

# С Р А В Н Е Н И Е ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ МЕЖУЧРЕЖДЕНЧЕСКИЙ ПРОЕКТ DECADES

ХАНС-ХОЛЬГЕР РОГНЕР И АРШАД ХАН

**В**ажнейшим элементом устойчивого развития является наличие достаточной для удовлетворения потребностей и доступной по стоимости энергии. Задача в том, чтобы разработать такие виды энергоснабжения, которые наилучшим образом обеспечивают развитие и улучшают качество жизни, особенно в развивающихся странах, при одновременном сведении к минимуму воздействия человеческой деятельности на здоровье и окружающую среду.

Необходимость разработки и осуществления устойчивых стратегий в секторе электричества неоднократно подчеркивалась на международных форумах, таких как Симпозиум старших экспертов по электричеству и окружающей среде (Хельсинки, 1991 г.), Конференция ООН по окружающей среде и развитию (ЮНСЕД, Рио-де-Жанейро, 1992 г.), 16-я Конференция Мирового энергетического совета (Токио, 1995 г.) и совсем недавно — третья Конференция сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Киото, Япония, декабрь 1997 г.).

В Повестке дня на XXI век, принятой на Конференции в Рио-де-Жанейро, подчеркивается, что проблемы охраны окружающей среды и развития должны быть включены в процесс принятия решений. Во втором оценочном докладе Межправительственной группы по изменению климата (МГИК) указывается на необходимость всестороннего анализа вариантов, предусматривающих ослабление воздействия человеческой деятельности на окружающую среду с целью уменьше-

ния опасностей, связанных с глобальным изменением климата, и реализации соответствующих мероприятий, способствующих внедрению наиболее экологически благоприятных технологий преобразования энергии.

На Конференции в Киото государства приняли Протокол к Конвенции об изменении климата, в котором ставится цель снизить к 2008—2012 гг. общий уровень выбросов от группы из шести газов, создающих парниковый эффект. Согласно Протоколу, от промышленно развитых стран потребуются снижение суммарных выбросов парниковых газов на 5,2%.

В этом глобальном контексте в начале 90-х гг. МАГАТЭ в партнерстве с восемью международными организациями инициировало межучрежденческий проект под названием DECADES (см. текст в рамке на стр. 4), нацеленный на разработку баз данных и методологий для сравнительной оценки различных энергетических источников и конверсионных технологий.

В данной статье освещается ход осуществления проекта, приводятся некоторые показательные примеры применения инструментальных программных средств проекта и обзор исследований по сравнительному анализу в странах — членах МАГАТЭ.

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

Базы данных и программное обеспечение, разработанные в рамках проекта DECADES, нашли эффективное применение в ряде сравнительных анализов.

### Сравнение электростанций.

Сравнивались значения промышленного КПД нескольких типов станций, как традиционных, так и находящихся в стадии разработки (см. диаграмму на стр. 3). Стоит отметить, что, хотя можно добиться значительного повышения производительности традиционных технологий, основанных на использовании газового топлива, перспективы усовершенствования других традиционных методов производства энергии представляются минимальными. Однако новые технологии на базе использования иных процессов сгорания и усовершенствованных энергетических циклов в конечном счете превзойдут лучшие показатели современных методов.

Данные по производительности в значительной степени зависят от характеристик используемого топлива, организации эксплуатации станций и других местных условий. Производительность электростанций варьируется от страны к стране и во многих случаях ниже приведенных здесь значений для технологий производства электроэнергии на угольном, нефтяном и газовом топливе.

Сравнивались также факторы, обуславливающие выбросы CO<sub>2</sub>, для различных типов электростанций, работающих на

*Г-н Рогнер возглавляет Секцию планирования и экономических исследований Департамента ядерной энергии МАГАТЭ; г-н Хан — сотрудник этой Секции. В подготовке статьи принимали участие также сотрудники Секции г-н Флорин Владу и г-н Владимир Каграманян.*

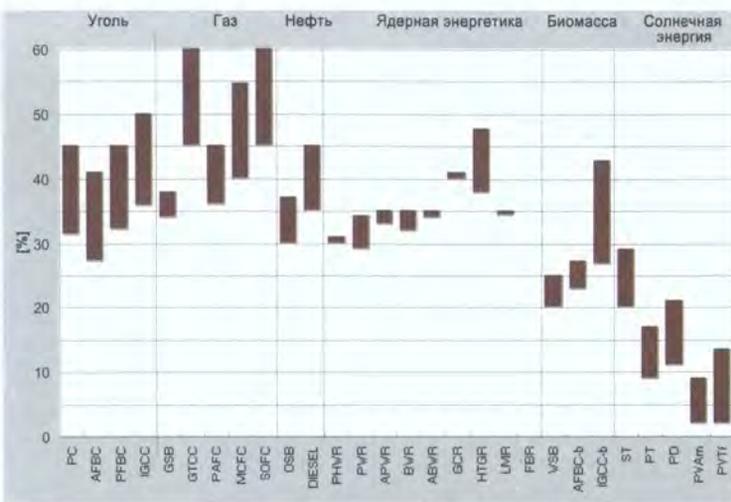
ископаемом топливе, причем брались станции с одинаковой мощностью (500 МВт) и схожими типами углей для угольных станций. Наиболее высокие уровни выбросов CO<sub>2</sub> отмечены у станций, работающих на угле. Значительный разброс в уровнях выбросов CO<sub>2</sub> является результатом различий в эффективности производства электроэнергии.

Выбросы CO<sub>2</sub> зависят от уровня содержания углерода в топливе (наивысшего для угля, низшего для природного газа), производительности, мер контроля загрязнений, предусмотренных в различных конструкциях станций, и других факторов. При изучении факторов эмиссии предполагается использование наилучших из имеющихся технологий и топлива хорошего качества. Аналогичные сравнения можно провести для других загрязнителей, включая SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и макрочастицы.

Сравнительные экономические оценки, проведенные на уровне электростанций с использованием базы данных DECADES, показывают, что ядерная энергетика конкурентоспособна во многих странах с точки зрения производительности. Сравнились общие капитальные затраты для различных типов установок в нескольких странах (см. диаграмму на стр. 4). Как и ожидалось, общие капитальные затраты на единицу мощности в разных странах отличаются друг от друга, но диапазон различий невелик, когда речь идет о схожих технологиях.

**Сравнение энергетических цепей.** Сравнились максимальные и минимальные выбросы парниковых газов при производстве электричества с использованием твердого, жидкого, газообразного топлива, гидроэнергии, ядерной энергетике, энергии ветра, солнца и возобновляемых энергисточников. С учетом всей энергетической цепочки производства и потребления электричества ядерная энергетика дает выход двуоксида углерода в 40–100 раз меньше по сравнению с современными энергетическими цепочками

### СРАВНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО КПД ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА



**Ископаемое топливо:** PC — распыленный уголь AFBC — сжигание в псевдооживленном слое при атмосферном давлении PFBC — сжигание в псевдооживленном слое под давлением IGCC — комбинированный цикл интегрированной газификации GSB — газовый паровой котел GTCC — газотурбинный комбинированный цикл PAFC — фосфорнокислый топливный элемент MCFC — топливный элемент из расплава углекислой соли SOFC — твердоокисный топливный элемент OSB — нефтяной паровой котел DIESEL — дизель

**Ядерная энергетика:** PHWR — реактор на тяжелой воде под давлением PWR — реактор на воде под давлением APWR — усовершенствованный PWR BWR — реактор на кипящей воде ABWR — усовершенствованный BWR GCR — реактор с газовым охлаждением HGCR — высокотемпературный GCR LMR — реактор на жидком металле FBR — быстрый реактор-размножитель

**Био- и солнечная энергия:** WSB — дровяной паровой котел AFBC-b — сжигание в псевдооживленном слое при атмосферном давлении с использованием биомассы IGCC-b — комбинированный цикл интегрированной газификации с использованием биомассы ST — солнечная термальность PT — параболический желоб PD — параболический гелиоколлектор PVAm — фотоэлектричество на основе использования аморфных материалов PVTf — тонкая фотоэлектрическая пленка

ископаемого топлива (см. диаграмму на стр. 5). Эмиссия парниковых газов от цепочки ядерной энергетике происходит главным образом в связи с использованием ископаемого топлива при добыче, обработке и обогащении урана, а также при производстве стали и цемента для строительства реакторов и установок топливного цикла. Эти выбросы, которые и так ничтожно малы по сравнению с эмиссией в результате непосредственного использования ископаемого топлива для производства электроэнергии, могут быть сокращены в еще большей степени при совершенствовании процесса производства энергии. На стадии обогащения такие усовершенствования включают, например, замену газовой диффузии менее энергоемкими процессами, такими как центрифугирование или лазерное разделение

изотопов. В циклах ископаемого топлива наибольшая неопределенность характерна для природного газа в основном из-за различных оценок относительно выбросов метана в атмосферу во время бурения, добычи и транспортировки природного газа.

Нелишне упомянуть, что отличительной чертой ядерной энергетике является включение во внутренние издержки производства расходов на обеспечение безопасности, обращение с радиоактивными отходами и снятие установок с эксплуатации. Это означает включение таких расходов в цену ядерной электроэнергии. С другой стороны, затраты, необходимые для преодоления негативного воздействия других источников производства электроэнергии на здоровье и окружающую среду, остаются полностью не включенными во

внутренние издержки частично из-за трудностей их количественного выражения.

#### Расширение энергосистем.

Компьютерные средства проекта DECADES могут использоваться для разработки экологически приемлемых и наиболее экономичных планов расширения систем производства электричества или для анализа целесообразности включения конкретного проекта в напряженный долгосрочный наиболее экономичный план развития страны или региона. Их можно также неоднократно использовать для изучения наиболее экономичных методов сокращения расходов на защиту окружающей среды (например, минимизация затрат на создание системы по достижению плановых значений сокращения выбросов SO<sub>2</sub> или парниковых газов).

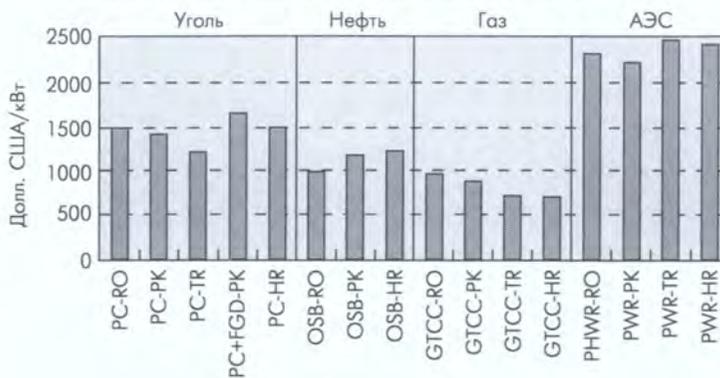
Оптимизация плана расширения осуществляется с учетом капитальных затрат, расходов на эксплуатацию и ремонт, на топливо, его инвентарные запасы и стоимости неиспользуемой энергии. После разработки оптимального плана расширения энергосистем программное обеспечение позволяет производить расчет выбросов в воздух, требований по отводу земли и производства твердых отходов по годам и этапам для каждой энергетической цепочки, включенной в систему, с тем чтобы рассчитать суммарные данные для всей системы электроснабжения.

### КОНКРЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе проекта DECADES при поддержке МАГАТЭ в рамках проекта координированных исследований (ПКИ) были проведены 22 конкретных исследования по странам для сравнительной оценки альтернативных стратегий и программ в секторе производства электроэнергии.

Целью конкретных исследований было определение стратегий производства электроэнергии, которые отвечают задачам защиты окружающей среды, особенно в части сокра-

### ИНВЕСТИЦИИ НА УРОВНЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ



Примечание: RO — Румыния, PK — Пакистан, TR — Турция, HR — Хорватия

Сокращения по технологиям см. примечания к диаграмме на стр. 3. Источник: CSDB

щения атмосферных выбросов, при расходах в приемлемых пределах. Рассмотрен широкий спектр проблем, включая потенциальную роль ядерной энергетики в сокращении выбросов парниковых газов; влияние налогообложения и/или ограничений на выбросы CO<sub>2</sub> на будущую структуру производства электроэнергии; и воздействие приватизации и дерегулирования сектора электричества на стратегические планы расширения электрических систем.

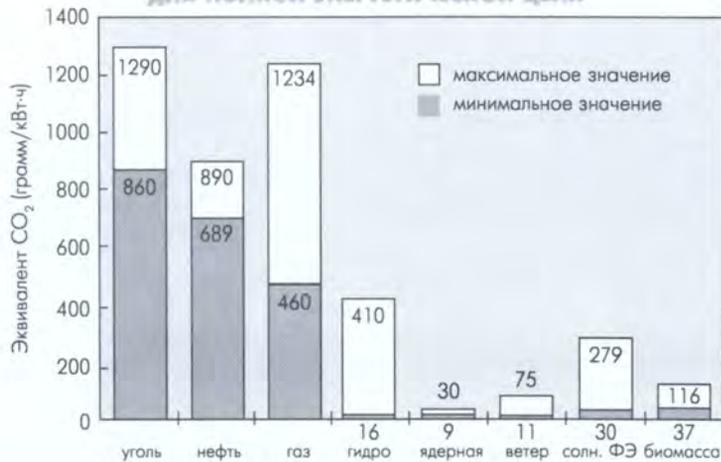
Значительное сокращение выбросов и других нагрузок на окружающую среду может быть достигнуто путем улучшения

работы существующих установок на различных звеньях энергетических цепочек. Реконструкция существующих электростанций, в особенности путем внедрения дополнительных технологий контроля за загрязнениями, часто оказывалась оправданной — с точки зрения результатов — мерой по уменьшению кислотности и улучшению качества воздуха в локальном масштабе. Было установлено, что эффективным с точки зрения затрат вариантом повышения производительности энергосистем во многих странах является развитие двухцелевого производства энергии (тока и тепла), особенно там, где уже существу-

### ОБЪЕДИНЕНИЕ СИЛ ДЛЯ

В 1992 г. девять международных организаций объединили усилия для осуществления межучрежденческого проекта "Базы данных и методологии для сравнительной оценки различных энергетических источников, используемых для производства электроэнергии" (DECADES). В их число вошли МАГАТЭ, Европейская комиссия (ЕК), Экономическая и социальная комиссия для Азии и Тихого океана (ЭСКАТО), Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), Всемирный банк (МБРР), Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР), Организация стран — экспортеров нефти (ОПЕК), Организация Объединенных Наций по промышленному развитию (ЮНИДО) и Всемирная метеорологическая организация (ВМО). Цель проекта состоит в том, чтобы способствовать ускорению разработки стратегий устойчивого развития энергетики в качестве неотъемлемой части планирования и принятия решений в электрическом секторе. В рамках проекта созданы технологические базы данных, разработаны аналитические средства и обеспечены подготовка кадров и помощь развивающимся странам в проведении сравнительных аналитических исследований. Компьютерные средства проекта DECADES включают

### ВЫБРОСЫ ЭКВИВАЛЕНТА CO<sub>2</sub> ДЛЯ ПОЛНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ



ют сети теплоснабжения для центрального отопления.

Большинство исследований по изучению возможностей расширения энерго мощностей показало, что затраты на ядерную энергетику эффективны, если речь идет о сокращении выбросов SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и CO<sub>2</sub>, а также других парниковых газов. Например, в Румынии проведен сравнительный анализ сценариев расширения применения газа и ядерной энергии. Было установлено, что благодаря использованию АЭС для расширения энергосистемы можно добиться значительного сокращения эмиссии CO<sub>2</sub> без

каких-либо серьезных увеличений общих расходов на наращивание энерго мощностей. Хотя в случае газового варианта выбросы CO<sub>2</sub> и сокращаются по сравнению со сценариями с преимущественным использованием угля, они значительно возрастают за исследуемый период. Выбросы SO<sub>2</sub> сокращаются в том и в другом варианте, но при ядерном сценарии они сокращаются примерно на 30% больше по сравнению с газовым вариантом.

Ряд исследований показал также, что хотя запланированных значений по сокращению эмиссии CO<sub>2</sub> можно достичь и

без использования ядерной энергетики, ее применение позволило бы значительно уменьшить расходы. Можно указать на то, что осуществление мероприятий и программ по защите окружающей среды, скорее всего, приведет к увеличению стоимости электроэнергии, поступающей от работающих на ископаемом топливе электростанций, в связи с необходимостью соблюдения ими установленных правил. Кроме того, обеспокоенность в связи с глобальным изменением климата заставляет многие страны рассматривать возможность принятия соответствующих политических решений, таких как введение налогов на выбросы углерода, что повлияло бы на конкурентоспособность ископаемого топлива для производства электроэнергии. По результатам исследования в Румынии расходы на снижение выбросов CO<sub>2</sub> при ускоренном внедрении ядерной энергетики составляют примерно 5 долл. США на тонну CO<sub>2</sub> или 18 долл. США на тонну углерода; эти значения находятся в нижней части диапазона таких расходов (во втором оценочном докладе МГИК они определены в размере 0—120 долл. США на тонну углерода).

В большинстве конкретных исследований в качестве возможных вариантов для расширения систем производства электроэнергии рассматривались электростанции с использованием комбинированного цикла природного газа — очень привлекательные с точки зрения КПД (55% или выше), капитальных вложений и кратких сроков строительства. При рассмотрении этого варианта необходимо также принимать во внимание другие факторы. В их число входят гарантированность поставки для стран, зависимых от импорта, потенциальная возможность колебаний цен на газ и доля выбросов углекислого газа при сгорании и метана во время добычи и транспортировки газа в общем загрязнении окружающей среды от эмиссии парниковых газов.

## ЭНЕРГОПЛАНИРОВАНИЯ

базы данных и аналитическое программное обеспечение, которые могут быть использованы для оценки неизбежных компромиссов между техническими, экономическими и экологическими требованиями различных технологий, циклов и систем производства электричества на национальном, региональном и международном уровнях.

Разработаны два типа технологических баз данных: База справочных технологических данных (БСТД) и Базы данных по конкретным странам (БДКС). БСТД предоставляет исчерпывающий, систематизированный набор технических, экономических и экологических данных по энергетическим цепочкам, где для производства электричества используются ископаемое топливо, ядерная энергия и возобновляемые источники энергии. В ней содержатся данные о порядка 300 технологиях, характеризующихся по уровню разработанности. В БД по странам собираются данные по технологиям производства электричества в различных странах или регионах с целью проведения конкретных исследований с помощью аналитического программного обеспечения проекта DECADES или других национальных средств планирования. Свои базы данных, в которых содержится информация о более чем 2500 технологиях, разработали свыше 25 стран.

Установившееся в ходе осуществления данного ПКИ сотрудничество экспертов по различным научным специальностям из разных стран оказалось весьма ценным и эффективным.

В особенности важно, что результатом такого сотрудничества, а также обмена информацией и опытом между различными группами специалистов, решающими сходные трудные проблемы — такие как сбор данных, описание технологий, определение и сравнение топливных циклов и анализ систем производства электроэнергии, — стали выявление и реализация общих подходов для их решения. Участие экспертов в областях анализа электрических систем, макроэкономики и оценки воздействия на окружающую среду привело к признанию необходимости согласования различных задач и приоритетов — например, снижения локального и глобального воздействия энергетики на экологию и решения социально-экономических проблем и обеспечения гарантированной поставки топлива — в рамках всесторонней оценки альтернатив.

## ВТОРОЙ ЭТАП ПРОЕКТА DECADES

На втором этапе проекта (1996—2000 гг.) основное внимание сосредоточено на распространении имеющихся компьютерных инструментальных средств, обучении пользователей их применению, поддержке страновых исследований и разработке новых аналитических возможностей.

Компьютерные инструментальные средства DECADES будут расширены с целью более полного охвата проблем оценки воздействия энергетики и интеграции показателей ее воздействия в процессы принятия решений. Области, в которых в настоящее время ведется дополнительная работа, включают получение более полного представления об ущербе для здоровья и окружающей среды, а также о связанных с этим внешних расходах, увеличение потенциала для проведения анализа в целях

регулирования, выбор вариантов управления спросом, применение установок, работающих на нескольких видах топлива, и комбинированных теплоэнергетических систем.

Ключом к разработке стратегий устойчивого энергоснабжения служит сравнительная оценка путей прохождения энергии по всей цепи от источника до потребителя различных энергоисточников и конверсионных технологий. Проект DECADES обеспечивает необходимую методологию и инструменты для проведения таких оценок, и постоянно осуществляется распространение опыта этой работы и ее результатов среди государств — членов МАГАТЭ. Межрегиональные рабочие семинары по использованию компьютерных инструментальных средств проекта DECADES прошли в Аргоннской национальной лаборатории США (1995 и 1996 гг.), в Польше (1996 г.) и Бразилии (1997 г.). Семинары и практикумы состоялись также в Канаде, США, Соединенном Королевстве, Бразилии и Республике Корея. Большой интерес, проявленный институтами, организациями и университетами в государствах-членах, принявших участие в этих мероприятиях, убедительно свидетельствует о полезности подхода, избранного проектом DECADES.

Исследования методом сравнительной оценки на базе DECADES показывают, что ядерная энергетика с экономической точки зрения может конкурировать с другими базовыми вариантами производства энергии и что она производит значительно более низкие выбросы  $SO_2$ ,  $NO_x$  и  $CO_2$  по сравнению с любыми источниками, использующими ископаемое топливо. В странах с соответствующей развитой инфраструктурой предпочтительным вариантом источника электроэнергии является природный газ, даже если он импортируется. Угольные электростанции могут быть привлекательными для стран с обеспеченным доступом к недорогим источникам

снабжения. Однако их конкурентоспособность может оказаться сомнительной в контексте более строгих правил экологической защиты и нормативных требований по установке приборов контроля за загрязнением и ограничений по выбросу парниковых газов. Большинство возобновляемых источников энергии сулят заманчивые перспективы в плане создания экологически благоприятных систем производства электроэнергии. Но их потенциальная роль для крупномасштабного электроснабжения, за исключением традиционных гидростанций, может быть ограничена физическими условиями в некоторых регионах. Кроме того, в кратко- и среднесрочной перспективе маловероятна их экономическая конкурентоспособность в качестве основы производства электричества в сравнении с ископаемым топливом и с ядерной энергетикой.

Чтобы больше заинтересованных стран получали помощь в проведении собственных исследований, Агентство намерено предпринимать усилия по расширению своих возможностей для объективного анализа в области сравнительной оценки энергоисточников. Предусматривается более тесное сотрудничество с рядом организаций в энергетическом секторе, в том числе с Агентством по ядерной энергии, Европейской комиссией, Всемирным банком, Организацией стран — экспортеров нефти, Международным энергетическим агентством. МАГАТЭ будет также продолжать работу в рамках системы ООН по объективному изучению всех вариантов производства энергии.

На основе результатов своих анализов сравнительных оценок МАГАТЭ планирует активно участвовать в подготовке Третьего оценочного доклада МГИК. В течение последующих двух-трех лет доклад явится важной научной базой для обсуждения программных подходов к проблемам изменения климата и ослабления воздействия эмиссии парниковых газов. □