

УДК 621.11.1

© 2010 г. ФИЛИППОВ С.П.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА АДАПТИВНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Изложены основные принципы макроэкономического подхода к прогнозированию энергопотребления страны и регионов, отражающего рыночный характер формирования спроса на топливо и энергию и учитывающий особенности различных секторов экономики. Приведено описание адаптивных имитационных моделей, реализующих данный подход. Обсуждены вопросы определения прогнозных значений энергоемкостей видов экономической деятельности на основе их связей с макроэкономическими параметрами.

Введение. Оценки будущих потребностей в топливе и энергии необходимы для решения многих задач, связанных с развитием энергетики страны и регионов, которые становятся все более актуальными. Однако получение таких оценок, особенно на долгосрочную перспективу, сопряжено с большими трудностями. Это обусловлено многими факторами, в частности, рыночными механизмами формирования спроса на энергоносители и большой неопределенностью будущих условий социально-экономического и технологического развития страны. Дополнительные сложности возникают при дезагрегировании прогнозов по территории страны. Связано это с неоднородностью сложившейся отраслевой структуры экономики регионов и неравномерностью ожидаемого развития отраслей экономики по регионам в долгосрочной перспективе. В последнее время новым осложняющим фактором стал экономический кризис, который вызвал слом многих сложившихся тенденций как в экономическом развитии, так и в энергопотреблении.

Известно большое количество методов прогнозирования энергопотребления, существенно отличающихся целевой направленностью (см., например, [1,2]). В ИНЭИ РАН разработан подход, предназначенный для решения задач развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и его отдельных отраслей на долгосрочную перспективу, а также задач, связанных с повышением энергетической эффективности секторов экономики. Подход в значительной мере интегрирует накопленные достижения в данной области и развивает их с целью повышения обоснованности получаемых прогнозов для рыночных условий развития отечественной экономики и корректной развертки прогнозов на субъекты Российской Федерации. Исходные положения данного подхода были сформулированы в [3]. Ниже излагаются результаты его дальнейшего совершенствования, а также инструментарий, его реализующий.

1. Принципы прогнозирования энергопотребления

Разработанный подход базируется на следующих принципах.

1) Прогнозирование энергопотребления на основе прогнозов социально-экономического развития страны и регионов. Таким образом, учитываются рыночные механизмы формирования спроса на энергоносители, поскольку рынок в решающей степени определяет объемы выпусков продукции и значения других макроэкономических факторов.

2) Разделение экономических (производственных) и энергетических переменных. Первые являются экстенсивными, а вторые – интенсивными. Экономические переменные (выпуски продукции и т.п.) определяют масштабы развития секторов экономики, а энергетические (энергоемкости) – интенсивности потребления ими энергоснабжающих. Разделение экономических и энергетических переменных существенно повышает корректность прогнозов спроса на топливо и энергию (который в общем случае описывается сложной нелинейной функцией), поскольку позволяет учесть различия в тенденциях изменения этих переменных в прогнозный период, тем более, что эти тенденции обусловлены разными силами. Часто такие тенденции противоположны: выпуски растут, а энергоемкости падают.

3) Учет функциональных особенностей потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), что вызвано существенными различиями в тенденциях спроса на ТЭР разного вида и по разным направлениям их использования. Осуществляется это дезагрегацией потребителей по а) направлениям использования ТЭР (для производства электрической и тепловой энергии, производственных нужд, в качестве сырья и т.д.) и б) видам экономической деятельности (ВЭД).

4) Представление развития секторов экономики (производственных и энергетических переменных) в виде базовых трендов и накладываемых на них возмущений. Последние определяются крупными инвестиционными проектами, а также крупномасштабными энергосберегающими и энергозамещающими мероприятиями. Таким образом, удается более корректно описать динамику прогнозных энергоемкостей ВЭД и, следовательно, спрос на ТЭР. Это оказывается особенно важным при рассмотрении регионального разреза.

5) Обеспечение перманентной адаптивности прогнозного инструментария к реальным условиям развития экономики и энергетики страны и регионов. Достигается она использованием имитационных моделей адаптивного типа и регулярной (по мере поступления статистических данных) актуализацией моделей и исходной информации к ним.

6) Учет неопределенностей, что является одним из неотъемлемых требований системного подхода. Основным их источником являются неточные знания а) будущих условий развития экономики и энергетики страны и регионов и б) возможных технологических изменений у потребителей, определяющих их энергоэффективность. В разработанной методике используется сценарный подход к учету неопределенностей. Для энергоемкостей широко практикуются интервальные прогнозы, формируемые с использованием эвристических процедур.

7) Учет межтопливной конкуренции (взаимозаменяемости энергоснабжающих у потребителей), включая местные ТЭР: природные (древесина, торф и т.д.) и вторичные (горючие отходы производств). Выбор приоритетных ТЭР осуществляется на основе технико-экономического анализа соответствующих мероприятий по энергозамещению. При этом важнейшую роль играют прогнозные цены на энергоснабжающие (дезагрегированные по регионам страны).

8) Учет свойства эмерджентности (целостности), что также является одним из основополагающих требований системного подхода при исследовании иерархически построенных систем. В задачах прогнозирования энергопотребления на основе данного принципа строится вся система балансирования и согласования прогнозов для разных иерархических уровней. При выполнении согласительных процедур и балансовых ограничений приоритет отдается требованиям вышестоящего уровня.

9) Учет фактора времени. С увеличением горизонта прогнозирования объем исходной информации, как правило, уменьшается, а ее качество ухудшается. Поэтому при прогнозировании на отдаленную перспективу целесообразно использовать более агрегированные модели и показатели.

10) Учет балансовых и инфраструктурных ограничений. В частности, на объемы производства ТЭР по регионам страны (включая местные ТЭР) и межрегиональные перетоки ТЭР, обусловленные недостаточностью пропускных способностей транспортных коммуникаций. Учет этих ограничений достигается путем разработки взаимосогласованной системы топливно-энергетических балансов (ТЭБ) страны и регионов.



Рис. 1. Схема трансформации ТЭР

Таким образом, окончательно прогнозы энергопотребления формируются в результате балансирования спроса и предложения ТЭР по каждому региону и стране в целом.

В основе разработанного метода прогнозирования энергопотребления лежат известные представления о последовательности трансформации ТЭР в экономике [1, 4] (рис. 1). Исходные природные энергоресурсы (органические и ядерные топлива в виде полезных ископаемых и распределенные в окружающей среде возобновляемые виды энергии) вовлекаются в хозяйственный оборот (в виде первичных ТЭР) с затратами определенного количества энергии на их извлечение. Часть первичных ТЭР преобразуется во вторичные энергоносители (электрическую и тепловую энергию, моторные топлива и т.д.) с соответствующими потерями. Первичные ТЭР и вторичные энергоносители, доставленные конечным потребителям (на что также расходуется энергия), представляют собой конечную энергию. Непосредственно в установках конечных потребителей происходит преобразование конечной энергии во множество полезных видов энергии, продуктов и услуг. Технологии извлечения природных ТЭР и трансформации их в конечные виды энергии совместно с технологиями магистрального транспорта и распределения ТЭР формируют топливно-энергетический комплекс (ТЭК) и его специализированные отрасли (электроэнергетика и др.). Установки конечных потребителей образуют сектор конечного потребления (КП).

По функциональным различиям в методике прогнозирования выделены следующие направления потребностей в ТЭР: 1) преобразование в другие энергоносители; 2) расходы на собственные нужды отраслей ТЭК, включая потери; 3) КП. Такой подход позволяет значительно сократить зону неопределенности при прогнозировании энергопотребления. Это особенно важно для России, где ТЭК представляет один из важнейших секторов экономики, и на его функционирование расходуется огромное количество ТЭР.

Для корректного описания энергетических потоков и их взаимосвязей в ТЭК в методике прогнозирования в общем случае приходится рассматривать множество ТЭР у конечных потребителей, содержащее около 20 компонентов, разделенных на три группы: 1) электрическая энергия; 2) тепловая энергия (централизованное тепло); 3) топливо, включая местные виды – природный газ, топочный мазут, энергетический уголь, кокс, сжиженный газ, коксовый газ, доменный газ, сухие газы нефтепереработки, автомобильный бензин, дизельное топливо, авиационный керосин, прочие моторные топлива (судовое, турбинное и др.), нефтехимическое сырье, прочие жидкое горючие, дрова и прочие твердые топлива (биомасса и др.). По направлению использования топливо разделяется на котельно-печное топливо (КПТ), моторное топливо (МТ) и топливо, расходуемое в качестве сырья и на нетопливные нужды (СиН).

2. Схема прогнозирования энергопотребления

Предложенная схема прогнозирования энергопотребления страны и регионов представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема прогнозирования энергопотребления в стране и регионах

Расходы ТЭР на цели преобразования (производство электрической и тепловой энергии, нефте- и газопереработка, коксование) определяются в процессе прогнозирования развития отраслей ТЭК и формирования прогнозных ТЭБ. Для этого в ИНЭИ РАН разработан комплекс моделей, включающий оптимизационные и имитационные модели отраслей ТЭК и интегрирующую оптимизационную модель ТЭБ страны и регионов [5].

Расходы топлива и энергии на собственные нужды отраслей ТЭК, включая потери, определяются методами прямого счета на основе данных о прогнозных объемах добычи, преобразования и транспорта (распределения) ТЭР. Они формируются итерационным путем: предварительно полученные (на основе сценарных условий развития энергетики) оценки уточняются по мере разработки и согласования прогнозов развития отраслей ТЭК. Результаты передаются в модель ТЭБ. Данная процедура призвана разгрузить сложную модель ТЭБ.

Наиболее трудным оказывается прогнозирование спроса на ТЭР со стороны сектора КП, что обусловлено большим количеством и разнообразием конечных потребителей и сложным описанием их энергопотребления. Задача структурирования сектора КП решается, исходя из наличия исходной информации и ее качества. Поэтому целесообразно воспользоваться классификацией ОКВЭД и выделить следующие базовые ВЭД (в скобках указаны соответствующие коды по ОКВЭД):

- 1) добыча полезных ископаемых (С), кроме топливно-энергетических;
 - 2) обрабатывающие производства (D), кроме преобразования ТЭР;
 - 3) строительство (F);
 - 4) сельское хозяйство, включая лесное (A);
 - 5) транспорт и связь (I), кроме трубопроводного транспорта газа и нефти;
 - 6) прочие ВЭД (в основном представленные сферой услуг).
- Кроме того, в сектор КП включаются:
- 7) домашние хозяйства;
 - 8) расходы топлива в качестве сырья (и на нетопливные нужды).

Такое представление структуры сектора КП используется для прогнозирования энергопотребления для страны в целом и ее федеральных округов и субъектов РФ. При прогнозировании на краткосрочную и среднесрочную перспективу имеющаяся информация позволяет при необходимости рассмотреть на уровне страны некоторые ВЭД более детально. Из обрабатывающих производств можно выделить следующие ВЭД более низкого уровня:

- пищевую промышленность (DA);
- легкую промышленность (DB+DC);
- деревопереработку (DD+DE);
- производство кокса (23.1);
- производство нефтепродуктов (23.2);
- химическое производство (DG+DH);
- производство неметаллических продуктов (DI);
- металлургическое производство (DJ);
- машиностроение (DK+DL+DM);
- прочие производства (DN).

Из ВЭД “Транспорт и связь” можно выделить:

- железнодорожный транспорт (60.1);
- прочий сухопутный транспорт (60.2);
- водный транспорт (61);
- воздушный транспорт (62);
- связь (64).

Дальнейшая дезагрегация ВЭД не обеспечена надежной информацией и не оправдана с точки зрения соотнесения трудоемкости исследований и получаемого эффекта.

Внешними параметрами для прогнозирования спроса на ТЭР сектора КП являются результаты формирования макроэкономических сценариев и сценариев развития энергетики страны (рис. 2). Они включают прогнозы достаточно широкого круга макроэкономических показателей для страны и регионов (объемы выпусков продукции и инвестиции в основной капитал рассматриваемых ВЭД, ВВП для страны и ВРП по регионам, доходы домашних хозяйств (ДХ), перспективные цены на основные энергоснабжающие и т.д.), а также предварительные оценки показателей развития отечественной энергетики (объемы добычи, преобразования и транспорта ТЭР и др.). Согласование макроэкономических и энергетических сценариев осуществляется по разработанной в ИНЭИ РАН нелинейной оптимизационной экономико-математической модели МЭНЭК (“Модель энергетики в экономике”) [6, 7].

Процедурой прогнозирования спроса на ТЭР со стороны сектора КП (рис. 2) предполагается решение следующих задач: 1) определение базовых трендов изменения энергоемкостей ВЭД, 2) оценка прогнозных объемов энергосбережения и энергозамещения для рассматриваемых ВЭД, 3) выбор инвестиционных проектов для включения в процедуру прогнозирования и определение их экономических (производственных) и энергетических характеристик. Первая задача решается путем установления количественных связей энергоемкостей ВЭД с внешними макроэкономическими параметрами. Вторая – на основе методов технико-экономического анализа энергосберегающих и энергозамещающих технологий и мероприятий или с использованием специальной модели, описывающей конкуренцию ТЭР и энергосбережение в секторе КП (см. раздел 5). Анализ инвестиционных проектов выполняется экспертами.

Предложена трехэтапная схема прогнозирования, предусматривающая выделение трех иерархических уровней: 1) страна, 2) федеральные округа и 3) субъекты Российской Федерации (рис. 3). На каждом этапе прогнозируется спрос на ТЭР для своего иерархического уровня, причем, в увязке со спросом на вышестоящем уровне (вертикальное согласование решений). Последний в согласительных процедурах обладает приоритетом. Но при наличии веских оснований допускается его корректировка, т.е. в схеме прогнозирования имеются обратные связи. На каждом уровне производится также горизонтальное согласование решений (между субъектами уровня). Такая схема

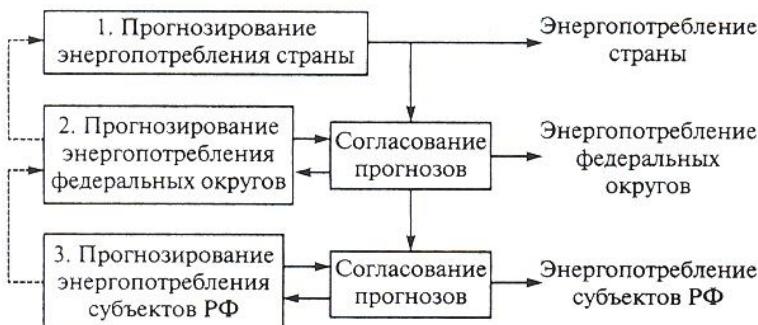


Рис. 3. Схема разработки взаимосогласованных прогнозов спроса на ТЭР в стране и регионах

обеспечивает разработку взаимосогласованных прогнозов энергопотребления и повышает гибкость решения прогнозных задач: при необходимости можно ограничиться только одним (страна) или двумя (страна и федеральные округа) уровнями, что многократно сокращает объем работы.

Окончательно прогнозы внутреннего спроса на ТЭР для страны и регионов формируются на основе экспертного анализа формализованных решений, получаемых с помощью оптимизационной модели ТЭБ (рис. 2). При этом не исключено, что может потребоваться корректировка исходных макроэкономических и энергетических сценариев. Таким образом, представленная схема прогнозирования энергопотребления оказывается многоитерационной и предполагает активное использование различных математических моделей, соответствующих баз данных и эвристических процедур. Однако при координации работ она позволяет достаточно оперативно и с высоким качеством готовить прогнозную информацию для решения разнообразных задач развития отраслей энергетики страны и регионов и для разработки взаимосогласованной системы ТЭБ страны и регионов в международном формате.

Прогнозирование спроса на ТЭР осуществляется с помощью комплекса адаптивных имитационных моделей, описание которых приведено ниже. На основе этих моделей и соответствующих баз данных в ИНЭИ РАН разработан и реализован распределенный модельно-информационный комплекс EDFS (Energy Demand Forecasting Systems). Он предоставляет экспертам возможность независимого использования специализированных прогнозных моделей и баз данных на удаленных компьютерах и обеспечивает итеративное согласование полученных решений. Обмен информацией осуществляется через локальную компьютерную сеть (или Интернет) посредством заранее определенных форматов данных.

3. Прогнозирование энергоемкостей ВЭД

Известно, что в общем случае энергоемкости выпусков продукции с течением времени не остаются постоянными. Они изменяются под действием многих факторов (технологических, структурных и др.), которые в совокупности ответственны за изменение как постоянной, так и переменной частей расходов энергоносителей. Для случая линейной зависимости переменной части энергоемкости (\tilde{e}) от производственно-фактора (V) имеем потребности в энергоносителе

$$E = \bar{E} + \tilde{e}V \text{ или } E = \bar{E} + \gamma \tilde{e}V^*, \quad \gamma = V/V^*,$$

где \bar{E} – постоянная часть энергопотребления; γ – коэффициент загрузки установленной мощности; V^* – значение производственного фактора в контрольном году.

Выполненный анализ зависимостей энергоемкостей ВЭД от выпусков продукции показал, что при принятом уровне агрегирования потребителей ТЭР и высокой степени загрузки производственных мощностей вполне допустимо воспользоваться линейной аппроксимацией энергоемкости от макроэкономического параметра, т.е. $e = (E^0 + \tilde{e}V)/V$. Тем более, что отсутствует надежная информация, позволяющая для

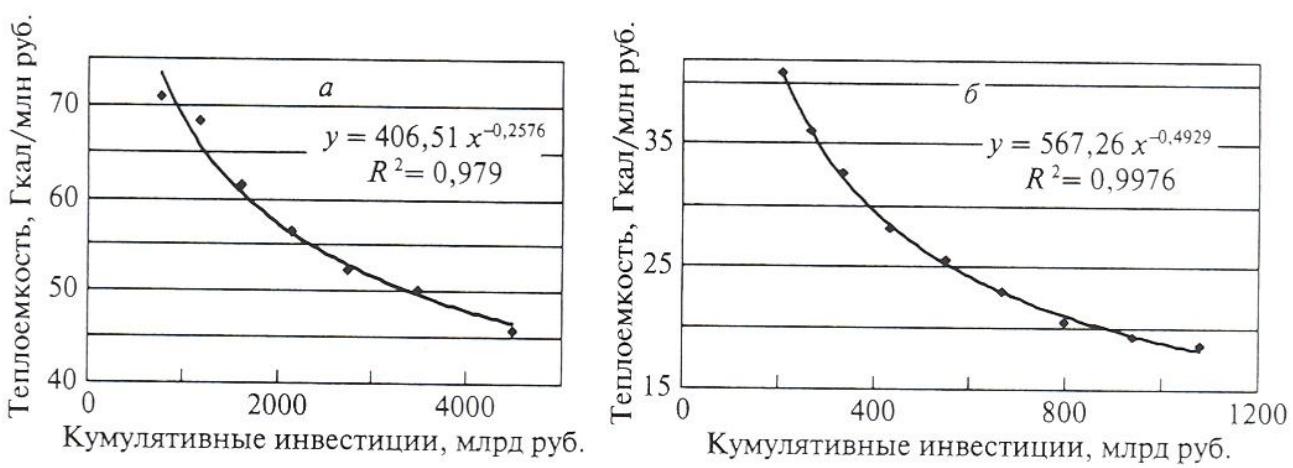


Рис. 4. Зависимость теплоемкости обрабатывающих производств (а) и сельского хозяйства (б) от кумулятивных инвестиций в ВЭД

всех ВЭД обоснованно разделить энергозатраты на постоянные и переменные. Кроме того, наблюдается сокращение доли постоянной составляющей в энергопотреблении ВЭД как результата их технического перевооружения и энергосбережения. При определении энергоемкостей ВЭД производственные характеристики (\mathcal{V}) выражаются в стоимостной форме (в сопоставимых ценах). В необходимых случаях учет влияния постоянной составляющей на энергоемкость при сокращении выпуска продукции может быть выполнен с достаточной степенью корректности по методике, которая обсуждается ниже (см. описание модели (1)–(8)).

Разработанный подход к прогнозированию базовых энергоемкостей ВЭД основан на установлении их связей с макропоказателями. При этом учитываются существующие территориальные различия энергоемкостей ВЭД и неравномерности изменения этих показателей в будущем. Как показали выполненные исследования, в большинстве случаев решающей оказывается связь энергоемкости ВЭД с кумулятивными инвестициями в основной капитал данного ВЭД, рассчитанными в сопоставимых ценах [3]. Рост цен на энергоносители является только побудительным мотивом для повышения энергоэффективности производства (снижения его энергоемкости). Средством для достижения этой цели являются инвестиции. Поскольку получаемый энергетический эффект от вложений инвестиций в виде снижения энергоемкостей является накапливательным, то следует принимать в расчет кумулятивные инвестиции (естественно, измеренные в сопоставимых ценах). Длительность ретроспективного периода накопления инвестиций выбирается для каждого ВЭД индивидуально, исходя из наилучшей аппроксимации ретроспективных значений энергоемкости.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости теплоемкости (отношение потребления тепла к выпуску продукции в сопоставимых ценах) обрабатывающих производств и сельского хозяйства от кумулятивных инвестиций в ВЭД. При аппроксимации отчетных данных зависимостью $y = ax^b$ имеем значения квадрата коэффициента корреляции (R^2) 0,979 и 0,998 соответственно. Высокие значения параметра R^2 получены при анализе энергоемкостей практически всех рассмотренных ВЭД (см. таблицу). Для ДХ удовлетворительными оказываются множественные корреляции энергоемкостей с обеспеченностью жильем и душевыми доходами населения.

При реализации энергосберегающих мероприятий и ввода новых производств с передовыми технологиями (инвестпроекты) прогнозная энергоемкость ВЭД может существенно отклоняться от базовой траектории, в пределе – скачкообразно при значительных единовременных воздействиях (рис. 5). Ощутимые возмущения в динамику энергоемкости могут вносить крупномасштабные процессы энергозамещения и энергосбережения. Если прогноз базовой энергоемкости был определен как интервальный, то и окончательный прогноз с учетом возмущений также останется интервальным.

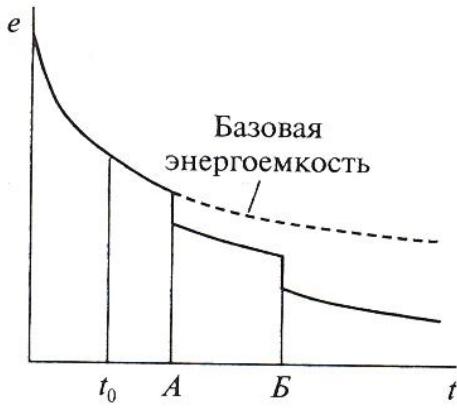


Рис. 5. Прогноз энергоемкости ВЭД: A – реализация энергосберегающего мероприятия; B – реализация инвестиционного проекта; t_0 – начало прогнозного периода

Значения параметра R^2 , полученные при анализе энергоемкостей ВЭД

Сектор экономики	Электроэнергия	Тепловая энергия	КПТ
Добывающие производства	0,834	0,977	0,947
Обрабатывающие производства	0,967	0,980	0,975
Строительство	0,960	0,957	0,851
Сельское хозяйство	0,987	0,996	0,847
Транспорт и связь	0,850	0,990	0,944
Прочие ВЭД	0,974	0,943	0,891
Домашние хозяйства	0,995	0,859	0,962

4. Имитационные модели спроса на ТЭР сектора конечного потребления

Спрос на ТЭР сектора КП определяется с использованием комплекса имитационных моделей, включающего модели прогнозирования потребностей ВЭД и ДХ в электроэнергии, централизованном тепле, КПТ, МТ, модели прогнозирования спроса на топливо, расходуемое в качестве сырья на СиН (рис. 6). Окончательно потребности в конкретных видах топлива (природный газ, дизтопливо и т.д.) получаются суммированием результатов прогнозирования компонентов КПТ, МТ и СиН. Модели взаимосвязаны посредством итерационной процедуры согласования объемов энергозамещения. Последние определяются на основе результатов технико-экономического анализа энергозамещающих мероприятий, в частности, выполняемого с использованием модели энергосбережения и энергозамещения (см. раздел 5).

Ниже дано описание моделей прогнозирования потребностей в топливе и энергии ВЭД (на производственные нужды) и домашних хозяйств. Спрос на СиН определяется методом прямого счета. Прогнозные оценки выпусков продуктов, на производство которых расходуется топливо в качестве сырья (аммиак, метanol и др.), формируются при разработке макроэкономических сценариев. Прогнозные значения удельных расходов топлив на производство данных продуктов определяются на основе анализа лучшего зарубежного опыта и специализированных отечественных и зарубежных прогнозов.

Прогнозирования спроса на ТЭР на производственные нужды ВЭД. Математическое описание спроса на ТЭР для производственных нужд ВЭД представлено на примере электроэнергии. В общем случае записывается следующая система уравнений ($\forall t \in T$, $r \in R$, $p \in P$):

$$E_{tp} = k_{tp}^{\exp} k_{tp}^0 e_{tp}^0 V_{tp}^0 - \sum_r \Delta E_{trp}^{es} + \sum_r \Delta E_{trp}^{ex} + \sum_r \sum_u e_{trpu}^{inv} V_{trpu}^{inv}, \quad u \in U_p; \quad (1)$$

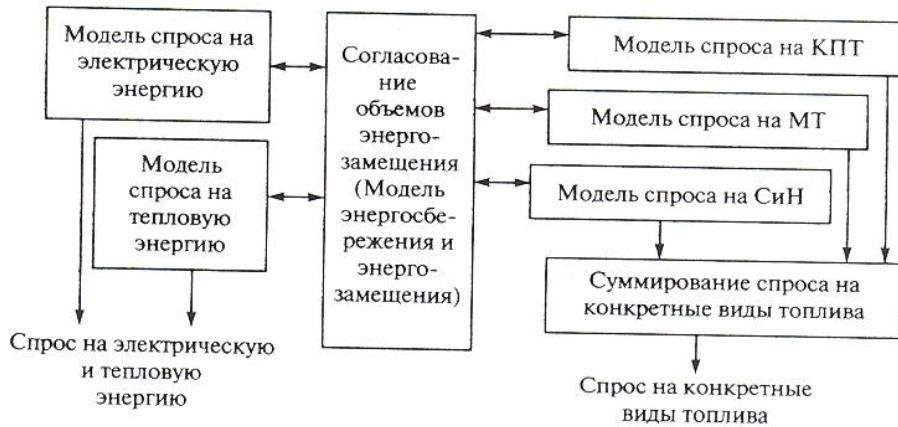


Рис. 6. Структура комплекса моделей для прогнозирования спроса на ТЭР сектором конечного потребления

$$E_{trp} = k_{trp}^{\exp} k_{trp}^0 e_{trp}^0 V_{trp}^0 - \Delta E_{trp}^{es} + \Delta E_{trp}^{ex} + \sum_u e_{trpu}^{inv} V_{trpu}^{inv}, \quad u \in U_p; \quad (2)$$

$$\sum_p E_{trp} - E_{tr} = 0, \quad \sum_r E_{tr} - E_t = 0; \quad (3)$$

$$e_{tp}^0 = f_{ep}(\bar{e}_p, \varphi), \quad e_{trp}^0 = f_{erp}(\bar{e}_{rp}, \varphi); \quad (4)$$

$$k_{tp}^0 = (\beta_p^* V_{tp}/V_p^* + 1) / (\beta_p^* + 1), \text{ если } V_{tp} < V_p^*; \quad k_{tp}^0 = 1, \text{ если } V_{tp} \geq V_p^*; \quad (5)$$

$$k_{trp}^0 = (\beta_{rp}^* V_{trp}/V_{rp}^* + 1) / (\beta_{rp}^* + 1), \text{ если } V_{trp} < V_{rp}^*; \quad k_{trp}^0 = 1, \text{ если } V_{trp} \geq V_{rp}^*; \quad (6)$$

$$\beta_p^* = 1/(E_p^*/\bar{E}_p^* - 1), \quad \beta_{rp}^* = 1/(E_{rp}^*/\bar{E}_{rp}^* - 1); \quad (7)$$

$$\Delta E_{trp}^{es} = f_{es}(c_p^{es}, \varphi), \quad \Delta E_{trp}^{ex} = f_{ex}(c_p^{ex}, \varphi), \quad (8)$$

где E_{tp} и E_{trp} – электропотребление p -го ВЭД, соответственно, по стране в целом и в регионе r ; E_t и E_{tr} – суммарное электропотребление по стране и в регионе r ; e_{tp}^0 и e_{trp}^0 – базовые тренды электроемкости p -го ВЭД по стране и регионам; V_{tp}^0 и V_{trp}^0 – базовые тренды выпуска продукции p -м ВЭД по стране и регионам; V_p^* и V_{rp}^* – то же, в некотором контрольном году; ΔE_{trp}^{es} – экономия электроэнергии за счет реализации энергосберегающих мероприятий в p -м ВЭД; e_{trpu}^{inv} – электроемкость u -го инвестиционного проекта; V_{trpu}^{inv} – выпуск продукции u -м инвестиционным проектом; k_{tp}^0 и k_{trp}^0 – коэффициенты, учитывающие влияние загрузки производственных мощностей на электроемкость; k_{tp}^{\exp} и k_{trp}^{\exp} – коэффициенты экспертной корректировки базовых электроемкостей; E_{rp}^* и \bar{E}_{rp}^* – полное электропотребление p -го ВЭД в контрольном году и его условно-постоянная часть; $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ – вектор внешних параметров; \bar{e}_p и \bar{e}_{rp} – ретроспективные тренды электроемкости p -го ВЭД по стране и регионам; c_p^{es} и c_p^{ex} – экономические характеристики энергосберегающих и энергозамещающих мероприятий; T – множество прогнозных периодов; R – множество рассматриваемых регионов; P – множество рассматриваемых ВЭД; U_p – множество учитываемых инвестиционных проектов в p -м ВЭД.

Уравнение (1) определяет перспективные потребности в электроэнергии p -го ВЭД по стране в целом. При этом первое слагаемое в (1) формирует энергетические потребности, обусловленные базовым трендом развития данного ВЭД. Второе и третье слагаемые учитывают эффекты от реализации, соответственно, энергосберегающих и

энергозамещающих мероприятий (помимо учтенных при формировании базового тренда, т.е. первым слагаемым). Очевидно, что третье слагаемое может быть как положительным, так и отрицательным. Четвертым слагаемым учитываются приrostы энергопотребления за счет реализации крупных инвестиционных проектов в секторе конечного потребления.

Региональные прогнозы спроса на электроэнергию каждым ВЭД формируются в процессе итеративного согласования (1) и (2) при обеспечении балансовых условий (3). Уравнения (1)–(3) отражают двухэтапную схему прогнозирования (страна – федеральные округа). Введение дополнительного иерархического уровня (субъекты РФ) потребует расширения модели за счет соответствующих уравнений и балансовых условий, аналогичных (2) и (3).

Выражения (4) связывают энергоемкости ВЭД с ретроспективными данными и внешними параметрами. Они определяют базовые тренды для электроемкости каждого ВЭД по стране и регионам. Выражения (4) по мере поступления статистических данных обновляются, что обеспечивает высокую адаптивность расчетной модели к реальным условиям развития экономики и энергетики. Необходимая ретроспективная информация собирается с наиболее низкого из рассматриваемых иерархических уровней (субъектов РФ). На этом уровне происходит ее верификация (на основе анализа соответствующих динамических рядов: энергоемкостей и выпусков продукции). Более детально особенности прогнозирования энергоемкостей ВЭД обсуждаются ниже.

С помощью коэффициентов изменения параметров модели k_{tp}^{exp} и k_{trp}^{exp} возможна экспертная корректировка базовых электроемкостей. Для базовых трендов имеем $k_{tp}^{\text{exp}} = 1$ и $k_{trp}^{\text{exp}} = 1$. Это позволяет учесть неопределенность влияния в прогнозный период макроэкономических параметров на электроемкость ВЭД и в результате сформировать несколько прогнозных трендов. Следовательно, прогнозы электроемкости и электропотребления ВЭД оказываются интервальными.

Выражения (5)–(7) определяют коэффициенты k_{tp}^0 и k_{trp}^0 , позволяющие учесть влияние степени снижения достигнутой загрузки производственных мощностей (относительно выбранных контрольных значений – V_p^* и V_{rp}^*) на энергоемкость p -го ВЭД. Этим удается учесть влияние кризисных явлений в экономике на энергоемкость. Снижение производства обычно приводит к росту энергоемкости, что обусловлено наличием условно-постоянных расходов электроэнергии. Последние определяются на основе ретроспективной информации построением линейной аппроксимации энергопотребления ВЭД от выпуска продукции. В итоге появляется возможность распространения разработанной методики прогнозирования энергопотребления на стагнирующую и падающую экономику.

Выражениями (8) определяются эффекты от энергосбережения и энергозамещения применительно к p -му ВЭД в регионе r , полученные от реализации дополнительных мероприятий (помимо учтенных в базовых тенденциях), связывая их с соответствующими технико-экономическими показателями и внешними параметрами.

Аналогичным образом прогнозируется спрос каждого ВЭД из сектора конечного потребления на централизованное тепло, КПТ и МТ, расходуемые на производственные нужды. В двух последних случаях сначала определяются топливные агрегаты – КПТ и МТ для страны и регионов (соотношения аналогичные (1)–(8)). Затем они дезагрегируются в конкретные виды топлива (природный газ, топочный мазут, дизельное топливо и т.д.) также для страны и регионов. Прогнозные оценки компонентной структуры КПТ по рассматриваемым ВЭД формируются на основе результатов анализа ретроспективной динамики этих показателей и с учетом ограничений на объемы потребления отдельных топлив. Часто такие ограничения возникают в отношении допустимых объемов потребления местных топлив (например, доменных газов).

Прогнозирования спроса на ТЭР домашними хозяйствами. Модель электропотребления домашних хозяйств может быть представлена следующим образом ($\forall t \in T, r \in R$):

$$E_t^{\text{ДХ}} = e_t^{\text{ДХ}} N_t + \sum_r \sum_j (\Delta E_{trj}^{es})^{\text{ДХ}} + \sum_r (\Delta E_{tr}^{ex})^{\text{ДХ}}, \quad j \in J_{\text{ДХ}}^{es}; \quad (9)$$

$$E_{tr}^{\text{ДХ}} = e_{tr}^{\text{ДХ}} N_{tr} + \sum_j (\Delta E_{trj}^{es})^{\text{ДХ}} + (\Delta E_{tr}^{ex})^{\text{ДХ}}; \quad (10)$$

$$\sum_r E_{tr}^{\text{ДХ}} - E_t^{\text{ДХ}} = 0; \quad (11)$$

$$e_t^{\text{ДХ}} = f_e^{\text{ДХ}}(\bar{e}^{\text{ДХ}}, D_t, F_t^{\text{уд}}), \quad e_{tr}^{\text{ДХ}} = f_{er}^{\text{ДХ}}(\bar{e}_r^{\text{ДХ}}, D_{tr}, F_{tr}^{\text{уд}}); \quad (12)$$

где $E_t^{\text{ДХ}}$ и $E_{tr}^{\text{ДХ}}$ – электропотребление ДХ, соответственно, по стране в целом и в регионе r ; $(\Delta E_{trj}^{es})^{\text{ДХ}}$ – экономия электроэнергии от реализации j -го энергосберегающего мероприятия в ДХ; $(\Delta E_{tr}^{ex})^{\text{ДХ}}$ – изменение электропотребления ДХ в результате энергозамещения; N_t и N_{tr} – численность постоянного населения по стране и регионам; $e_t^{\text{ДХ}}$ и $e_{tr}^{\text{ДХ}}$ – базовые тренды душевого электропотребления по стране и регионам; D_t и D_{tr} – ежегодные доходы населения по стране и регионам (в сопоставимых ценах); $F_t^{\text{уд}}$ и $F_{tr}^{\text{уд}}$ – обеспеченность жильем населения по стране и регионам; $J_{\text{ДХ}}^{es}$ – множество энергосберегающих технологий в ДХ.

Зависимости (12) связывают душевое электропотребление с обеспеченностью населения жильем и доходами на душу населения (в сопоставимых ценах). Формирование этих зависимостей осуществляется на основе многофакторного регрессионного анализа соответствующей ретроспективной информации, собираемой Росстата.

Модель теплопотребления ДХ. Ее назначение – прогнозирование спроса ДХ на централизованное тепло, которое расходуется на нужды отопления и горячего водоснабжения (ГВС). Спрос ДХ страны и регионов на централизованное тепло определяется следующим образом ($\forall t \in T, r \in R$):

$$Q_{tr}^{\text{ДХ}} = \alpha_{tr}^{\text{от}} \sum_k q_{trk}^{\text{от}} \gamma_{trk}^{\text{от}} F_{trk} + \alpha_{tr}^{\text{ГВС}} q_{tr}^{\text{ГВС}} N_{tr} - \sum_j \Delta Q_{trj}^{\text{ДХ}}, \quad k \in K_{\text{ДХ}}^{\text{от}}, \quad j \in J_{\text{ДХ}}^{es}; \quad (13)$$

$$\sum_r Q_{tr}^{\text{ДХ}} - Q_t^{\text{ДХ}} = 0; \quad (14)$$

$$q_{trk}^{\text{от}} = h_{rk}^{\text{от}} \Theta_r^{\text{от}}, \quad q_{tr}^{\text{ГВС}} = w_{tr}^{\text{ГВС}} \Theta_r^{\text{ГВС}}; \quad (15)$$

$$h_{rk}^{\text{от}} = f(t_r^{\text{po}}, \vartheta_k, \xi_k), \quad (16)$$

где $Q_t^{\text{ДХ}}$ и $Q_{tr}^{\text{ДХ}}$ – потребности ДХ в централизованном тепле по стране в целом и в регионах; ΔQ_{trj}^{es} – экономия тепловой энергии за счет реализации j -го энергосберегающего мероприятия в ДХ в регионе r ; $q_{trk}^{\text{от}}$ – удельные потребности жилых зданий k -го типа в тепловой энергии для целей отопления в регионе r ; $q_{tr}^{\text{ГВС}}$ – удельное потребление тепловой энергии населением на нужды ГВС в регионе r ; F_{trk} – отапливаемые площади жилых зданий k -го типа по регионам; $\gamma_{trk}^{\text{от}}$ – доля зданий k -го типа в суммарной площади жилого фонда (структуре жилого фонда); $\alpha_{tr}^{\text{от}}$ и $\alpha_{tr}^{\text{ГВС}}$ – доли потребления тепла на цели отопления и ГВС, покрываемые за счет централизованных теплоисточников; $h_{rk}^{\text{от}}$ – отопительные характеристики зданий; $w_{tr}^{\text{ГВС}}$ – удельный расход горячей воды в ДХ; $\Theta_r^{\text{от}}$ и $\Theta_r^{\text{ГВС}}$ – климатические комплексы для отопления и ГВС (вычисляются в

соответствии с требованиями нормативных документов на основе климатических данных по регионам); $K_{\text{ДХ}}^{\text{от}}$ – множество рассматриваемых типов зданий в ДХ; $J_{\text{ДХ}}^{\text{es}}$ – множество энергосберегающих мероприятий в ДХ.

Отопительные характеристики зданий ($h_{rk}^{\text{от}}$) зависят от климатических факторов (расчетной температуры для проектирования систем отопления в регионе – t_r^{po}), тепловых свойств здания, характеризуемых тепловым сопротивлением ограждающих конструкций (ϑ_k), этажности здания (ξ_k), и определяются на основе нормативных или проектных документов. Доли централизованного теплоснабжения в отоплении ($\alpha_{tr}^{\text{от}}$) и ГВС ($\alpha_{tr}^{\text{ГВС}}$) прогнозируются согласно тенденциям в градостроительной политике (прежде всего, развития малоэтажного строительства) с использованием результатов предварительного технико-экономического сопоставления вариантов теплоснабжения жилой застройки. Прогнозные значения удельных расходов горячей воды в ДХ назначаются экспертно на основе анализа сложившихся тенденций и лучшего практического опыта (отечественного и зарубежного).

Модель топливопотребления ДХ. Котельно-печное топливо (включая местные виды топлива) расходуется ДХ на цели автономного теплоснабжения (отопления и ГВС) и для приготовления пищи. Для уровня страны спрос ДХ в КПТ может быть описан следующей системой уравнений ($\forall t \in T, r \in R, i \in I$):

$$B_t^{\text{ДХ}} = b_t^{\text{атс}} Q_t^{\text{атс}} + \Delta B_t^{\text{атс}} + b_t^{\text{пп}} N_t + \Delta B_t^{\text{пп}}; \quad (17)$$

$$B_{ti}^{\text{ДХ}} = \omega_{ti}^{\text{атс}} (b_t^{\text{атс}} Q_t^{\text{атс}} + \Delta B_t^{\text{атс}}) + \omega_{ti}^{\text{пп}} (b_{ti}^{\text{пп}} N_t + \Delta B_t^{\text{пп}}); \quad (18)$$

$$b_t^{\text{атс}} = \sum_i \omega_{ti}^{\text{атс}} b_{ti}^{\text{атс}}, \quad b_t^{\text{пп}} = \sum_i \omega_{ti}^{\text{пп}} b_{ti}^{\text{пп}}; \quad (19)$$

$$\omega_{ti}^{\text{атс}} = f_{\omega}^{\text{атс}} (\bar{\omega}^{\text{атс}}, \Psi^{\text{атс}}, \varphi), \quad \omega_{ti}^{\text{пп}} = f_{\omega}^{\text{пп}} (\bar{\omega}^{\text{пп}}, \Psi^{\text{пп}}, \varphi); \quad (20)$$

$$\sum_i \omega_{ti}^{\text{атс}} = 1, \quad \sum_i \omega_{ti}^{\text{пп}} = 1, \quad (21)$$

где $B_t^{\text{ДХ}}$ и $B_{ti}^{\text{ДХ}}$ – спрос ДХ страны на КПТ в целом и на его i -й компонент; $Q_t^{\text{атс}}$ – расход тепла на автономное теплоснабжение по стране; $\Delta B_t^{\text{атс}}$ и $\Delta B_t^{\text{пп}}$ – изменения потребления КПТ в ДХ на автономное теплоснабжение и приготовление пищи в результате энергозамещения; $b_{ti}^{\text{атс}}$ и $b_{ti}^{\text{пп}}$ – прогнозные значения удельных расходов i -го вида топлива на производство автономного тепла и для приготовления пищи; $\bar{\omega}_{ti}^{\text{атс}}$, $\bar{\omega}_{ti}^{\text{пп}}$ – прогнозные доли i -го вида топлива, расходуемого на производство автономного тепла и для приготовления пищи; $\bar{\omega}^{\text{атс}}$, $\bar{\omega}^{\text{пп}}$ – структуры потребляемых топлив на производство автономного тепла и для приготовления пищи в ретроспективный период; Ψ – ограничения на объемы потребления конкретных видов топлива.

Прогнозные значения потребностей ДХ в тепле для автономного теплоснабжения ($Q_t^{\text{атс}}$) определяются по разности суммарного спроса ДХ в тепловой энергии и объемов его покрытия из централизованных теплоисточников. Прогнозирование удельных расходов топлива для производства автономного тепла и на приготовление пищи выполняется посредством анализа динамики технических характеристик соответствующих технологий. Прогнозные структуры топлив, расходуемых на автономное теплоснабжение и приготовление пищи, определяются на основе экспертного анализа ретроспективной динамики данных показателей с учетом ограничений на доступные ресурсы соответствующих топлив в данном регионе и прогнозируемых условий и качества жизни населения в стране и регионе.

Аналогичным образом прогнозируется спрос ДХ на КПТ по регионам страны. Согласование прогнозов для страны и регионов производится из удовлетворения требованиям балансовых уравнений, подобных (11).

Модель спроса ДХ на моторные топлива. Главным потребителем моторных топлив в ДХ является личный легковой автотранспорт. Для уровня страны прогнозные потребности ДХ в моторных топливах определяются из решения следующей системы уравнений ($\forall t \in T, r \in R, i \in I$):

$$B_t^a = (1 - \alpha_t^{эл}) b_t^a n_t^a N_t; \quad (22)$$

$$B_{ti}^a = \omega_{ti}^a B_t^a; \quad (23)$$

$$b_t^a = \sum_i \omega_{ti}^a b_{ti}^a, \quad \sum_i \omega_{ti}^a = 1; \quad (24)$$

$$\omega_{ti}^a = f_\omega^a(\bar{\omega}^a, \phi), \quad (25)$$

где B_t^a и B_{ti}^a – потребности ДХ страны в моторном топливе в целом и его i -м компоненте; b_t^a и b_{ti}^a – удельные расходы моторного топлива в целом и его i -го компонента на один автомобиль в год; ω_{ti}^a – доля i -го компонента в структуре МТ; $\bar{\omega}^a$ – структура МТ в ДХ в ретроспективный период; $\alpha_t^{эл}$ – доля электромобилей; n_t^a – обеспеченность населения личными легковыми автомобилями.

Технологический параметр b_{ti}^a является синтетическим, т.е. $b_{ti}^a = g_{ti}^a L_{ti}^a$, где L_{ti}^a – годовой пробег единицы автотранспорта на i -м виде топлива, g_{ti}^a – удельный расход i -го вида топлива на единицу пробега. Величины L_{ti}^a и g_{ti}^a не входят в отечественную статистику. Поэтому целесообразно использовать параметр b_{ti}^a , который удается рассчитать на основе имеющейся статистической информации. Прогнозирование данного параметра выполняется путем исследования тенденций развития технологий автотранспорта. Структурные параметры ω_{ti}^a прогнозируются на основе анализа ретроспективных трендов по стране и регионам и зарубежного опыта. Обеспеченность населения личными легковыми автомобилями прогнозируется по перспективным значениям душевых доходов населения.

Прогнозирование спроса ДХ на моторное топливо по регионам страны производится подобным образом. Для согласования региональных прогнозов с прогнозом по стране используются балансовые уравнения вида (11).

5. Модель энергосбережения и энергозамещения в секторе конечного потребления

В рассматриваемой методике прогнозирования эта модель предназначена для оценки объемов энергосбережения и энергозамещения в секторе конечного потребления в прогнозный период. Для краткости модель ниже записана только для страны в целом.

Модель формулируется как оптимизационная: найти вариант использования ТЭР в секторе конечного потребления, обеспечивающий минимум затрат за весь расчетный период, т.е.

$$\min Z = \sum_t \sum_p \sum_i c_{tpi} x_{tpi} + \sum_t \sum_p \sum_i \sum_{j \in J^{es}} c_{tpij}^{es} x_{tpij}^{es} + \sum_t \sum_p \sum_i \sum_{j \in J^{ex}} c_{tpij}^{ex} x_{tpij}^{ex} + \sum_t \sum_p \sum_{j \in J^p} c_{tpj}^y y_{tpj} \quad (26)$$

при условиях

$$a_{tpi} x_{tpi} + \sum_{j \in J^{es}} a_{tpij}^{es} x_{tpij}^{es} + \sum_{j \in J^{ex}} a_{tpij}^{ex} x_{tpij}^{ex} + \sum_{j \in J^p} y_{tpj} \geq V_{tp}, \quad \forall i \in I; \quad (27)$$

$$\sum_p x_{tpi} \leq b_{ti}, \quad \forall i \in I; \quad (28)$$

$$x_{tpi} \leq b_{tpi}, \quad \forall i \in I, p \in P; \quad (29)$$

$$a_{tpi}x_{tpi} - \sum_{j \in J^{es}} a_{tpij}^{es}x_{tpij}^{es} - \sum_{j \in J^{ex}} a_{tplj}^{ex}x_{tplj}^{ex} \geq 0, \quad \forall i \in I, p \in P; \quad (30)$$

$$V_{tp} - \sum_j y_{tpj} \geq 0, \quad \forall p \in P; \quad (31)$$

$$x_{tpij}^{es} \leq \Psi_{tpij}^{es}, \quad x_{tpij}^{es} \leq \Psi_{tpij}^{ex}, \quad y_{tpj} \leq \Psi_{tpj}^y, \quad \forall j \in J; \quad (32)$$

$$x_{tpij}^{es} - x_{t-1,pij}^{es} \geq 0, \quad x_{tpij}^{ex} - x_{t-1,pij}^{ex} \geq 0, \quad y_{tpj} - y_{t-1,pj} \geq 0, \quad \forall j \in J; \quad (33)$$

$$\sum_t x_{tpij}^{es} \leq \bar{\Psi}_{pij}^{es}, \quad \sum_t x_{tpij}^{ex} \leq \bar{\Psi}_{pij}^{ex}, \quad \sum_t y_{tpj} \leq \bar{\Psi}_{pj}^y, \quad \forall j \in J; \quad (34)$$

$$x \geq 0, \quad y \geq 0, \quad (35)$$

где x_{tpi} – объемы потребления i -го энергоносителя (т.е. i -го вида конечной энергии) для выпуска p -го продукта (вида полезной энергии); x_{tpij}^{es} – объем экономии i -го энергоносителя по j -й энергосберегающей технологии при выпуске p -го продукта; x_{tpij}^{ex} – тоже в отношении энергозамещения; y_{tpj} – объем экономии p -го продукта путем реализации j -го мероприятия; V_{tp} – годовые объемы выпуска p -го продукта; b_{ti} и b_{tp} – ограничения на потребление i -го энергоносителя, соответственно, суммарное и на производство p -го продукта; Ψ_{tpij}^{es} , Ψ_{tpij}^{ex} , Ψ_{tpj}^y – ограничения на объемы применения в каждый период t энергосберегающих и энергозамещающих технологий (мероприятий) и мероприятий по экономии продуктов; $\bar{\Psi}_{pij}^{es}$, $\bar{\Psi}_{pij}^{ex}$, $\bar{\Psi}_{pj}^y$ – потенциалы (предельные суммарные объемы) применения соответствующих технологий, определенные на начало периода прогнозирования; c – удельные затраты; a – коэффициенты при переменных; I – множество рассматриваемых в модели видов конечной энергии (энергоносителей), $i, l \in I$; P – множество рассматриваемых в модели продуктов; каждый продукт соответствует суммарному выпуску продукции определенного ВЭД в сопоставимых ценах, т.е. каждый ВЭД выпускает только один продукт, $p \in P$; J^{es} , J^{ex} – множества энергосберегающих и энергозамещающих технологий (мероприятий); J^p – множество мероприятий по экономии p -го продукта/полезной энергии (например, повышение термического сопротивления ограждающих конструкций жилых зданий, что ведет к снижению потребностей в тепловой энергии на цели поддержания комфортной температуры внутри здания).

Неравенства типа (27) определяют годовые объемы выпуска продукции каждым ВЭД и согласовывают их с объемами спроса на ТЭР. Неравенства (28) представляют ограничения на суммарное потребление каждого энергоносителя, (29) – такие же ограничения применительно к каждому ВЭД. Условие (30) гарантирует непревышение суммарных объемов энергосбережения и энергозамещения над объемами энергопотребления для каждого энергоносителя по всем ВЭД. Неравенства (31) – балансовые ограничения на суммарные объемы экономии продуктов (полезной энергии). Условиями (32) задаются ограничения на объемы применения рассматриваемых в модели технологий (мероприятий). Динамические условия (33) вводят для каждой технологии требования несокращения освоенной части потенциалов энергосбережения, энергозамещения и экономии производства продукции. Кумулятивные ограничения (34) требуют для каждой технологии непревышения потенциалов ее применения. Неравенствами (34) задаются условия неотрицательности переменных. Модель (26)–(35) формируется на той же информационной базе, которая лежит в основе имитационных моделей, приведенных в разделе 4.

Данная модель по сути представляет общую постановку задачи прогнозирования спроса сектора конечного потребления на ТЭР. Однако в разработанной схеме прогнозирования энергопотребления ей отводится вспомогательная роль. Как отмечалось выше, она используется для оценки объемов энергосбережения и энергозамещения в секторе конечного потребления. Прогнозирование энергопотребления осуществляется с использованием имитационных моделей, которые позволяют более корректно учесть особенности формирования спроса на ТЭР со стороны каждого ВЭД.

Заключение. В ИНЭИ РАН разработан макроэкономический подход к прогнозированию энергопотребления страны и регионов, отражающий рыночный характер формирования спроса на топливо и энергию и учитывающий особенности различных секторов экономики. Он реализован в виде комплекса адаптивных имитационных моделей. На основе этих моделей и соответствующих баз данных разработан и реализован распределенный модельно-информационный комплекс EDFS. С его помощью выполнен большой объем научных исследований и успешно решались разнообразные прикладные задачи в интересах органов государственной власти (Минэнерго, Минэкономики и др.), ведущих отечественных энергетических компаний (ОАО “Газпром”, ОАО “РАО ЕЭС России” и др.) и ряда других организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.А., Вигдорчик А.Г. Топливно-энергетический комплекс. Методы исследования оптимальных направлений развития. М.: Наука, 1979. 279 с.
2. Кононов Ю.Д., Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. и др. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей экономики и энергетики. Новосибирск: Наука, 2009. 178 с.
3. Филиппов С.П. Интегрированный подход к прогнозированию потребностей страны и регионов в энергоносителях на долгосрочную перспективу // Вестник СГТУ. 2008, № 1 (31). С. 13–27.
4. Energy in a Finite World: a Global Systems Analysis / Program Leader W. Hafele. – Cambridge – Massachusetts: Ballinger Publish. Co., 1981. 880 p.
5. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Волкова Е.В., Макарова А.С. Методические основы разработки перспектив развития электроэнергетики. М.: ИНЭИ РАН, 2007, 103 с.
6. Шапот Д.В., Макаров А.А., Лукацкий А.М., Малахов В.А. Инstrumentальные средства для количественного исследования взаимосвязей энергетики и экономики // Экономика и матем. методы. 2002. Т. 38. № 1. С. 45–56.
7. Малахов В.А., Дубынина Т.Г. Модель исследования макроэкономических последствий ограничений эмиссии парниковых газов // Экономика и матем. методы. 2010. Т. 46. № 2.

Москва

Поступила в редакцию

10.III.2010