

# Энергетика в XXI веке

**А.А. Макаров**

директор Института энергетических исследований РАН

Сегодня антропогенная энергетика в 15 раз превышает совокупную энергию живущих на Земле людей и в 100 раз — их мощность. Она уже заметна в биосфере планеты и достигает 5% энергии процессов синтеза, обеспечивающих жизнь на Земле, но пока неразличима на космическом уровне, составляя менее 0,0002 поступающей на Землю энергии Солнца.

Данная статья — не на злобу дня, не о проблемах экономического кризиса, она посвящена возможностям и стратегическим приоритетам инновационного развития антропогенной энергетики в ближайшее двадцатилетие (с перспективой до 2050 г.).



## Базовые условия и предпосылки НТП в энергетике

Научно-технический прогресс в энергетике имеет ярко выраженные глобальные тренды. Сначала рассмотрим их на основе последнего технологического прогноза Международного энергетического агентства (МЭА) — центра прогнозирования и развития мировой энергетики и обеспечения энергетической безопасности 29 развитых стран. Затем обсудим особенности России, задачи их учета и способы отображения в энергетической политике страны.

НТП в энергетике ассимилирует результаты всех наук, которые и создают базовые условия и предпосылки для инновационного развития энергетической основы человечества. На рис. 1 условно представлено многообразие областей человеческих знаний. Результаты части наук влияют на требование общества к развитию энергетики, другие определяют доступные ресурсы, третьи создают предпосылки для энергетических инноваций, а четвертые обеспечивают управляемость создаваемых энергетических технологий и энергосистем.

Требования роста благосостояния общества определяют динамику энергетики. В базовом сценарии МЭА спрос на энергию увеличивается с 2005 по 2030 г. в полтора раза и почти вдвое — до 2050 г., хотя, конечно же, мировой финансово-экономический кризис понизит эти прогнозы.

В первой четверти XX века среднее по миру потребление энергии на душу населения увеличилось в 2,5 раза. Однако после нефтяного кризиса конца 1970-х годов наблюдалась обнадеживающая тенденция стабилизации душевого энергопотребления, но теперь эта тенденция сменилась ростом буквально в последние годы, и восходящая тенденция в прогнозах МЭА продолжается.

Сохранение душевого потребления на нынешнем уровне уменьшило бы прирост спроса на энергию втрое, что, наверное, утопично. Однако достаточно реалистично (с учетом необходимого повышения энергообеспеченности населения развивающихся стран) вдвое замедлить рост душевого потребления.

Общественные науки призваны предложить экономические и социальные меры, которые позволили бы уйти от потребительской парадигмы развития общества, но сохранили бы напряженность и продуктивность деятельности людей, стимулируемой сегодня, конечно же, этой потребительской «морковкой». Замедлить рост энергопотребления примерно в полтора раза невозможно также без нового вклада научно-технического прогресса в энергетике.

Динамику и структуру энергетики определяют требования экологической безопасности человечества на планете. Говоря об энергетике, мы имеем

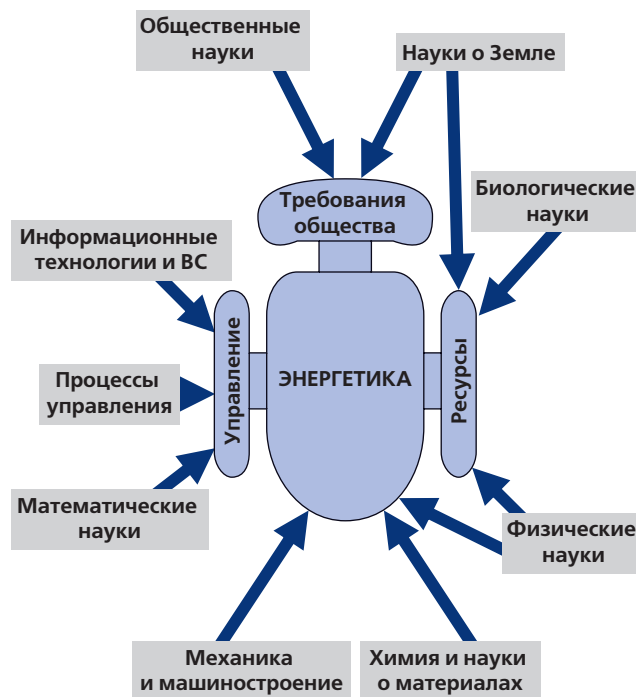


Рис. 1. Схема ассимиляции результатов всех наук научно-техническим прогрессом в энергетике

в виду прежде всего угрозу глобального потепления вследствие парникового эффекта. Согласно последнему прогнозу МЭА, размеры эмиссии парниковых газов по их базовому сценарию достигнут объема 62 гигатонн  $\text{CO}_2$ , с ожидаемым повышением температуры на Земле на 6 градусов против сегодняшнего уровня.

По этому сценарию, так сказать, по сложившемуся тренду, развитие мировой энергетики потребует 65 трлн долл. в период до 2050 г. Для уменьшения эмиссии более чем вдвое с возвращением к 2050 г. на

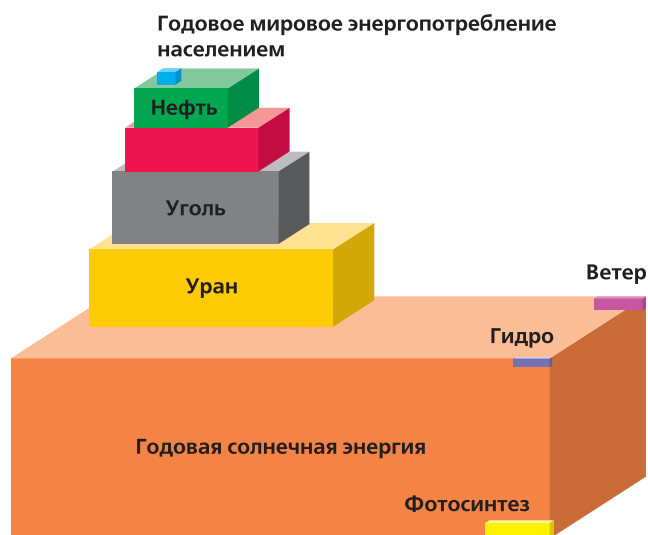


Рис. 2. Суммарные энергетические ресурсы

уровень эмиссии 2005 г. потребуется дополнительно 17 трлн долл., и это позволит сократить объемы эмиссии примерно до 28 гигатонн  $\text{CO}_2$ . Дальнейшее сокращение этого показателя вдвое, до 14 гигатонн (что обеспечит, по сегодняшним представлениям, стабилизацию климата планеты), потребует втрое больше инвестиций — дополнительно почти 50 трлн долл. в период до 2050 г.

Очень важно, чтобы науки о Земле, изучающие климат, установили реальную угрозу климату от эмиссии парниковых газов и при необходимости выработали эффективные меры противодействия, включая научные основы и методы геоинженерии. В противном случае сохранение климата путем снижения эмиссии парниковых газов именно этим, сегодня признанным способом, по расчетам того же МЭА, почти удвоит капиталовложения в энергетику — с 65 трлн до разорительных 115 трлн долл.

Человечество не ограничено ресурсами энергии на века, и Россия — тем более. Из рис. 2 видно, что доля годового расхода энергии человеком (верхний параллелепипед, едва видимый) составляет 0,0005 от ресурса органического топлива — нефти, газа и угля и 0,0003 от ресурсов урана. Однако все эти исчерпаемые энергоресурсы не составляют и пятой части годового потока солнечной энергии на Землю, того самого потока, который порождает энергию ветра, гидроэнергию и фотосинтез, т. е. те самые возобновляемые энергоресурсы, на которые сейчас возлагаются большие надежды.

Раньше или позже НТП в энергетике сделает эти ресурсы доступными. А пока реальная проблема состоит в исчерпании экономически приемлемых ресурсов нефти и газа. За 150 лет статистических наблюдений из земных недр извлечено 33% экономически доступной части разведанных запасов нефти, 14% газа, 9% урана и 4% угля. От науки о Земле в части геологии нужны новые методы разведки и освоения месторождения углеводородов на суше и шельфе, включая подледную добычу, которые позволили бы за 20 лет увеличить экономически приемлемые запасы в 1,7 раза к 2030 г. и втрое к 2050 г. Без этого рост добычи нефти остановится и начнет падать через 10–15 лет, а добыча газа — через 20–25 лет, что, конечно же, резко повысит требования к НТП в энергетике и, видимо, замедлит развитие мировой экономики.

Особую проблему на данном этапе составляет создание методов промышленного освоения газогидратов, ресурсы которых на порядок больше ресурсов природного газа.

Биологические науки могут в предстоящий период также способствовать ресурсообеспечению энергетики, разрабатывая способы получения дешевой биомассы.

## Приоритеты и ожидаемые прорывные направления НТП

По целям, масштабу и методологии исследования МЭА близки к энергетическому разделу разработанной в 1980-е годы под руководством сначала академика В.А. Котельникова, а затем академика А.И. Анчишкина Комплексной программы научно-технического прогресса СССР. Эти работы, конечно же, нужно было бы возобновить на новом уровне знаний и методологии.

Приоритетными МЭА назвало 8 классов ключевых технологий производства энергии. Таких технологий всего 140. Не буду перечислять их, поскольку большинству читателей названия ничего не скажут, а специалисты их хорошо знают. Для каждого класса технологий подготовлены достаточно подробные планы их включения в инновационную энергетику с указанием объемов, сроков и затрат на научные исследования и разработки. Остановлюсь на оценках затрат только на исследования и разработки, необходимые для реализации двух рассматриваемых МЭА сценариев.

Первый сценарий — возвращение эмиссии парниковых газов к уровню 2005 г. — потребует около 5 трлн долл. на НИОКР. Сокращение же этой эмиссии еще вдвое (второй рассматриваемый сценарий) для стабилизации климата планеты утроит эти затраты. Причем рост приходится практически целиком на все виды транспорта. Таким образом, парниковая угроза сулит мировому научному сообществу затраты в 15 трлн долл. за рассматриваемый период, что вчетверо больше расходов на исследования и разработки в военных целях при условии сохранения их нынешнего уровня. Неудивительно, что такие «приманки» встречают горячий отклик среди ученых и специалистов, работающих в этой области.

В прогнозе сделан вывод, что технологии, уже введенные до стадии опытно-промышленной проверки, способны решить стоящие перед энергетикой мира задачи как минимум до 2030 г. Казалось бы, проблема инновационного развития энергетики на данном этапе решена. Но понятно, что данный технологический пакет целиком ориентирован на конъюнктуру западных энергетических рынков, причем две трети этих технологий направлены на агрессивное снижение эмиссий парниковых газов. Приходится констатировать, что приоритеты и главные технико-экономические характеристики этих технологий в значительной мере не рациональны для энергетики России.

Энергетика представляет собой ярко выраженную междисциплинарную науку. Она формирует новые знания о методах преобразования энергии, создает новые средства для таких преобразований, интегрирует достижения практически всех других областей

знаний, исследует закономерности развития антропогенной энергетики в целом. Объектом и результатом энергетических исследований является прежде всего нарастающий поток возможных энергетических технологий. Они создаются на базе фундаментальных заделов физики, химии, а теперь и биологии такими физико-техническими дисциплинами, как электрофизика и электротехника, теплофизика и теплотехника, гидравлика и гидротехника и т. д. В этом существе научных исследований и основа НТП в энергетике. По грубым оценкам, на них приходится до 70% энергетических исследований.

Приведу отнюдь не полный перечень многообещающих технологических возможностей.

Из области физики это фотоэлементы третьего поколения с КПД до 40–60%, которые обеспечат широкое использование солнечной энергии; суперконденсаторы высокой емкости и освоение сверхпроводимости обещают революцию в накоплении и передаче электроэнергии, что даст возможность произвести массовую электрификацию транспорта и замену нефте топлива.

Быстрые реакторы с замкнутым циклом сделают атомную энергетику воспроизводящей ядерное топливо при высоких темпах развития. Опытно-промышленное освоение термоядерной энергии, особенно с прямым преобразованием радиационной энергии в электричество, откроет перспективу снятия проблемы ограниченности энергоресурсов.

На достижениях химии и наук о материалах разрабатывается технология получения жидкого топлива из газа, угля, сланца и особенно биомассы, а также методы и средства прямого преобразования химической энергии в электрическую. Использование электричества, как известно, началось с гальванических элементов. Сейчас мощность химических аккумуляторов превышает мощность всех электростанций Земли, а впереди развитие топливных элементов для транспорта и распределенной энергетики.

Понятно, что материализовать физические явления и химические процессы невозможно без материаловедения и машиностроения. Достижения биологии и химии дают научную основу для конверсии биомассы разных видов в высококачественное жидкое и газовое топливо с помощью ферментации для создания новых видов целлюлозосодержащих культур повышенной продукции, не конкурирующих с пищевыми продуктами, и других технологий биоэнергетики.

Выбор эффективных технологий ведется по критериям экономической эффективности, экологической приемлемости, с учетом всех аспектов надежности и управляемости технологий. Здесь реализуется связь энергетики с общественными науками, с науками о Земле, достижениями математики и ин-

формационных технологий с процессами управления.

Казалось бы, это и определяет приоритеты научно-технического прогресса в энергетике. Но, во-первых, названные критерии отбора эффективных технологий весьма неоднозначны и очень противоречивы: понятно, чем надежней и экологичней технологии, тем они дороже. Во-вторых, энергетические технологии обычно работают не изолированно, а в комплексах и системах, где сумма локальных оптимумов, по определению, не соответствует глобальному. Поэтому третье важное направление энергетической науки — это исследование и конструирование энергетических систем, на что приходится еще 10–15% ее усилий.

Системные исследования в энергетике на базе математического моделирования и ЭВМ широко развернулись с 60-х годов прошлого столетия, и советская школа основателя нашего института академика Л.А. Мелентьева (в конце минувшего года мы отметили 100 лет со дня его рождения) занимала лидирующие позиции в мире. Но неопределенность будущего так велика, а научно-технический прогресс настолько спонтанен, что и эта методология не обеспечивает достаточно надежного предвидения хода этого процесса.

Поэтому для определения эффективных направлений и приоритетов научно-технического прогресса приходится привлекать исследования тенденций пространственного и производственного развития энергетики — квинтэссенцию накопленных знаний в области энергетической науки и практики. На это направлено до 5% исследований.

Пространственное развитие энергетики следует тенденции создания межстрановых трансконтинентальных и глобальных систем. Они имеют мощную физико-техническую основу в виде трубопроводных и электрических сетей, и одновременно выступают как все более сложные производственные системы, а теперь и как энергетические рынки.

Сформированную в 1980–1990-е годы глобальную нефтяную систему в ближайшие 10–15 лет дополнит и интегрируется с ней глобальная система газоснабжения. Мы детально исследовали возможную конфигурацию ее ядра — евразийскую газоснабжающую систему в период до 2030 г.

Позднее, вероятно, после 2030 г., для широкого использования космической и термоядерной энергетики потребуются глобальная интеграция региональных электроэнергетических систем. Укрупненная система условной ЕЭС мира обсуждалась Международным советом по большим электрическим системам.

Эффективная технологическая и производственная структура энергетики гармонизирует все стадии

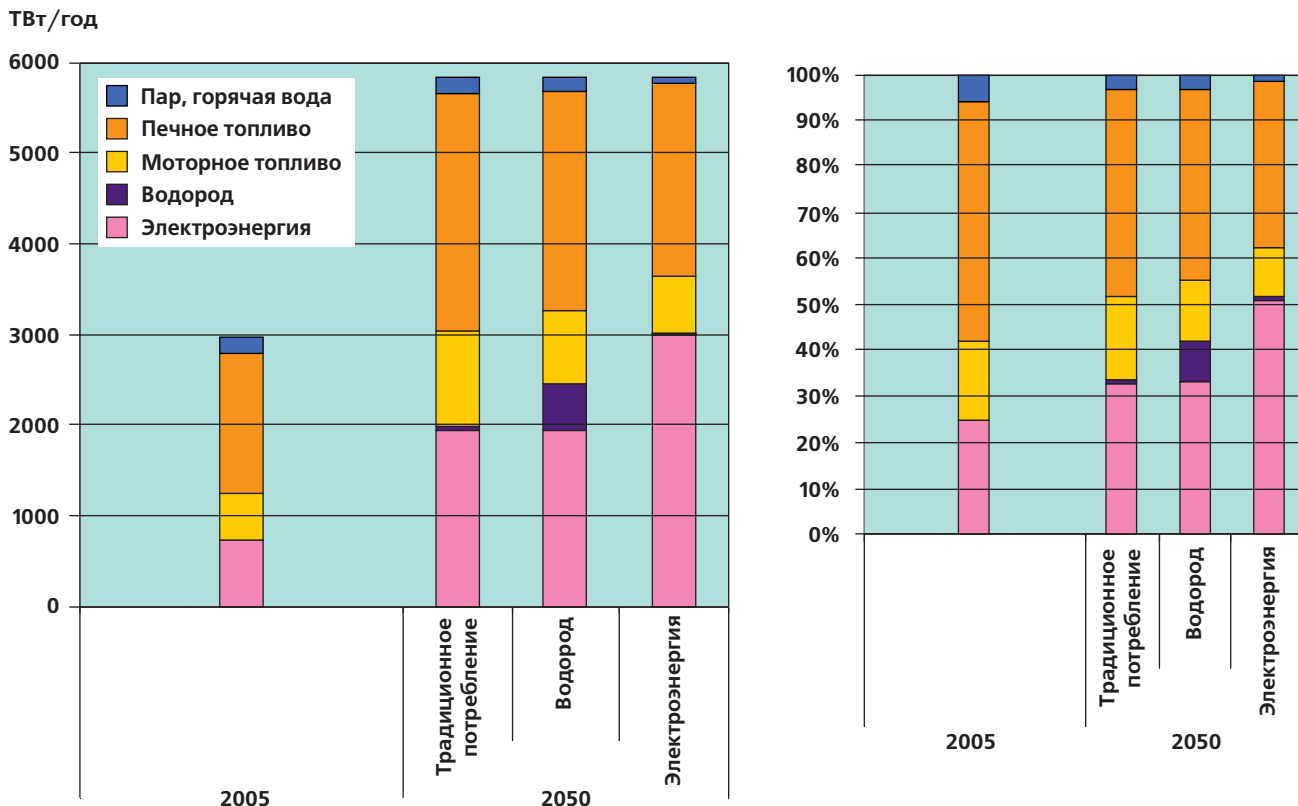


Рис. 3. Сценарии эволюции конечного энергопотребления (ТВт/год)

и технологии преобразования энергии от ее источников в природной среде (нефть, газ, уголь, гидроэнергия и т. д.) через все стадии преобразования энергии до конечного использования у потребителей.

С середины XX века в большинстве индустриальных стран и по миру в целом конечная энергия составляет только 37–39% от первичной. Это даже меньше, чем коэффициент использования энергии первобытного костра в пещере. Этот парадокс — результат действия разнонаправленных тенденций, главный из которых — быстрый рост разнообразия конечного потребления и перестройка структуры в пользу энергии все более высокой ценности. Ценность энергии можно измерить как произведение плотности потока энергии на управляемость, т. е. величину, обратную среднеквадратичному отклонению фактического режима энергетического процесса от целевого. За XX век ценность энергии увеличилась на 15 порядков, с  $10^5$ – $10^7$  Вт на  $1 \text{ м}^2$  в его начале (это упряжка лошадей, водяное колесо, сталеплавильная печь) до  $10^{20}$ – $10^{24}$  Вт на  $1 \text{ м}^2$  в конце века (ядерная бомба, лазер, транзистор в интегральной схеме).

Между тем чем выше ценность энергии, тем ниже КПД ее получения. Знание этих тенденций позволяет ставить целью достижение к середине века не

менее 50% для основного индикатора НТП в энергетике — общего коэффициента использования энергии и соответственно строить технологическую политику и средства достижения этой цели. Но для этого нужно видеть возможные направления изменения структуры конечного потребления.

На рис. 3 показано, что при прогнозируемом МЭА удвоении мировой энергетики с 2005 по 2050 г. доля электроэнергии в обеспечении конечной энергии увеличится до 33% с 25% в настоящее время (при уменьшении доли прямого сжигания топлива, это моторное топливо и технологическое топливо, которые составляют сегодня 69%, до 63% и пара горячей воды с 6 до 4%).

От этой традиционной траектории по «водородной» инициативе Буша США, Евросоюз, Япония намечают перейти к сценарию водородной энергетики (рис. 3, второй столбик на диаграмме справа). Допустим, что водород обеспечит 10% конечного потребления энергии. Это потребует создания инфраструктуры по производству, транспортировке, хранению и распределению, вплоть до автозаправки, до 3 трлн  $\text{м}^3$  этого сверхлетучего и взрывоопасного газа. (Для сравнения: сегодня в мире добывается почти в 1,5 раза меньше природного газа.) Это не изменит долю электроэнергии в конечном энергопотреблении, а сократит лишь долю топлива, в основном

жидкого, до 54% и долю тепла до 3%. Но даже при широком замещении нынешнего электролиза воды термохимическими технологиями получения водорода его использование потребует по всей цепочке большого расхода энергии. Между тем нефтетоливо он будет замещать на топливных элементах с получением обратно же электроэнергии. Автомобиль на водороде — это, по сути, электромобиль. В итоге мы получаем как бы особый накопитель электроэнергии, но с КПД цикла менее 20%.

Альтернативой водороду служит концепция электрического мира, также широко разрабатываемая в разных странах, когда более половины конечного потребления энергии будет обеспечивать электроэнергия. На качественно новых аккумуляторах она будет замещать прямое сжигание топлива, снизит его до 47%, прежде всего на транспорте и в распределенной энергетике, а при освоении сверхпроводимости принципиально облегчит к тому же использование возобновляемой энергии, особенно солнечной и приливной. Это — одна из важнейших развилок инноваций в энергетике. От того, кто выиграет эту гонку идей и технологий эффективного аккумулирования электроэнергии, сильно зависит востребованность других направлений НТП и вообще конфигурация энергетики будущего. В прогнозах МЭА ясность по этой проблеме пока отсутствует.

### Особенности и перспективы энергетики России

Перейдем теперь к энергетике России, которая имеет свои важные особенности. Прежде всего это высокая обеспеченность сравнительно дешевыми энергоресурсами. Мы располагаем 15% мировых запасов при менее 3% численности населения. Это важная особенность всех энергоэкспортирующих стран, не только России.

А теперь о наших специфических особенностях. Россия, как известно, самая холодная и протяженная (11 часовых поясов) страна с очень низкой плотностью населения и энергетической инфраструктурой, в 7 раз меньшей, чем в Соединенных Штатах. При этом энергетическая эффективность российской экономики в 5 раз хуже среднемировой, а нагрузка энергетики на экономику у нас в 4 раза выше. Капиталовложения в нашу энергетику составляют 6% от ВВП при менее полутора процентов по миру в целом. Наконец, Россия по меньшей мере нейтральна к потеплению климата, а возможно, и выигрывает от этого.

Влияние этих особенностей на приоритеты НТП иллюстрирует рис. 4 на примере энергоснабжения условного поселка из 100 домов, или фермы, или рыбозавода и т. п. в Германии (на диаграмме это первые столбики в каждом блоке), на юге России (вто-

рые столбики) и в центре России (третьи столбики). Показаны варианты получения энергии от энергосистемы (первый блок), использования биомассы (второй блок), ветра и солнца (соответственно третий и четвертый).

В Германии затраты на биоэнергетику и ветровую энергетику меньше затрат на энергию от системы, в которые включается плата за выбросы парниковых газов. На юге России энергоклиматические характеристики практически идентичны германским, и все возобновляемые энергоресурсы стоят практически столько же, а солнечная энергия даже несколько меньше. Но энергия от системы из-за дешевого топлива у нас, даже с учетом больших затрат на доставку ее потребителям, гораздо больших, чем в Германии (у нас распределенная, рассыпанная система), оказывается в полтора раза дешевле, чем в Германии. Понятно, что это откладывает применение коммерчески эффективной энергии, да и эффективной по народнохозяйственным показателям, применение новых источников энергии, пока цены на топливо в России не достигнут современных европейских, а до этого еще далеко.

В Центральной же России сдвигка во времени будет еще больше, из-за худших климатических условий возобновляемые ресурсы здесь на 20–40% дороже, чем на юге.

Названные особенности энергетики меняют приоритеты НТП. Для России это прежде всего энергосбережение, и технологический пакет МЭА в этой

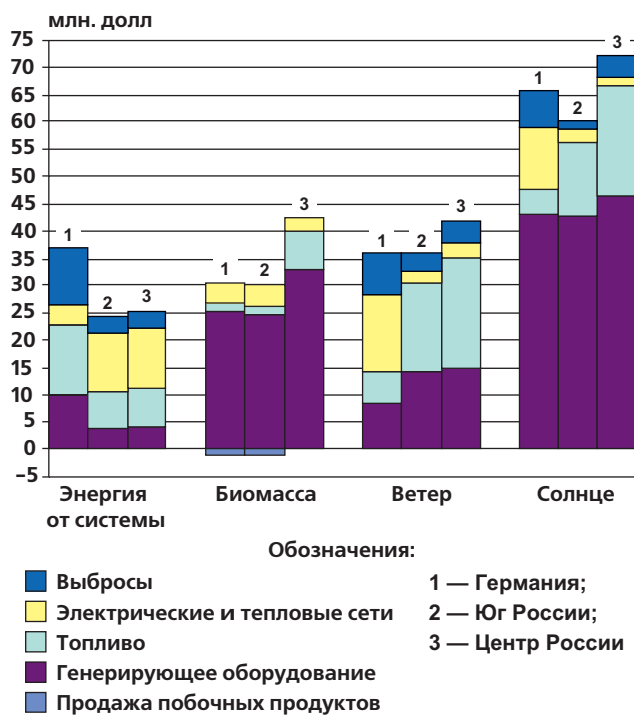


Рис. 4. Особенности энергетики России в сравнении с энергетикой Германии

части для нас вполне интересен. Далее, при относительно дешевом топливе нам нужны менее капиталоемкие технологии, даже с несколько худшими КПД. Особенно важны для нас технологии дальнего транспорта энергии и распределенная децентрализованная энергетика. Кроме того, в своей технологической политике России целесообразно проявлять умеренность в мерах по сдерживанию эмиссии парниковых газов.

До сих пор речь шла о направлениях научно-технического прогресса в энергетике. Но еще важнее масштабы его применения, которые определяются прогнозом развития энергетике. В этом отношении в последние полтора года у нас накоплен хороший задел в виде разработки энергетической стратегии России до 2030 г. В ней рассматривается рост потребления энергии в зависимости от сценария на 35–70% (вилка очень большая); рост производства энергии на 30–40% при существенном замещении нефти и газа, атомной энергии возобновляемыми ресурсами, энергоресурсами и углем; экспорт энергии с ростом 18–20% до 2015–2020 гг. и последующей стабилизацией или даже снижением.

Перед нашей энергетической наукой, таким образом, стоит задача определить с учетом мировых тенденций свои приоритеты НТП и создать технологии с параметрами, отвечающими российским условиям. Соответствующие работы уже ведутся. Под руководством академика В.Е. Фортова и члена-корреспондента В.М. Батенина разработана первая версия Дорожной карты научно-технического прогресса для энергетических стратегий России до 2030 г. Под руководством академика Э.П. Волкова

разработана концепция НТП в электроэнергетике до 2030 г. Она одобрена в последний месяц своего существования РАО ЕС России и, главное, хорошо принята ее преемницей — Федеральной электросетевой компанией.

Академик Н.Н. Пономарев-Степной и член-корреспондент Л.А. Большов подготовили альтернативные концепции Стратегии развития атомной энергетике до 2050 г. Академик А.Е. Шейндлин инициировал программу Президиума РАН «Фундаментальные основы развития энергетических систем и технологий» и стал ее координатором. Академик О.Н. Фаворский подготовил доклад, обобщающий исследования по инновационному развитию энергетике России до 2030 г., который вошел составной частью в соответствующий доклад Российской академии наук. Но главное, по нашему представлению, еще предстоит сделать.

Научные исследования по инновационной энергетике, естественно, войдут в Генеральную программу фундаментальных исследований РАН на 2008–2012 гг. Каналом для их реализации может стать главный документ энергетической политики страны — «Энергетическая стратегия России до 2030 г.», которая находится в процессе разработки. Согласно приказу Минэнерго РФ, в состав почти ста специалистов межведомственной рабочей группы для формирования стратегии входят названные здесь члены Российской академии наук. Важно определить и закрепить документами Энергетической стратегии состав, параметры, сроки и размеры применения приоритетных энергетических технологий и необходимое их финансирование.

## Диалог «ЕС — Россия» в сфере энергетике

Одной из ключевых сфер отношений ЕС и России является Энергетический диалог между ЕС и Россией (учрежден по решению VI саммита «ЕС — Россия», октябрь 2000 г., Париж). Этот энергетический диалог имеет несколько уровней, на которых ведется работа.

Прежде всего — Постоянный совет партнерства (ПСП), в состав которого входят министр энергетике РФ Сергей Шматко, член Европейской Комиссии Андрис Пиебалгс, а также министры энергетике двух европейских стран — нынешнего и будущего председателя ЕС. На политическом уровне диалог поддерживается через регулярные контакты координаторов Энергетического диалога — А. Пиебалгса и С. Шматко, а также и соответствующих чиновников Европейской Комиссии и Министерства энергетике

РФ. Для эффективного решения текущих вопросов диалога сформированы тематические группы.

На заседании ПСП в декабре 2008 г. было принято решение реструктурировать совместные тематические группы Энергетического диалога и сформировать три направления, по которым будет вестись работа: энергетические стратегии, прогнозы и сценарии; развитие рынков; эффективное использование энергии.

Вопросы энергетике часто также рассматриваются на заседаниях «круглого стола» промышленников ЕС и России, которые, как правило, сопряжены по времени с другими мероприятиями, проводимыми в рамках Энергетического диалога.

Очередная встреча в формате ПСП состоялась 30 апреля с. г.

## Автор



**Макаров Алексей Александрович** – директор института энергетических исследований (ИНЭИ РАН), академик РАН, д.э.н., профессор. Эксперт в области экономики, системных исследований и прогнозирования развития энергетики. Автор более 390 научных публикаций, в т.ч. 22 монографий. Награжден Орденом Трудового Красного Знамени, орденом Почета.