

## **НЕОБХОДИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

**Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Капустин Н.О.**  
*Институт энергетических исследований РАН*  
vakulagin@ineiran.ru

*Аннотация: Технологический прогресс в энергетике приводит к изменению закономерностей и условий функционирования и развития рынков. Всё это делает неактуальными часть из широко распространенных сегодня подходов прогнозирования. В результате появляется большая потребность в новых методиках, которые позволяют учитывать современные реалии рынков. В статье анализируются основные технологические и рыночные процессы, приводящие к потере актуальности используемых методик, и рассматриваются направления совершенствования инструментария прогнозирования, которые позволят повысить объективность и качество разрабатываемых прогнозов.*

**Ключевые слова:** ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ЭНЕРГЕТИКА, МОДЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА.

### **Введение**

К началу 21 века в мире сложилась относительно устойчивая картина энергообеспечения. Промышленно развитые страны использовали преимущественно ископаемые топлива, каждое из которых занимало свою вполне определённую нишу в секторах конечного потребления и на стадии переработки. Нашла своё место в энергобалансе и атомная энергетика, обеспечивая базовую нагрузку электросистем ряда стран. В беднейших странах продолжали доминировать наиболее доступные источники энергии, включая дрова. На этом фоне появление стандартизированной по многим странам мира статической информации, программного и аппаратного обеспечения, позволяющего обрабатывать большие массивы данных, дало возможность для создания комплексного оптимизационного инструментария прогнозирования развития энергетических рынков. Общие методологические подходы для этого уже были часто разработаны ранее и во многих случаях доказали свою актуальность и работоспособность при применении на локальных задачах [1,2]. Учитывая достаточно высокую замкнутость отдельных топливных рынков и прямые взаимосвязи с секторами потребления вполне логично было именно в этих рамках искать решения по рациональным вариантам энергоснабжения. Разумным было прогнозировать общее первичное

энергопотребление исходя из экономико-демографических показателей, потом на этой основе определять спрос на отдельные источники энергии и динамику в секторах потребления и далее моделировать возможности поставок на каждом из топливных рынков.

Однако менее чем за 20 лет, прошедших с начала 21 века, ситуация на рынках кардинально изменилась. И эти процессы заставляют в корне пересматривать подходы к долгосрочному прогнозированию энергетики.

В настоящей статье описываются ключевые изменения, происходящие в мировой энергетической системе, предложены методологические подходы, направленные на учет этих изменений в модельной инструментари на примере комплекса прогнозирования мировой энергетики ИНЭИ РАН – SCANNER [3,4].

## **1 Ключевые изменения энергосистем и проблемы при прогнозировании**

Выделим несколько ключевых аспектов, отражающих изменения на энергетических рынках, и требующих пересмотра прежних подходов к прогнозированию развития мировой энергетики:

- **Теряют свою актуальность прежние подходы к прогнозированию первичного энергопотребления.** Первичное энергопотребление можно было вполне корректно рассчитывать на основе экономико-демографических показателей и сопоставлять с конечным потреблением с учетом сложившихся зависимостей, включая потери на преобразование. Однако именно на этапе преобразования стали происходить существенные изменения, которые пока дают не такие сильные отклонения текущих показателей, но в перспективе, по мере дальнейшего расширения использования ВИЭ, будут оказывать критическое влияние на рассчитываемый спрос. Проблема в том, что производимая электроэнергия на ВИЭ (солнце, ветер) методологически учитывается практически со 100% КПД в отличие от выработки электроэнергии на ископаемых топливах, где потери часто превышают 50%. Таким образом, для получения единицы электроэнергии на основе таких видов ВИЭ требуется существенно меньше исходной первичной энергии, чем при использовании угля и газа. В результате при сохранении объемов спроса в конечных секторах, потребность в первичной энергии при переходе на новые ВИЭ сильно снижается. А, следовательно, меняются тренды энергоемкости ВВП.
- **Прекращается абсолютное доминирование нефтепродуктов в транспортном секторе.** Нефтепродукты традиционно являются основой для транспортного сектора, а сам сектор играет ключевую роль в спросе на нефтепродукты. Эта взаимозависимость позволяла сформировать устойчивые корреляционные зависимости, опирающиеся на оценки спроса на основе изменения демографических и экономических показателей с учетом страновых особенностей. Однако ускоренное развитие рынка электромобилей и расширение использования газа в качестве моторного топлива приводят к слоому сложившихся закономерностей в транспортном секторе [5,6]. Особенно это важно в условиях ожидаемого дальнейшего расширения конкуренции на транспорте в перспективе, когда к имеющимся альтернативам могут прибавиться топливные элементы на основе водорода и другие источники энергии.
- **Появление дисбаланса на стороне производства энергии.** Традиционно задачей энергетического комплекса было обеспечение спроса с учетом имеющихся дисбалансов в сегментах потребления. При этом в производстве энергии одни источники обеспечивали равномерную нагрузку (например, атом), а другие позволяли гибко подстраивать производство под динамику спроса (газ, уголь, нефтепродукты, гидро). Теперь начинает формироваться новый дисбаланс, но уже на стороне производства. Рост доли ВИЭ, стимулируемый как повышением их конкурентоспособности, так и энергополитикой направленной на декарбонизацию глобальной энергетики, приводит к изменению режимов работы энергосистем. Солнечные панели вырабатывают энергию в период солнечной инсоляции, а ветряные станции, только когда есть соответствующие техническим параметрам потоки ветра. Очевидно, что в вечернее и ночное время, или при наличии облачности, возможности производства электроэнергии на солнце резко сокращаются, как и в зимние периоды времени в отдельных странах. Выработка ветряной энергии зависит от силы ветра. При этом при отсутствии ветра, или очень сильном ветре, установки останавливаются. Сами природные условия часто являются непредсказуемыми, что делает таким же непредсказуемым и объемы производства энергии. Появление такого второго дисбаланса, значимость которого постоянно растет на фоне расширения использования

ВИЭ, почти полностью меняют привычную картину в сегменте «генерации», что требует соответствующей адаптации моделей прогнозирования электроэнергетики.

- **Усиление межтопливной конкуренции в электроэнергетике.** Ранее в электроэнергетике различных стран преимущественно конкурировало между собой ограниченное число поставщиков определенного топлива в рамках имеющихся мощностей генерации. Ценовые привязки были достаточно предсказуемы, что позволяло формировать понятную структуру мощностей с высокими КИУМ. Теперь не просто расширилось количество поставщиков топлива (например, газа), имеющих доступ к крупнейшим рынкам, но и сильно возросла межтопливная конкуренция. Газ одновременно конкурирует с углем, в рамках перспективных решений с ВИЭ и атомом, рассматриваются варианты с водородной энергетикой. Таким образом обособленный анализ и прогнозирование любого одного из топливных рынков постепенно теряет смысл.
- **Усиление межтопливной конкуренции во всех секторах потребления.** Транспортный сектор стал далеко не единственным в структуре потребления, где существенно расширилась конкуренция между разными топливами. Новые технологические решения позволяют сформировать для потребителя целый набор различных альтернатив энергоснабжения. При этом, благодаря своей универсальности, всё более востребованным становится использование электроэнергии для различных целей, включая обогрев и перемещение.
- Формируется новый набор финансовых и политических ограничений, влияющий на выбор решений по энергоснабжению:
  - На фоне неустойчивости рынков опасение участников рынка по осуществлению долгосрочных инвестиций. Высокие формируемые риски существенно осложняют процессы привлечения заемного финансирования, страхования и т.д. В результате, даже в случаях меньшего уровня окупаемости, инвесторы выбирают короткие проекты;
  - Новые экологические стандарты, например требования к судовым топливам по выбросам серы, или запрет на продажу автомобилей с ДВС, которые полностью ограничивают потребления отдельных видов топлива;
  - Неопределенности климатической политики и экологических ограничений, которые формируют набор развилки, влияющий на приоритет использования различных источников энергии; Экологические ограничения на разработку углеродсодержащих топлив, которые не дают возможности включить в состав производственных мощностей даже эффективные экономические проекты.
  - Возможные геополитические и торговые ограничения.

## 2 Учет происходящих изменений в методологии прогнозирования мировой энергетики

Направления учета происходящих изменений приведем на примере функционирующего в ИНЭИ РАН модельно-информационного комплекса SCANNER. Обобщенная схема расчетов в рамках комплекса представлена на рисунке (Рисунок 1).

Все выделенные ключевые изменения мировой энергетической системы стали важнейшими задачами модернизации комплекса SCANNER, проводимого в ИНЭИ РАН с 2015 года. Часть этих задач удалось успешно решить, по другим работы продолжаются.

Проблему с прогнозированием первичного энергопотребления правильнее всего решать путем прогнозирования конечного потребления по секторам и выстраивания от него корректных цепочек, отражающих движение энергоресурсов, включая преобразование, потери и т.д. В результате получается не только спрогнозировать первичное энергопотребление, но и увидеть достоверную картину распределения источников энергии по цепочкам поставок.

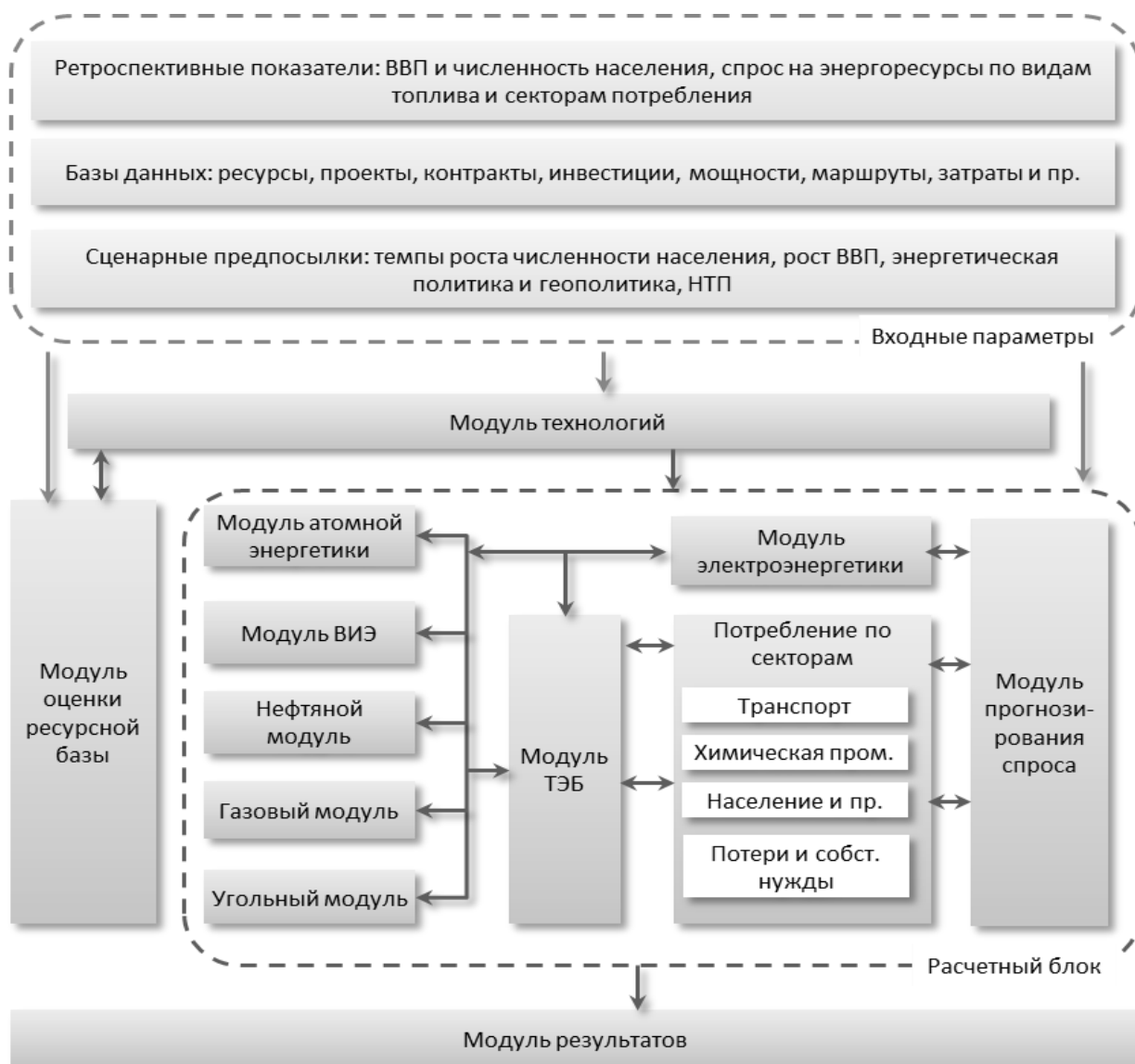


Рисунок 1 - Схема моделей прогнозирования мировой энергетики комплекса SCANER

Источник: ИНЭИ РАН.

Для корректного учета изменений в транспортном секторе необходим специализированный инструментарий, позволяющий прогнозировать потребление в нем с учетом влияющих параметров – технологий, потребительских предпочтений, экологических факторов, энергополитики и т.д. Всё это нашло свое отражение в разработанной в ИНЭИ РАН модели «Прогнозирование спроса на топлива с учетом научно-технического прогресса и межтопливной конкуренции в сегменте дорожной транспортировки» (ПСДТ). Модель получает из входных данных перспективные значения макропараметров: ВВП и населения и ретроспективные показатели по численности автомобилей, динамике потребления нефтепродуктов по видам и т.д. Расчет перспективного потребления нефтепродуктов и их субститутов осуществляется с учетом предпосылок по изменению влияющих на это факторов: стоимости автомобилей на различном виде топлива, обеспеченности заправочной (зарядной) инфраструктурой, стоимости топлив, потребительской привлекательности, уровнем государственной поддержки и др.[7,8]. В результате расчетов получается спрос на отдельные виды нефтепродуктов, в том числе: СУГ, автомобильный и прямогонные бензины, дизельное топливо, керосин, прочие и темные нефтепродукты (Рисунок 2), а также прогноз потребления других источников энергии в сегменте дорожной транспортировки (электроэнергия, газ и т.д.).



Рисунок 2 - Схема функционирования комплекса расчета спроса на нефтепродукты

Источник: ИНЭИ РАН.

Появление дисбаланса на стороне производства энергии главным образом отражается на секторе электрогенерации. Если раньше для каждой страны были вполне понятные определенные режимные уровни нагрузки, формируемые спросом, – утро/вечер (как правило это пик), ночь (не пик) и день (полупик), то по мере развития ВИЭ режимов становится значительно больше. Фактически это три стандартных режима умноженных на количество периодов с разными объемами выработки ВИЭ и сезонность, т.к. производство электроэнергии, например на солнечных панелях, от этого сильно зависит. В результате необходимо искать поиск оптимального варианта удовлетворения спроса с учетом множества режимов работы системы, по оценкам ИНЭИ РАН это минимум 18 режимов. При этом расширились и варианты удовлетворения спроса, причем некоторые из них можно использовать в комбинации с накопителями энергии. Учитывая ожидаемое изменение затрат как в стоимости производства электроэнергии на отдельных источниках, так и в стоимости хранения, требуется расчетный инструмент, позволяющий при всём этом наборе условий найти оптимальный вариант работы системы. При этом необходимо учитывать еще целый набор параметров, включая стоимость выбросов, энергополитику, особенности каждой страны, сроки вывода действующих мощностей и т.д.. Согласно разработанной методике, прогнозирование осуществляется на основе совмещения методов имитационного и оптимизационного моделирования. Система должна гибко подстраиваться под имеющуюся исходную статистику, имея возможность использовать различную временную глубину данных и работать как с данными по мощностям и выработке, так и только с выработкой, что обусловлено качеством исходных данных. Разработка такой системы комплексного прогнозирования электроэнергетики по режимам позволяет параллельно решить проблему, связанную с усилением межтопливной конкуренции в электроэнергетике и учетом этого в расчетах. Дополнительно фактор межтопливной конкуренции, как в электроэнергетике, так и в других секторах потребления, есть возможность учитывать в отраслевых моделях (газовой, угольной, нефтяной) путем установления граничных уровней и объемов допустимого переключения на другие топлива при высоких ценах. При этом всё большую актуальность приобретает взаимосвязанная работа рыночных моделей и счет в несколько итераций с уточнением параметров информации для обмена.

Финансовые и политические ограничения по сути являются входными данными, но требуют возможности учета их в элементах модельного комплекса. В частности, необходимо включение в основную часть расчетов стоимости выбросов CO<sub>2</sub>, необходимы настройки по требованиям к качеству топлив, внедрение коэффициентов воздействия энергополитики на выбор, или прямых ограничений и т.д. В отдельных случаях, в том числе в вопросах технологического трансфера, эффективно использование системы кластеризации. Также необходимо иметь возможность

корректировки механизмов финансового влияния, в частности установки торговых пошлин. Для некоторых моделей актуальным становится показатель «политическое стимулирование», позволяющий корректировать естественные экономические параметры в стороны преимуществ отдельных источников энергии. При этом часто используются и потребительские ограничения, например различные условия для видов транспортных средств по въезду в города, использованию парковок и выделенных полос.



Рисунок 3 - Сроки обновления оборудования и инфраструктуры (столбики – средний срок, линии с ограничениями – диапазоны значений).

Источник: ИНЭИ РАН.

Достаточно важным в прогнозировании является учет параметров технологического развития, связанный как с удешевлением производства определенных видов энергии, так и с появлением новых возможностей по энергоснабжению. Но, говоря о практическом воздействии технологий на рынки, важно понимать сроки функционирования различного оборудования в энергетике и секторах потребления (Рисунок 3). Если в отдельных сегментах обновление происходит достаточно быстро

и в течение нескольких лет новая технология может доминировать в использовании, то для других может потребоваться более 50 лет. Тем не менее, происходящие изменения нельзя недооценивать. Если еще 20 лет назад солнечная и ветряная энергетика практически отсутствовали в структуре генерации, то сегодня завоевали значительную часть рынка и продолжают развиваться быстрыми темпами. Схожая ситуация с электромобилями. В 2015 г. их было меньше 1 млн, к 2019 г. стало около 5 млн, а к 2040 г., согласно расчетам ИНЭИ РАН, может быть 250-600 млн, в зависимости от сценария.

Для большинства моделей различные параметры затрат являются входной информацией, заранее заложенной в базе данных. При этом при формировании таких баз данных часто задаются программные возможности корректировки показателей с учетом закладываемого в сценарии технологического прогресса и доступа к этим технологиям по странам мира.

Существенный прогресс в последние годы был достигнут в разработке нетрадиционных ископаемых топлив, прежде всего сланцевых нефти и газа. Но в рамках осуществленного технологического прорыва потенциал удешевления уже практически исчерпан. При этом остаются возможности использования апробированных решений на других видах нетрадиционных ресурсов [9]. Ожидается переход на новый тип реакторов в атомной энергетике. Но длительные сроки внедрения позволят на рынок этим технологиям выйти не ранее 2030 г., а занять долю в производстве атомной энергии хотя бы 30% не ранее, чем к 2050 г. Анализ перспективных мировых технологий показывает, что они способны существенно преобразить энергетическую картину мира в ближайшие 20 лет [10]. Это предопределяет необходимость корректного учета их влияния в системах прогнозирования.

Энергетический мир становится более сложным и многофакторным. Его корректное прогнозирование требует использования усовершенствованного инструментария. Те методологии, которые ещё вчера позволяли получать результаты с высокой степенью достоверности, сегодня устаревают. При этом только возрастает потребность в инструментарии, который позволял бы не только прогнозировать рынки, но и искать экономические эффективные направления их развития, давал бы возможность заранее оценивать эффекты от планируемых решений. Поэтому необходимо дальнейшее развитие систем прогнозирования, в том числе с использованием подходов изложенных в данной статье.

## Литература

1. *А.А.Макаров, Л.А.Мелентьев* Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства/Новосибирск, 1973.
2. *Л.А.Мелентьев* Системные исследования в энергетике/Москва, Наука, 1983.
3. *А.А.Макаров, С.П.Филиппов* SCANNER: Модельно-информационный комплекс, ИНЭИ РАН, 2011.
4. *Митрова Т. А., Кулагин В. А., Галкина А. А., Грушевенко Д. А., Грушевенко Е. В., Козина Е. О., Мельникова С. И., Осипова Е. и др.* Эволюция мировых энергетических рынков и ее последствия для России / под ред. А.Макарова, Л.Григорьева, Т.Митровой. Рецензенты В.Фортов, А.Некипелов - ИНЭИ РАН - АЦ: М., 2015. ISBN 978-5-91438-019-6
5. *Грушевенко Д. А., Грушевенко Е. В., Кулагин В. А.* Энергопотребление российского сектора автомобильного транспорта: перспективы развития межтопливной конкуренции в условиях технологических инноваций // Форсайт, т. 12, № 4, 2018.
6. *Грушевенко Д. А.* Межтопливная конкуренция на транспорте // В кн.: «Направления адаптации мировой энергетики к новым рыночным условиям / Под редакцией академика А.А. Макарова, канд. экон. наук Т.А. Митровой и В.А. Кулагина» (Сер. «Проблемы развития энергетики России и мира») — М.: ИНЭИ РАН, 2018. — 122 с.: ил. ISBN 978-5-91438-024-0
7. *Митрова Т.А., Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Грушевенко Е.В.* Технологические инновации как фактор спроса на энергоносители в секторе автомобильного транспорта// Форсайт, 2015, т.9, №4
8. *Mitrova T., Kulagin V., Grushevenko D., Grushevenko E., Galkina A.* Integrated method of petroleum products demand forecasting considering economic, demographic and technological factors // Special Issue of 2015 Energy Demand Economics and business letters, 2015/
9. *Д.А.Грушевенко, В.А.Кулагин* Нетрадиционная нефть: технологии, экономика, перспективы — М.: ИНЭИ РАН, 2019. — 62 с.: ил. ISBN 978-5-91438-026-4

10. Перспективы развития мировой энергетики с учетом влияния технологического прогресса – М. ИНЭИ РАН, 2019.