоторное топливо Электроэнергия Водород	Использование в разных типах транспорта: Легковые автомобили Коммерческий грузовой транспорт Крупный грузовой транспорт Городской пассажирский транспорт (автобусы)
Накопители электроэнергии	-	Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) Электрохимические накопители разного типа Накопители электроэнергии с производством водорода и обратным преобразованием

Примечание - * рассматривается технология без улавливания CO₂ и с улавливанием

Задача (2) предусматривает формирование альтернативных вариантов технологического обновления энергетики страны, различающихся составом и масштабами применения новых технологий в энергопроизводстве и энергопотреблении.

Внешними условиями при решении этой задачи являются прогнозы спроса конечных потребителей на различные виды топлива и энергии, сформированные в увязке с прогнозом социально-экономического развития страны [3] и учитывающие изменение отраслевой структуры экономики (в том числе динамики выпусков и инвестиций по видам экономической деятельности – ВЭД), численности и динамики доходов населения. Базовым принципом прогнозирования при этом является разделение экономических (производственных) и энергетических переменных, влияющих на энергопотребление:

- экономические переменные (выпуски продукции и т.п.) являются экстенсивными и определяют масштабы развития секторов экономики;
- энергетические переменные (энергоёмкости) являются интенсивными и характеризуют интенсивность потребления энергоносителей соответствующими ВЭД; изменение значений энергоёмкостей в динамике также определяется прогнозом экономических переменных (накопленных инвестиций, влияющих на масштабы технологического обновления и темпы повышения энергоэффективности и энерговооруженности в отраслях сектора конечного потребления).

Варианты изменения технологической структуры по каждому существующему отраслевому сегменту энергетического комплекса формируются с учетом:

- данных о существующей технологической структуре энергопроизводства (энергопотребления) и принимаемых допущений о темпах выбытия существующих мощностей (по истечении нормативного срока службы, с учетом его возможного продления или, напротив, ускоренное выбытие для замещения новыми технологиями);
- состава приоритетных технологий в соответствующем отраслевом сегменте и допущений о темпах их развития для замещения существующих мощностей; при этом принимаются во внимание как ожидаемые сроки достижения этими технологиями уровня готовности к серийному использованию, так и возможные ограничения по темпам наращивания производства необходимого оборудования и строительства объектов (по условиям размещения, обеспеченности ресурсами и материалами, темпам производства оборудования в промышленности и проч.).

Важно отметить, что сформированные варианты изменения технологической структуры могут быть как технологически диверсифицированными, так и предусматривать приоритетность различных технологических направлений, что позволяет далее сопоставить экономические последствия того или иного выбора при прохождении «технологических развилок». Примерами «технологических развилок» являются:

- в электроэнергетике – расширенное по объемам технологическое обновление тепловых электростанций (парогазовые технологии, высокоэкономичные угольные блоки) или последовательное замещение тепловой генерации нетопливными типами электростанций, где также приоритетными могут рассматриваться технологии атомной энергетики или ВИЭ;
- в теплоснабжении – развитие ко-генерации, как альтернативы отдельной схеме энергоснабжения, а также расширенное применение электроотопления (на базе крупных или распределенных источников);
- в транспорте – переход с нефтяного на газомоторное топливо, а также замещение парка автомобилей на нефтяном моторном топливе электро- или водородомобилями.

Дополнительные внешние условия, связанные с реализацией национальной стратегии развития с низким выбросом парниковых газов, целями по достижению углеродной нейтральности, будут существенно «сдвигать» приоритеты НТР в пользу технологий, снижающих совокупную эмиссию парниковых газов, а также формировать новые «технологические развилки». Прежде всего, имеется в виду выбор между интенсивным замещением органического топлива в электроэнергетике через технологии атомной, гидро- и возобновляемой энергетики или ориентация на технологии «чистой» теплоэнергетики – развитие тепловых электростанций, оснащенных системами улавливания CO₂ (CCS).

Задача (3) предусматривает оценку по каждому из альтернативных вариантов сопутствующих системных эффектов – дополнительных мер, обеспечивающих адаптацию отраслевых сегментов ТЭК к массовому появлению тех или иных новых технологий. Примеры таких системных эффектов для некоторых классов технологий представлены в таблице 2. При этом для некоторых технологий возникающие системные эффекты требуют итеративной корректировки результатов задачи 2.

Например, при глубокой электрификации в коммунальной и мобильной энергетике требуется изменение масштабов развития электростанций для обеспечения дополнительного спроса на электроэнергию (см. рисунок 1).

Таблица 2 – Характеристика системных эффектов для отдельных классов энергетических технологий

Технология	Системные эффекты в электроэнергетике и теплоснабжении	Системные эффекты в топливных отраслях
Электростанции на базе ВИЭ (ветряные и солнечные)	увеличение объемов резервной мощности изменение графика нагрузки, требующее повышения регулировочных возможностей за счет (а) повышения маневренности существующих блоков ТЭС (включая ТЭЦ), (б) развития пиковых источников электроэнергии, (в) развития накопителей электроэнергии разного типа (включая ГАЭС) изменение режимов работы оборудования ТЭС усиление распределительной сети для выдачи мощности от ВИЭ-электростанций и балансирования перетоками, рост потерь из-за роста объемов передачи	снижение спроса на котельно-печное топливо со стороны электростанций
Атомные электростанции	изменение режимов работы оборудования ТЭС развитие ГАЭС и других накопителей электроэнергии для дополнительной минимальной нагрузки усиление магистральной сети для выдачи мощности от АЭС	снижение спроса на котельно-печное топливо со стороны электростанций
Распределенная газовая ко-генерация	усиление распределительной электрической сети для выдачи мощности и управления двухсторонними перетоками малых ТЭЦ снижение объемов магистрального транспорта электроэнергии и масштабов развития магистральной сети	усиление газораспределительной инфраструктуры для топливоснабжения малых ТЭЦ
Производство водорода	дополнительный спрос на электроэнергию и пиковую мощность при использовании электролиза или мембранных технологий (РЕМ)	дополнительный спрос на газ при получении из метана (конверсия, пиролиз)
Газомоторный транспорт	-	снижение спроса на моторное нефтепродукты дополнительный спрос на газ усиление газораспределительной инфраструктуры
Электротранспорт	дополнительный спрос на электроэнергию и пиковую мощность изменение графика нагрузки, требующее повышения регулировочных возможностей за счет (а) повышения маневренности существующих блоков ТЭС (включая ТЭЦ), (б) развития пиковых источников электроэнергии, (в) развития накопителей электроэнергии разного типа (включая ГАЭС) усиление распределительной электрической сети для развития зарядной инфраструктуры	снижение спроса на моторное нефтепродукты
Электрификация теплоснабжения	дополнительный спрос на электроэнергию и пиковую мощность усиление распределительной электрической сети (при использовании распределенных электробойлеров и тепловых насосов)	снижение спроса на котельно-печное топливо со стороны котельных и в частных домовладениях

Задача (4) предусматривает оценку совокупных дисконтированных затрат на реализацию рассматриваемых вариантов технологического обновления (с учетом дополнительных затрат или экономии за счет сопутствующих системных эффектов). Сравнение затратных характеристик сформированных вариантов позволяет (а) оценить экономические последствия выбора той или иной системы приоритетов при технологическом обновлении энергетики и ее отдельных отраслей и выбрать

экономически наилучший (рекомендуемый) вариант, (б) оценить чувствительность затрат на реализацию этого варианта при изменении внешних факторов, (в) исследовать возможности (и приростные затраты) для адаптивного перехода к следующему по эффективности варианту развития при существенном изменении внешней среды.

В случае если экономическое сравнение вариантов проводится совместно с анализом достигаемых результатов по снижению выбросов парниковых газов, выбор рекомендуемого варианта может осуществляться по двум критериям, при этом могут быть оценены удельные средние или приростные затраты (инвестиционные или полные) на дополнительное снижение выбросов при переходе от одного варианта к следующему, обеспечивающему большее снижение выбросов (см., например, [4]).

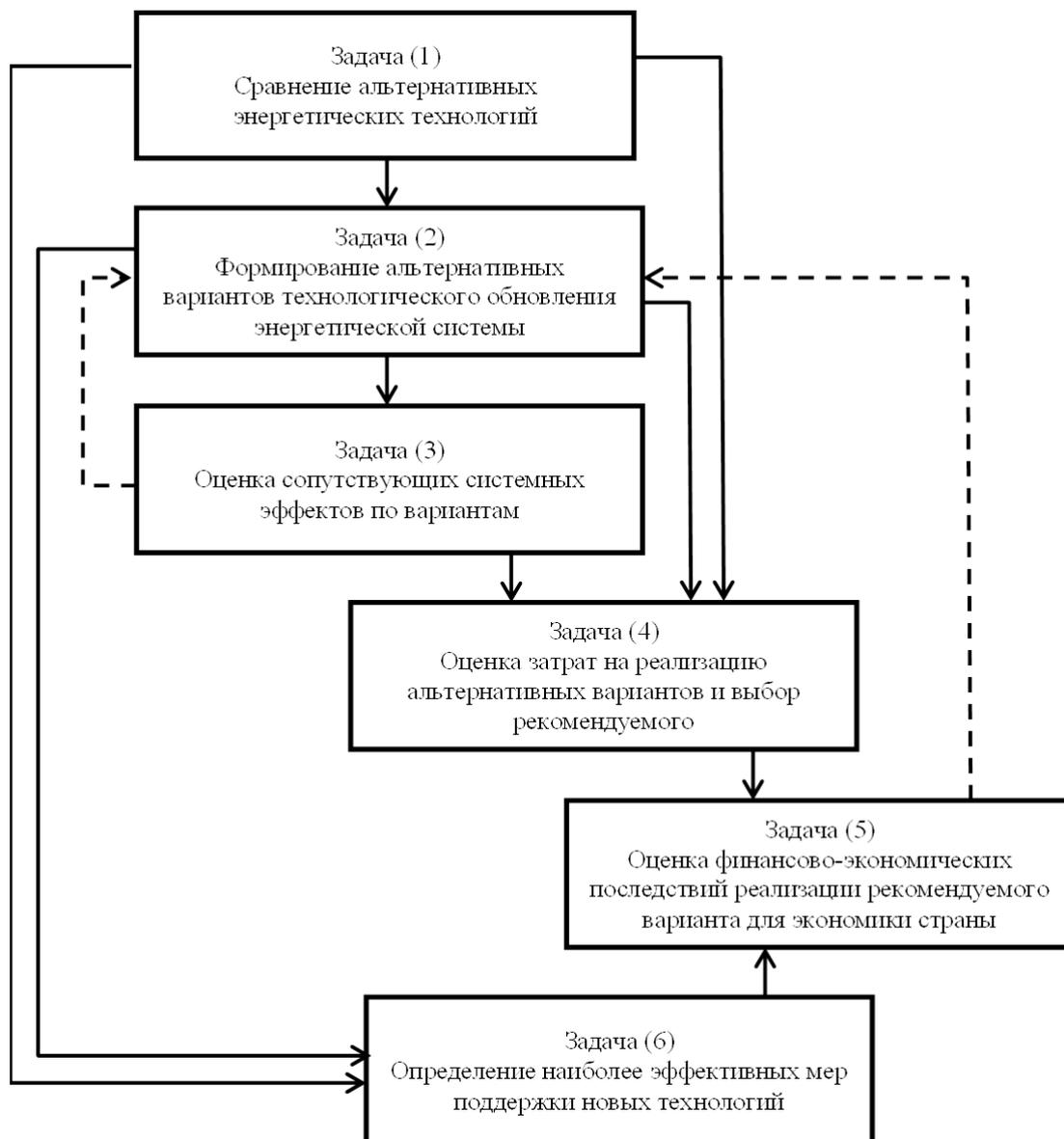


Рис. 1 – Взаимосвязь задач формирования прогноза НТР по направлению, связанному с технологическим обновлением энергетического комплекса

Задача (5) предусматривает оценку финансово-экономических последствий реализации выбранного варианта технологического обновления энергетики для экономики страны, включая инвестиционную нагрузку, рост энергетических затрат потребителей, вклад в формирование бюджета и общий рост ВВП.

Решение этой последней задачи реализует важнейшую «обратную связь» между прогнозами развития экономики и энергетики и позволяет сбалансировать параметры прогнозов НТР в энергетике (в целом или в отдельных отраслевых сегментах ТЭК) и социально-экономического развития, обеспечить «посильность» динамики и масштабов технологических изменений в энергетике для динамики экономического развития. Результаты такого согласования могут потребовать итеративной

корректировки параметров выбранного наилучшего варианта технологического обновления энергетики (или перехода к другому варианту, имеющему приемлемые финансово-экономические последствия). Опыт проведения подобных согласований показывает [5, 6], что наиболее критическим параметром прогноза НТР является слишком высокий уровень инвестиционной нагрузки на экономику (чрезмерная капиталоемкость). Другой проблемой может быть слишком высокий рост энергетических затрат у потребителей, также вызванный необходимостью окупаемости инвестиций в масштабное технологическое обновление. В большинстве сценариев рост расходов потребителей топлива и энергии в ближайшие 10 - 20 лет может оказывать угнетающее действие на возможности их собственного развития и технологического обновления, а значит, и на их конкурентоспособность и вклад в ВВП. Отрицательные последствия этого роста далеко не всегда компенсируются за счет снижения стоимости энергообеспечения в более долгосрочной перспективе (25 – 30 лет) – при том, что снижение начинается от более высокого, а не отчетного уровня затрат.

Еще одним потенциальным ограничивающим фактором для развития новых технологий в электроэнергетике и теплоснабжении является влияние на топливные отрасли. Электростанции и котельные являются крупнейшими внутренними потребителями топлива, поэтому технологическое обновление в этих отраслевых сегментах энергетики страны, сопровождающееся снижением потребления угля и газа за счет повышения энергоэффективности установок и замещения нетопливными ресурсами, может вызвать стагнацию и спад в топливных отраслях. Аналогичная ситуация может возникнуть при массовом замещении нефтетоплива на транспорте газом, электроэнергией, водородом и другими новыми энергоносителями. Подобные последствия, как показано в таблице 1, представляют собой отдельный вид межотраслевых системных эффектов, и в полной мере их последствия оцениваются при решении последней задачи (задачи 5) согласования прогнозов НТР в энергетике (по всем отраслевым сегментам ТЭК) и прогнозов социально-экономического развития страны.

Успешное решение всех перечисленных выше задач с (1) по (5) позволяет говорить о согласованных параметрах и приоритетах прогноза НТР, не противоречащих параметрам развития экономики в целом. Однако для практической реализации прогноза необходимо обеспечить финансово-экономические условия для инвестиционной привлекательности каждой приоритетной технологии, ее массового применения энергетическими компаниями и(или) потребителями.

Как правило, существующие ценовые параметры и структура внутренних рынков топлива, электроэнергии и тепла в России не обеспечивают окупаемости инвестиционных проектов на базе новых технологий. Выбор наиболее эффективных мер поддержки новых технологий является еще одной научной задачей при формировании прогноза НТР. При решении этой задачи (6) можно выделить несколько типов мер повышения инвестиционной привлекательности таких проектов с новыми технологиями:

1). Меры по обеспечению стабильной и адекватной условиям окупаемости выручки проекта за счет гарантированной продажи продукции по цене «выше рыночной» (льготные тарифы, надбавки над рыночной ценой и проч.). Важным является также освобождение проектов с головными образцами от штрафов за сдвиг сроков ввода производственных мощностей или их более низкой готовности.

2). Меры по снижению расходной части проектов, использующих приоритетные технологии, за счет государственного со-финансирования инвестиций или субсидирования процентных ставок по привлеченным кредитам, налоговых льгот (что особенно важно для проектов в топливных отраслях, где велика доля налоговой составляющей в проектных расходах), льготных условий по предоставлению земли, использованию воды, подключению к энергетической инфраструктуре.

3). Меры дискриминации традиционных технологий в пользу приоритетных, такие как пересмотр технических требований, ограничение по применению традиционных технологий, более жесткие экологические ограничения, а также введение квотирование выбросов парниковых газов или углеродных платежей.

Проработка наиболее эффективных мер поддержки, как правило, выполняется индивидуально для каждой приоритетной технологии, исходя из того, какой разрыв ожидается между необходимой для окупаемости и ожидаемой «с рынка» выручки и соответствующей прибыли. Однако итоговые решения о запуске механизмов повышения инвестиционной привлекательности для той или иной технологии требуется принимать пакетно, исходя из интегральной оценки общего объема финансовой (в том числе бюджетной) поддержки по всему портфелю приоритетных технологий (с учетом ожидаемых масштабов их развития), анализируя затраты и выгоды (включая мультипликативные эффекты) на макроэкономическом уровне.

2. Методы и инструменты разработки прогноза НТР в сфере энергетики

Решение задач, рассмотренных в разделе 3.1, требует применения целой совокупности расчетных средств, включая как простые имитационные модели для экономических расчетов, так и сложные оптимизационные экономико-математические модели (в том числе межотраслевые), при помощи которых исследуются особенности развития и функционирования энергетики и ее отраслевых сегментов. Объединенные между собой информационными потоками и использующие единые базы данных по технико-экономическим характеристикам технологий энергопроизводства и энергопотребления, эти расчетные средства формируют модельно-информационный комплекс (МИК), обеспечивающий формирование прогноза НТР в энергетике.

Как было отмечено выше, для решения задачи (1) по сравнению альтернативных энергетических технологий традиционно используются имитационные модели расчета дисконтированной стоимости и удельных затратных характеристик. В зависимости от решаемой задачи, в расчет стоимости включаются углеродные платежи.

Для технологий энергопроизводства показатель удельной стоимости представляет собой постоянную во времени цену энергетической продукции, обеспечивающую безубыточность производства (нулевой чистый дисконтированный доход) за весь жизненный цикл технологии [см. примеры расчетов в 7, 8, 9, 10, 11]. Для технологий энергопотребления, например, для различных видов транспорта традиционно, выполняется с помощью показателя полной стоимости владения за его жизненный цикл (англ. – total cost of ownership, TCO). Эта методическая концепция активно используется, как минимум, с начала 1990-х гг. и позволяет наглядно сопоставлять между собой совокупный (за весь жизненный цикл) объем затрат, связанных с приобретением однородных с точки зрения функциональности, но технологически разных товаров или услуг [12]. Расчеты и анализ решений в рамках задачи (1) могут быть реализованы на базе MS Excel или аналогичных программных средств, включая реализацию в виде «калькуляторов затрат» в сети Интернет с доступом в онлайн-режиме (см., например, калькуляторы стоимости производства электроэнергии [13] и стоимости владения автотранспортом [14] на сайте IEA).

Задачи (2)–(4) предполагают последовательное выполнение работ по формированию альтернативных вариантов технологического облика отраслей энергетики, оценки сопутствующих системных энергетических эффектов с выходом на итоговую оценку необходимых инвестиционных и полных затрат на их реализацию. При решении этих задач учитываются:

- резкий рост разнообразия энергетических технологий в каждом сегменте отраслевого топливно-энергетического комплекса;
- расширение технологических возможностей для межтопливной конкуренции в энергопроизводстве и энергопотреблении, в том числе между традиционными и новыми энергоносителями, прежде всего - безуглеродными;
- влияние различных механизмов углеродного регулирования на условия этой межтопливной конкуренции (дискриминацию одних технологий и стимулирование других).

Формирование нескольких качественно различных по технологической структуре допустимых вариантов⁵ принципиально может быть выполнено в режиме имитационных расчетов. Однако в современных условиях согласование возможностей для технологического обновления каждого отраслевого сегмента ТЭК в треугольнике целей «энергоснабжение, экономическая эффективность, декарбонизация» требует более мощного, оптимизационного инструментария, позволяющего повысить оперативность формирования многовариантных прогнозов

Переход от имитационных к оптимизационным методам прогнозирования позволяет перейти от анализа точечных решений к исследованию всей области допустимых решений, автоматизировать поиск наилучшего из возможных вариантов. При выборе целевой функции модели (отражающей критерий оптимальности) в виде суммарных дисконтированных затрат на обеспечение заданных энергетических потребностей задача (4) интегрируется в процесс поиска оптимального решения при формировании вариантов технологического обновления.

Масштабность задачи перспективного развития и технологического обновления ТЭК, особенности применения отдельных технологий, влияние региональных факторов на межтопливную конкуренцию делают целесообразным использовать совокупность оптимизационных моделей, каждая из которых

⁵ например, варианты с интенсивной электрификацией, интенсивным использованием биотоплива, с интенсивным развитием ВИЭ, с максимизацией вклада технологий улавливания CO₂ и т.д., включая также и комплексные варианты, сочетающие приоритетные технологии в заданных пропорциях

имеет свою функциональную направленность. Возможной (но не единственной) является следующая триада модельных инструментов:

1) Модель для межотраслевой оптимизации технологической перестройки ТЭК страны на основе системы энергетических балансов. С помощью этой модели могут быть оценены энергетические и затратные характеристики альтернативных вариантов развития энергетического комплекса с различными приоритетами технологического обновления, а также определены оптимальные параметры его технологического облика с учетом:

- сценарно задаваемой базовой динамики внутреннего и экспортного спроса на все основные виды ТЭР в целом по стране или нескольким макрорегионам;
- укрупненного представления внутригодовых режимов энергопроизводства и энергопотребления;
- эффективных объемов энергозамещения (в энергопроизводстве и энергопотреблении), уточняющих базовую динамику спроса;
- введения квот или платы за выбросы парниковых газов; первые отображаются в виде дополнительных ограничений оптимизационной задачи, вторые – в виде дополнительных слагаемых в целевой функции;
- минимизации суммарных дисконтированных затрат на энергоснабжение экономики.

В рамках межотраслевой оптимизации оцениваются системные эффекты в части влияния на структуру энергобаланса изменений (роста/снижения) спроса по разным видам ТЭР в результате энергозамещения.

2) Модель оптимизации технологического обновления и территориальной структуры электроэнергетики и теплоснабжения позволяет детализировать и уточнить решения, полученные на межотраслевой модели, в части объемов и технологий производства электроэнергии и тепла, с учетом дополнительного спроса, который формируется эффективными объемами электрификации, определенными на предыдущей стадии модельных расчетов.

Данная модель охватывает балансовыми ограничениями лишь два энергоносителя: электроэнергию и централизованное тепло, а критерием оптимальности является минимум суммарных дисконтированных затрат на электро- и теплоснабжение потребителей. Вместе с тем, модель обеспечивает более высокую технологическую и региональную детализацию производственной структуры, в том числе позволяет учесть разницы в ценах топлива и эксплуатационных характеристиках технологий. В модели рассматривается более подробно спектр новых технологий, в том числе разных классов единичной мощности (включая распределенную энергетику). Функциональные возможности модели позволяют исследовать:

- влияние различных сценариев ценовой политики на рынках топлива на эффективность различных направлений технологического обновления электростанций и котельных;
- системные эффекты в части дополнительного развития генерирующих мощностей, магистральной (и, укрупненно, распределительной) электрической сети, например, при активном развитии ВИЭ, масштабной электрификации, активном освоении гидропотенциала восточной части России и т.д.;
- влияние углеродного регулирования в виде целевых требований по снижению выбросов CO₂ или введения углеродных платежей.

Модель позволяет также оценить масштабы системных эффектов в части дополнительного развития генерирующих мощностей и магистральной электрической сети при увеличении спроса на электроэнергию или приоритетного развития отдельных типов электростанций.

3) Модель оптимизации внутригодовых режимов энергопроизводства и энергопотребления уточняет системные эффекты решений, полученных при оптимизации годовых балансов электроэнергии и централизованного тепла, с учетом сезонной, недельной, внутрисуточной (почасовой) неравномерности энергетических нагрузок, доступности и возможностей использования генерирующих мощностей.

Развитие ряда новых технологий производства и потребления электроэнергии существенно усложняет балансирование производства и потребления электроэнергии. Так, при увеличении доли ВИЭ-электростанций с нерегулируемым режимом работы растут риски небаланса в отдельные часы, связанные с недостаточным запасом регулировочного диапазона в электроэнергетической системе (энергосистеме). Это может приводить к вынужденному ограничению выдачи мощности ветряных и солнечных электростанций или к вынужденному ограничению энергоснабжения части потребителей при невозможности компенсировать дефицит мощности быстрым набором нагрузки другими типами электростанций или накопителями [15].

При замещении органического топлива электроэнергией на транспорте, в отоплении и иных сферах в энергосистеме появляются новые типы потребителей с уникальными графиками

электропотребления. С увеличением масштабов электрификации такие потребители будут все сильнее влиять не только на годовые объемы спроса, но и на график электрических нагрузок энергосистемы. Анализ различных по интенсивности сценариев развития электротранспорта, выполненный в ИНЭИ РАН, показал, что к 2050 году годовой объем спроса на электроэнергию дополнительно может увеличиться на 170 – 460 млрд кВт·ч [16]. При этом даже в наиболее консервативном сценарии максимум нагрузки энергосистемы увеличится на 26 – 32 млн кВт (в зависимости от режимов использования зарядной инфраструктуры). Различия в структуре парка электротранспортных средств, в структуре зарядных станций и поведенческих особенностях пользователей электротранспорта будут сильно влиять на график электрических нагрузок (а значит, потребуют различных усилий и затрат по его обеспечению со стороны энергосистемы).

Электрификация теплоснабжения также оказывает значительное влияние на изменение годового графика электропотребления, но в большей мере не в суточном, а в сезонном разрезе из-за отопительной тепловой нагрузки. В случае замещения части тепла от ТЭЦ или котельных на топливе отпуском от электрокотельных в энергосистеме появится новый потребитель электроэнергии с явно выраженной сезонностью спроса.

Для исследования влияния технологических изменений в энергетике на внутригодовые режимы энергопроизводства и энергопотребления наиболее часто в мировой практике применяются оптимизационные модели, укрупненно описывающие процесс коммерческой диспетчеризации электрогенерирующих мощностей и накопителей электроэнергии в течение календарного года [17]. При моделировании формируются оптимальные балансы электроэнергии на каждом временном интервале, выделяемом внутри года⁶. Коммерческий аспект оптимизации определяется выбором целевой функции, отражающей суммарные переменные затраты, обеспечивающие необходимый объем энергопроизводства за весь год. Оптимальное решение соответствует минимальному значению этой функции. Система балансовых уравнений может быть расширена на другие сетевые ТЭР (централизованно отпускаемое тепло и газ) с тем, чтобы одновременно учесть сезонные неравномерности их производства и потребления (с включением соответствующих затрат в целевую функцию).

В результате почасового балансирования производства и электрических нагрузок решения по перспективной структуре производства электроэнергии и централизованного тепла дополняются оценками объемов высокоманевренных генерирующих мощностей и накопителей электроэнергии (при необходимости - также накопителей тепла и подземных хранилищ газа) для оперативного и сезонного балансирования режимов производства и потребления.

Для решения задачи (5) по оценке финансово-экономических последствий реализации рекомендуемого варианта для экономики страны требуется, во-первых, определить инвестиционные и полные финансовые потребности каждой из отраслей ТЭК или даже подотраслей, в т.ч. необходимая валовая выручка (НВВ), и структура внешних и собственных инвестиционных ресурсов). С другой стороны, при решении задачи (6), для оценки необходимости, объемов и экономических механизмов поддержки технологического обновления необходимые финансовые потребности сопоставляются с прогнозными объемами выручки (ПВВ) и доступных инвестиционных ресурсов при существующих условиях работы энергетических рынков (их структуры, принципов ценообразования) или при задаваемых сценариях изменения цен на энергетическую продукцию рассматриваемых отраслей. В случае прогнозного дефицита финансирования могут рассматриваться дополнительные меры налоговой, кредитной, тарифной и проч. поддержки, которые повышают финансовую обеспеченность отрасли в целом или ее отдельных составляющих (например, отдельных типов электростанций, отдельных категорий электротранспорта и проч.). Пример такого обоснования для мер поддержки проектов технологического обновления тепловых электростанций рассмотрен в [18].

Для оценки финансово-экономических условий реализации прогнозов технологического обновления отраслей ТЭК применяются специальные имитационные расчетные модели. Общая структура такой модели (состав переменных и взаимосвязи между ними) одинакова для любой отрасли ТЭК, так как опирается на стандартные формы финансовой отчетности: отчет о прибылях и убытках, отчет о движении средств, баланс активов и пассивов. Таким образом, финансово-экономический прогноз связывает расчетные значения переменных себестоимости, валовой и чистой прибыли, налоговых и процентных платежей, результаты операционной, инвестиционной и финансовой деятельности, структуру собственных и внешних ресурсов для финансирования капиталовложений,

⁶ в настоящее время в большинстве случаев для решения подобных задач используются часовые интервалы – 8760 за год

динамику основных производственных средств и незавершенного строительства с накопленными объемами собственного и заемного капитала, позволяет определить значения показателей финансовой устойчивости, например: отношение долга к EBITDA, соотношение собственных и заемных средств, рентабельность активов.

Прямая задача, решаемая для каждой отрасли топливно-энергетического комплекса (или подотрасли), предполагает оценку финансовой обеспеченности объемов капиталовложений, необходимых для реализации оптимальной производственной и инвестиционной программы при различных вариантах ценовой политики, которые задаются динамикой изменения внутренних и экспортных цен на энергетическую продукцию отрасли⁷. На основе информации о динамике цен, а также прогнозов производства и поставки разных видов энергетической продукции на внутренние и экспортные рынки определяется динамика прогнозной валовой выручки (ПВВ). Далее, исходя из прогноза ПВВ, формируется перспективный финансовый план отрасли и оценивается дефицит или избыток денежных ресурсов относительно необходимого объема инвестиций. Именно при решении прямой задачи может выполняться анализ вариантов адаптации прогноза технологического обновления каждой отрасли к ожидаемой долгосрочной ценовой конъюнктуре за счет корректировки инвестиционных планов или применения специальных ценовых, налоговых, кредитных и проч. механизмов поддержки со стороны государства.

Обратная задача, наоборот, заключается в оценке объема необходимой валовой выручки (НВВ) на основе заданной производственной программы и состава инвестиционных решений, определяющих потребность в капиталовложениях, а также целевых показателей финансовой устойчивости. Последние играют роль лимитов для возможностей использования заемного капитала для финансирования намеченных инвестиционных программ. Иными словами, в ходе решения обратной задачи определяется минимально необходимый объем выручки в отрасли (или подотрасли), позволяющий реализовать запланированный объем инвестиционной программы при соблюдении целевых показателей доходности и финансовой устойчивости бизнеса.

Финансовая оценка выполняется для всех «традиционных» отраслей: газовой нефтяной промышленности (с нефтепереработкой), угледобычи, электроэнергетики (по технологическим составляющим: теплоэнергетики, атомной, гидро- и возобновляемой энергетики, электросетевому комплексу). Для новых отраслей, таких как водородная энергетика, также целесообразна разработка отдельных финансово-экономических моделей для оценки необходимых уровней стоимости продукции на внутреннем рынке.

Результаты расчетов отраслевых финансово-экономических моделей должны в достаточной мере обеспечить представление экономических последствий для их адекватного учета в моделях межотраслевого баланса [19, 20], позволяющих оценить итоговое влияние выбранных направлений и темпов технологического обновления и перестройки энергетики страны на показатели прогноза ее социально-экономического развития. По результатам оценок может выполняться дополнительная корректировка прогнозных параметров развития отраслей ТЭК, приоритетов и темпов их технологического обновления, изменений в структуре энергетического баланса.

3. Заключение

Прогнозирование научно-технологического развития национальной энергетики является важной частью системы стратегического планирования. При этом важно выделять уровни собственно долгосрочного прогнозирования возможностей, стратегического целеполагания, планирования ресурсов и программирования действий.

Будущий технологический облик энергетики определяется набором разнородных требований, включая доступность и надежность энергоснабжения, технологическую независимость, глобальную конкурентоспособность энергопроизводства. Все большую роль играют экологические и климатические требования, связанные с декарбонизацией экономики.

Системный подход к формированию прогноза НТР позволяет выделить несколько взаимосвязанных (в т.ч. итеративно) задач: сравнение альтернативных энергетических технологий, формирование альтернативных вариантов технологического обновления энергетики, оценка сопутствующих системных эффектов по вариантам, оценка затрат на реализацию альтернативных вариантов и выбор рекомендуемого, оценка финансово-экономических последствий реализации рекомендуемого

⁷ одним из сценариев является прогноз при сохранении существующего формата ценообразования на рынках производимой энергетической продукции

варианта для экономики страны, определение наиболее эффективных мер поддержки новых технологий.

Для решения этой совокупности задач могут быть использованы имитационные расчетные средства, однако ведущую роль играют оптимизационные модели, обеспечивающие выбор наилучшего (по минимуму стоимости энергоснабжения) технологический облик всей энергетики и ее отдельных отраслей с учетом экологических, инвестиционных (финансовых), режимных ограничений, а также с учетом межотраслевых последствий и влияния на динамику экономического роста.

При создании эффективной модельно-информационной системы для обоснования параметров НТР в энергетике России важно, с одной стороны, максимально использовать существующие научные методические и модельные заделы, а с другой – обеспечить интеграцию (вплоть до общих модельных инструментов) с аналогичными работами по наращиванию прогнозной составляющей в системе стратегического планирования, прежде всего – связанными с формированием сценариев декарбонизации экономики и энергетики России.

Литература

1. Макаров А.А., Митрова Т.А. Влияние роста цен на газ и электроэнергию на развитие экономики России. – М.: Институт энергетических исследований РАН, 2013. – 35 С.
2. Малахов В.А., Несытых К.В. Возможные макроэкономические последствия интенсификации НТП в энергетике мира и России // Роль научно-технического прогресса в развитии энергетики России. – М.: Институт энергетических исследований РАН, 2019. – С. 5-29.
3. Филиппов С.П., Малахов В.А., Веселов Ф.В. Долгосрочное прогнозирование спроса на энергию на основе системного анализа // Теплоэнергетика. 2021, № 12. – С. 5-19.
4. Веселов Ф.В., Ерохина И.В., Макарова А.С., Соляник А.И., Урванцева Л.В. Масштабы и последствия глубокой декарбонизации российской электроэнергетики // Теплоэнергетика. 2022. № 10. – С. 32-44.
5. Роль научно-технического прогресса в развитии энергетики России. – М.: Институт энергетических исследований РАН, 2019. – 22 с.
6. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Макарова А.С., Урванцева Л.В. Комплексная оценка технологической трансформации электроэнергетики России // Теплоэнергетика. 2019. № 10. – С. 3-18.
7. Projected costs of generating electricity. 2020 Edition. – IEA/NEA, Paris, 2020. – 223 p.
8. Веселов Ф.В., Макарова А.С., Новикова Т.В., Панкрушина Т.Г. Модификация методического подхода к оценке эффективности альтернативных вариантов комплексного энергоснабжения потребителей в задачах перспективного планирования развития энергосистем // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 1. – С. 14-25.
9. Levelized cost of heating (LCOH) for consumers, for selected space and water heating technologies and countries. – IEA. [Электронный ресурс] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelized-cost-of-heating-lcoh-for-consumers-for-selected-space-and-water-heating-technologies-and-countries> (дата обращения: 15.06.2023 г.)
10. The future of hydrogen. Seizing today's opportunities. IEA, Paris, 2019. – 203 p.
11. Веселов Ф.В., Соляник А.И. Экономика производства водорода с учетом экспорта и российского рынка // Энергетическая политика. 2022. № 4. – С. 58-67.
12. Ellram L.M. Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. – 1995. – Vol. 25, N 8. – P. 4-23.
13. Levelised Cost of Electricity Calculator. – IEA. [Электронный ресурс] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/levelised-cost-of-electricity-calculator> (дата обращения: 15.06.2023 г.)
14. Electric Vehicles: Total Cost of Ownership Tool – IEA. [Электронный ресурс] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/electric-vehicles-total-cost-of-ownership-tool> (дата обращения: 15.06.2023 г.)
15. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. - Fraunhofer ISE, 2018. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html> (дата обращения: 15.06.2023 г.)
16. Веселов Ф.В., Соляник А.И., Аликин Р.О. Влияние электрификации в секторе дорожного транспорта на уровень электропотребления и суточный график нагрузки в ЭЭС России // Известия РАН. Энергетика, №1. 2023. – С. 57-71.
17. Power system flexibility for the energy transition. Part II: Irena FLEXTOOL methodology. – IRENA, 2018. – 76 p.
18. Веселов Ф.В., Соляник А.И. Стимулирование инвестиций в технологическое обновление тепловой энергетики // Проблемы прогнозирования. 2019. № 1. – С. 41-54.
19. Опыт развития методологии и разработки управленческих моделей межотраслевого баланса / В.А. Малахов, Д.В. Шапот – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. — 176 с.
20. Широв А.А., Янтовский А.А. Межотраслевая макроэкономическая модель как ядро комплексных прогнозных расчетов // Проблемы прогнозирования. 2014. № 3. – С. 18-31.