

УДК 001.18+620.9

Е. П. Велихов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Энергетика в экономике мира XXI века

На основе анализа глобальных трендов в мировой экономике приводится прогноз развития энергетических технологий на столетие вперёд. Показано, что традиционные отрасли энергетики не смогут удовлетворять потребности экономики, и единственной реальной альтернативой на ближайшие десятилетия является ядерная энергетика, доля которой будет неуклонно расти. Уже в ближайшее время предстоит заложить новые ядерно-энергетические программы, а в среднесрочной перспективе — провести масштабное перевооружение отрасли, в частности, её перевод на замкнутый топливный цикл.

Ключевые слова: энергетика, мировая экономика, ядерные технологии, прогноз развития.

Человечество использует три потока ресурсов для поддержания и развития своей жизнедеятельности: материалы, энергию и информацию. Развитие цивилизации ведёт к постоянному увеличению всех трёх потоков, и это сопровождается различными проблемами, связанными как с исчерпанием ресурсов, так и с взаимодействием этих потоков между собой и природной средой.

Информационные потоки используются для контроля, управления и прогнозного моделирования двух других. По своей сути они не ограничены, а накопление и адекватное использование информации помогают своевременно компенсировать сложности, возникающие в области потоков материалов и энергии.

Материальное производство является главным потребителем энергии интеллектуальной деятельности человека в виде разрабатываемых технологий, создания машин, товаров и оказываемых услуг. В перспективе оно обязательно потребует в силу принципиальной ограниченности ресурсной базы замыкания через использование нанотехнологий для создания материалов с заданными свойствами, машин, процессов, продуктов и плазменных технологий для возвращения материального потока в начальное состояние (атомарное или молекулярное). Сегодня отходы человеческой деятельности накапливаются с такой скоростью, что природа не справляется с ними приемлемым для нас образом. Накопленные природой ресурсы становятся все более труднодоступными, а естественные природные процессы развиваются в опасных и непредсказуемых направлениях.

Энергетический цикл обеспечивает жизнедеятельность человека и необходимые для неё материальные потоки. Источником неиссякаемого потока энергии на Земле в человеческих масштабах времени является солнечная энергия, используемая в виде непосредственного потока излучения Солнца (включая фотосинтез) или накопленных ранее и тем самым не возобновляемых ресурсов — прежде всего запасов углеводородного топлива. Эффективное использование исчерпаемых ресурсов, служащих основой современной экономики, требует все большего количества дешёвой и качественной энергии, единственным приемлемым по масштабу и экологическим требованиям источником которой является ядерная энергетика.

Основа эффективности и безопасности энерготехнологии заключается в её способности сохранять достигнутый уровень обеспечения жизненно важных потребностей, а также в обеспечении возможности прогрессивного развития с учётом экологических ограничений. И если ранее развитие технологий было связано с увеличением её масштабов на основе научных и геологических достижений, то теперь проявились проблемы, без решения которых масштабное использование энерготехнологий становится проблематичным, устойчивое развитие — невозможным. Необходимым условием устойчивого развития сейчас является

рост возможности адекватного реагирования (компенсирующие действия, коррекция постановки задачи, изменение направлений развития) на постоянно происходящие изменения в социальной, политической и природной сферах.

Мы живём в особый период истории, когда человечество уже истратило значительную долю качественных природных запасов и в ближайшем будущем истратит их полностью. Это позволило человечеству в тот же период достигнуть колоссальной численности и господствующего положения на Земле. В то же время оно создало и монументальные проблемы слишком быстрого исчерпания ресурсов планеты, включая экологические.

Современный уровень востребованности энергетических ресурсов главным образом сосредоточен на потреблении запасённого за миллионы лет органического топлива, продуктов фотосинтеза, возобновляемых ресурсов (гидро-, ветер, геотермальные источники). В скромных масштабах включён в этот цикл процесс деления ядер, только начато освоение термоядерного синтеза, но именно эти два процесса способны обеспечить практически любой масштаб и экологическую приемлемость производства энергии требуемого для человека качества.

Россия обладает значительной частью запасов углеводородного топлива, и в обозримом будущем оно, как и сейчас, будет составлять основу нашего экспорта, поэтому нам, в условиях естественных ограничений масштабов добычи и транспорта энергоресурсов, необходимо для сохранения эффективности нашей экономики сократить потребление природного газа в электроэнергетике за счёт использования ядерной энергии.

В более отдалённом будущем, опираясь на международное сотрудничество в сооружении и эксплуатации Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР), мы сможем перейти к широкому промышленному использованию управляемого термоядерного синтеза как для генерации электроэнергии и наработки ядерного горючего, так и для производства пресной воды и получения моторного топлива (например, водорода).

Развитие энергетики и экспорт сырья должны быть тесно увязаны с энергомашиностроением. Речь идёт о совершенно новом машиностроении: заводском, конвейерном производстве мегасистем — блочных атомных электростанций, нефтяных и газовых платформ для добычи углеводородов на шельфе, блочных заводов по сжижению природного газа, надводных и подводных супертанкеров для нефти и сжиженного газа, систем подводной добычи и транспортировки, плазменных заводов по переработке промышленных и бытовых отходов и получению искусственного моторного топлива.

Конкурентоспособность машиностроения и надёжная и безопасная эксплуатация должны опираться на развитую информационную инфраструктуру сквозного компьютерного проектирования, контроля качества и управления производством и поставками с использованием современного оборудования и программного обеспечения, учитывающего экспоненциально ускоряющийся процесс развития информационных технологий и усложнение решаемых задач, связанных с увеличением масштабов систем, их нелинейностью и открытостью.

Фундаментом решения проблем ресурсообеспеченности двух высших этажей потоков ресурсов станет всеобъемлющее предсказательное моделирование всех процессов экономики. На информационном уровне формируется система управления и контроля процессами двух первых и их развития. Генерируются новые знания, помогающие противостоять различным вызовам и угрозам и обеспечить устойчивое развитие цивилизации.

В этой области по мере накопления знаний и создания систем информационного обеспечения все большую роль приобретает отражение реальности в виде математических моделей процессов, технологий, конструкций. В интегрированном виде параллельно с реальностью формируется её виртуальная модель, которая позволяет заранее предвидеть вызовы и угрозы на выбранном пути развития, предусмотреть компенсирующие управляющие действия, проанализировать комплекс мер преодоления нежелательных последствий.

Область предсказательного системного моделирования приобретает возрастающую значимость, так как по мере вовлечения в оборот все больших объёмов ресурсов и энергии

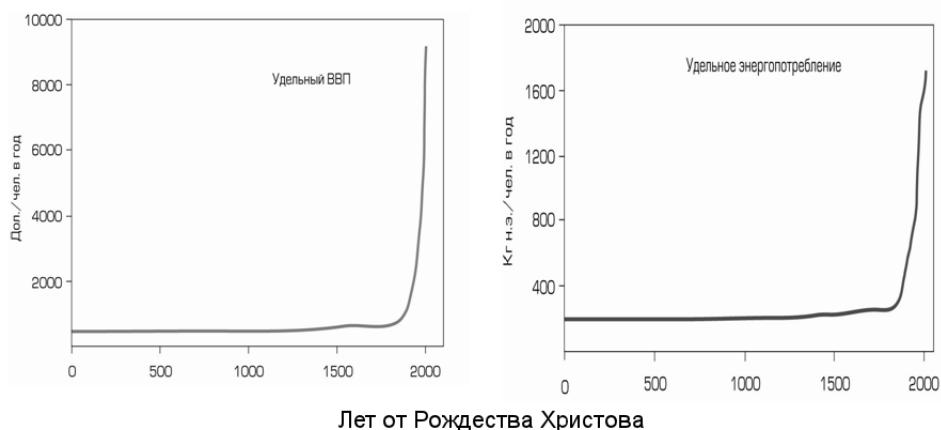


Рис. 1. Удельный ВВП и удельное энергопотребление в историческом рассмотрении

нарастает как сложность, так и инерционность всей инфраструктуры. Большие масштабы не позволяют обеспечить достаточно быстрое развитие новых и сворачивание старых технологий. Они столь велики, что представляют угрозу с точки зрения запоздалого принятия решения, при котором генерация необратимых кризисных процессов будет неизбежна. И очень важно заблаговременно предвидеть возникающие проблемы и предпринять обоснованные корректирующие действия.

Для развития и успешного функционирования современной экономики, основанной на знаниях и инновациях, необходимо согласованное и сбалансированное функционирование всех трёх её базовых потоков. Одних финансовых инструментов управления этими потоками не достаточно. Движению финансов должны предшествовать моделирование, осознанное принятие решений в условиях, когда целью является устойчивое развитие общества с учётом все более жёстких ограничений. В настоящей статье предлагаются оценки фундаментальных связей энергетики и экономики, излагаются требования к энергетике, предъявляемые мировой экономикой, и влияние на экономику ресурсных и технологических возможностей энергетики XXI века.

Изучение проблем энергетики, её развития и эволюции показало, что ключевая информация, определяющая доминантную часть современного развития, сосредоточена в динамике валового продукта и потреблении энергии.

Наличие доступного и стабильного энергоснабжения всегда имело фундаментальное значение для развития общества. Рост мирового валового продукта аналогично ВВП конкретной страны чётко коррелирует с ростом энергопотребления. История развития цивилизации демонстрирует правоту этого утверждения (рис. 1).

Конечно, данные, относящиеся к далёкой истории, имеют оценочный характер, однако имеющаяся уже надёжная статистическая информация примерно за полвека показывает, что мировой валовой продукт хорошо коррелирован с количеством энергии, израсходованной людьми на его производство. На рис. 2 видно, что вне зависимости от способа исчисления ВВП чётко прослеживается простая линейная корреляция между произведённым продуктом и потреблённой энергией.

Именно эта практически линейная зависимость мирового валового продукта от потреблённой энергии указывает на то, что возможно построение достаточно простой математической модели эволюции экономики, по своему существу феноменологической, которая настраивается на реально наблюдаемые факты и, как правило, является неплохим приближением для изучения текущего состояния и ближайшей перспективы.

Анализ статистических данных по энергопотреблению в разных странах мира позволяет выявить ряд важных тенденций. Удельное потребление энергии в двух больших группах стран (развитые страны и остальной мир) характеризуется большой неравномерностью, но, что наиболее важно, в течение последнего полувека эта неравномерность монотонно сокра-

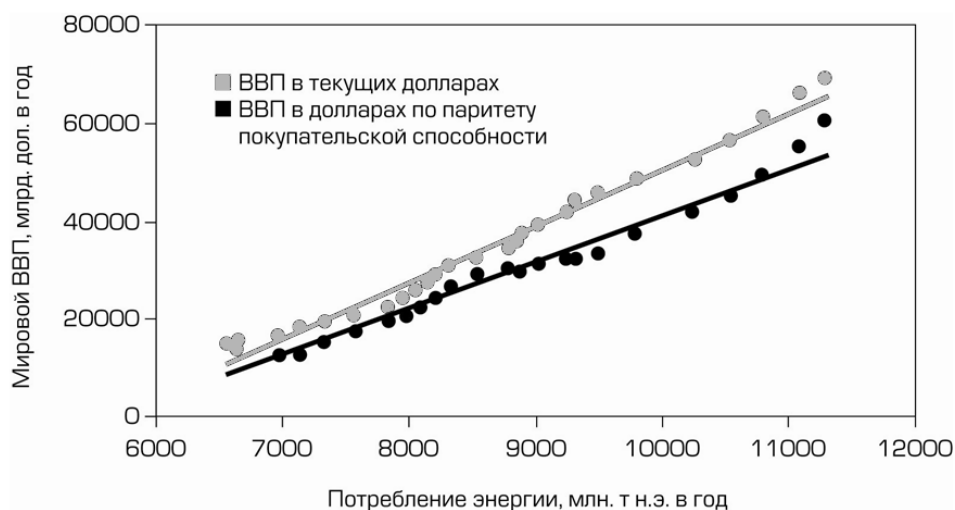


Рис. 2. Зависимость ВВП от энергопотребления

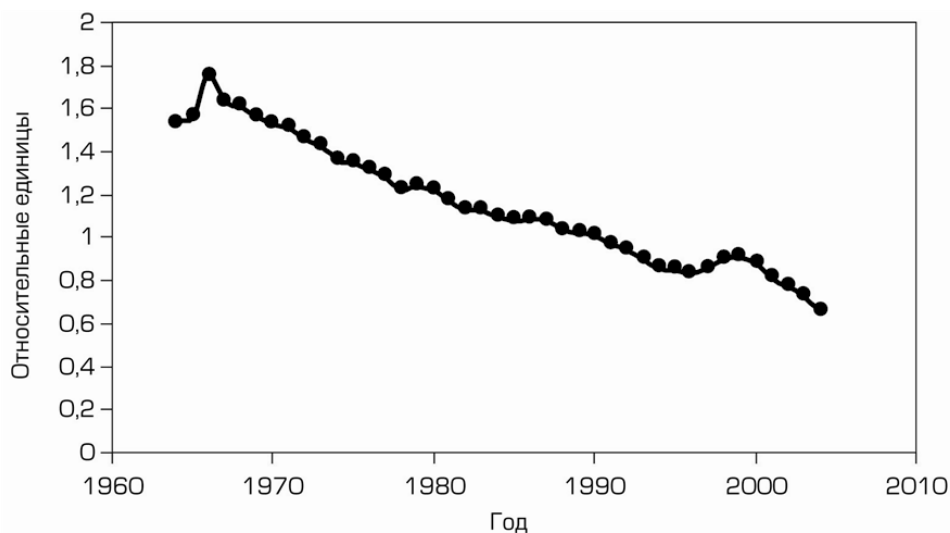


Рис. 3. Отношение удельного потребления первичной энергии в развитых и развивающихся странах

щается. Заметим, что группа развитых стран в данном случае определена широко и достаточно формально: это все страны, в которых потребление первичной энергии в расчёте на человека выше среднемирового (они включают, например, Россию, Беларусь, другие страны Центральной Европы и бывшего Союза, а также некоторые страны Среднего Востока). Остальной мир — это страны, в которых удельное потребление первичных энергоисточников меньше среднемирового (с понятным упрощением они названы развивающимися).

Если ещё в 60-х годах прошлого века различие в удельном потреблении энергии в развитых и развивающихся странах составляло более 20 раз, то в настоящее время оно сократилось примерно до 7 раз. Эта тенденция выравнивания удельного энергопотребления тщательно анализировалась, надёжно подтверждена статистическими данными и указывает на то, что индустриализация развивающегося мира происходит существенно более высокими темпами по сравнению с развитыми странами. Такое наблюдение, конечно, не обладает новизной, но данную тенденцию удалось представить в численном виде. На рис. 3 представлен график изменения отношения удельного энергопотребления в развитых и развивающихся странах.

Процесс товарного производства в современном мире характеризуется многостадийностью. Можно выделить две большие агрегированные группы товаров: товары сырьевой

группы и товары конечного потребления, которые производятся из товаров первой группы.

К первой группе относятся товары, для производства которых требуется большое количество энергии. Это металлы, химические удобрения, цемент, необработанная древесина и т. п. Цена этих товаров на мировом рынке относительно невысока.

Во вторую группу попадают товары, которые составляют продукцию конечного потребления: это продукция бытового назначения, машиностроение, электроника, автомобили и т. п., то есть вся продукция, которую люди с удовольствием потребляют. Производство этих товаров требует существенно меньших энергетических затрат, а цена их (на единицу затраченной энергии) значительно выше в сравнении с товарами сырьевой группы.

Статистическое рассмотрение ценового соотношения и энергозатрат показывает, что в современной экономике из одной тонны нефтяного эквивалента энергии, затраченной на производство товаров сырьевой группы, можно получить на мировом рынке примерно 1 тысячу долларов, а при тех же затратах энергии при производстве товаров конечного потребления — уже 14 тысяч долларов.

Именно эта особенность товарного производства была эффективно использована частью развитых стран для модернизации собственных экономик. Значительную долю собственных производств, которые были ориентированы на выпуск продукции сырьевого характера, эти страны перенесли за рубеж, покупая эту продукцию на мировом рынке в обмен на товары конечного потребления. Такая стратегия позволила не только существенно оздоровить экологическую ситуацию в развитых странах, но и создать экономику высокой энергоэффективности, сконцентрировав усилия на производстве высокотехнологичной продукции и достигнув на этом пути больших успехов. Но, поскольку для производства высокотехнологичной продукции все равно необходимо использовать товары сырьевой группы, оказалось, что экономика развитых стран стала в существенной степени зависеть от товарных потоков из развивающихся стран.

В мире реализовалось разделение труда, которое укрепило его взаимозависимость. Потребность во все возрастающем количестве сырьевых товаров потребовала от развитых стран проводить большие инвестиции для модернизации ряда промышленных отраслей в развивающемся мире, внедряя в производство передовые технологии. Да и сами развивающиеся страны, располагая огромным потенциалом дешёвой рабочей силы, стали постепенно осваивать и производство конечной продукции. Все это стало материальной основой развивающегося процесса глобализации.

Такую особенность товарного обмена между разными группами стран обязательно следует учитывать, чтобы проследить динамику ВВП выделенных групп стран. Следует учесть и обстоятельство, связанное с постепенным удорожанием ресурсов, то есть сырьевых товаров, по отношению к товарам конечного потребления. Это обстоятельство ещё в большей степени способствовало в предыдущие годы экономическому развитию развивающегося мира (рис. 4).

Отмеченные тенденции достаточно очевидны и их содержательный смысл прозрачен, а использование математической обработки позволяет получить для них численное выражение на основе исторических статистических данных. Этого достаточно, чтобы построить простую математическую модель развития экономики, которая опирается на прогнозирование энергетического развития (что было сделано одним из авторов — В. Ф. Цибульским). Такая феноменологическая модель, по существу, в четырёхгрупповом приближении, то есть для двух групп стран, каждая из которых производит товары двух видов, сделана. Модель полностью сбалансирована и настроена таким образом, что точно воспроизводит примерно полувековую историю развития экономики. Кроме этого она предоставляет возможность оценить изменения в перспективе, если сделать определённые предположения об изменении во времени тенденций, на основании которых проводятся вычисления.

Например, вполне допустимо предположение, что сформировавшиеся к настоящему времени тенденции продлятся и на перспективу, то есть продолжится сближение развитых и развивающихся стран по удельному энергопотреблению. Тенденция удорожания сырье-

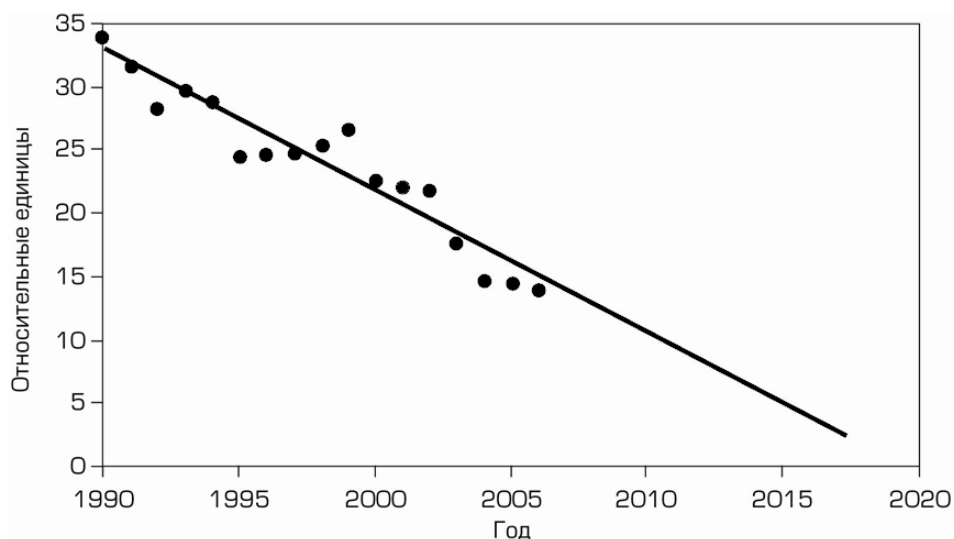


Рис. 4. Отношение стоимости товаров конечного потребления к стоимости товаров сырьевой группы

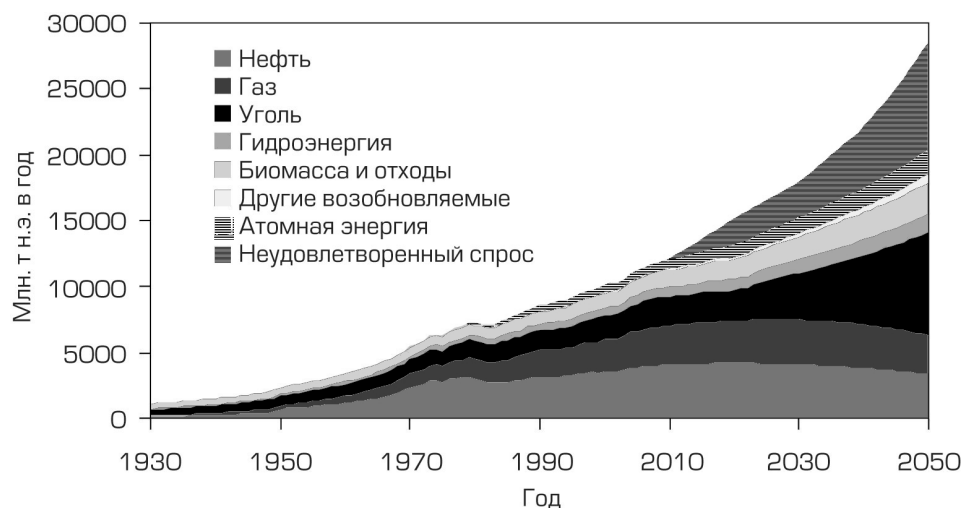


Рис. 5. Прогноз потребности в первичной энергии

вых товаров по отношению к товарам конечного потребления сохранится. Развивающиеся страны будут продолжать политику индустриального развития и активно интегрировать современные технологии в своё народное хозяйство, в том числе и в производство товаров конечного потребления, с темпами, сложившимися к настоящему времени.

Предположения о динамике основных тенденций следует дополнить нашими прогнозами по росту потребления первичной энергии. Наиболее согласованное представление о росте энергопотребления предполагает его увеличение примерно в 1,4 раза в ближайшие двадцать лет (и в 2,5 раза до середины века) по отношению к современному (рис. 5). Будет меняться и численность населения Земли, которая в двадцатилетней перспективе оценивается в 8 млрд человек. Все указанные параметры согласуются с большинством современных представлений о будущем развитии мировой энергетики, которые периодически публикуют Мировое энергетическое агентство и другие исследовательские организации.

Следует при этом отметить, что, по нашим оценкам, при оптимистическом прогнозе роста практически всех энерготехнологий удовлетворить возрастающие потребности человечества в первичной энергии в полном объёме, скорее всего, не удастся. На рис. 5 обозначена большая область неудовлетворённого спроса на первичную энергию, которая к середине века может составлять около 30% полного потребления, оцениваемого в 30 млрд т н.э. в год (сегодня это 12 млрд т н.э. в год).

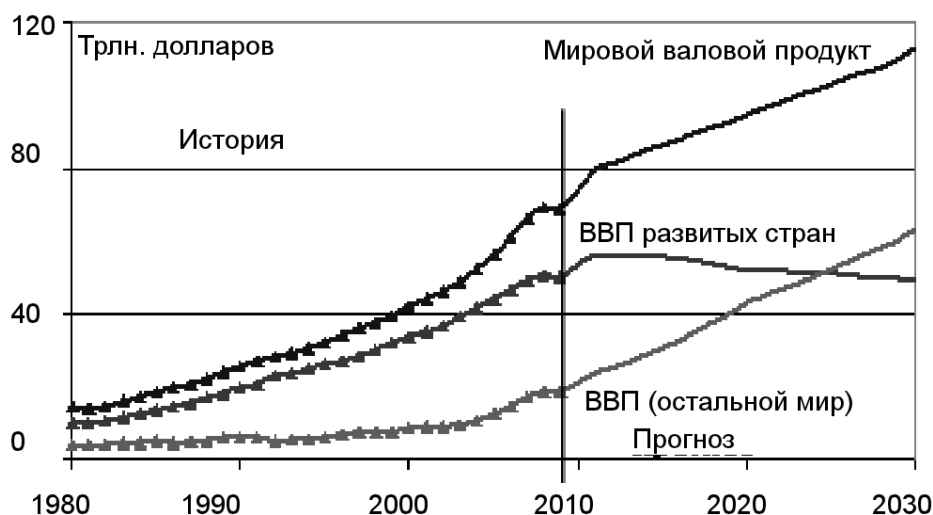


Рис. 6. Прогноз изменения ВВП развитых и развивающихся стран

Расчёты, проведённые с использованием созданной математической модели, показывают, что мировой валовой продукт и ВВП развитых и развивающихся стран будут меняться так, как это представлено на рис. 6.

По существу, такая динамика мировой экономики показывает, что в ней происходит смена лидера. Уже к середине 20-х годов XXI века совокупный ВВП развивающихся стран сравняется с ВВП развитых стран и будет продолжать расти, в то время как экономику развитых стран ожидает длительная депрессия. В настоящее время ВВП развивающихся стран составляет около 30% мирового, при этом в них проживает почти 80% населения Земли.

Принципиальной основой столь драматичного для развитых стран варианта развития событий является то обстоятельство, что ресурсные возможности современного мира уже приближаются к своему насыщению. Ключевой энергетический ресурс современности — нефть — все чаще рассматривается как ресурс, максимальная годовая добыча которого либо уже достигнута, либо будет достигнута в ближайшее время. Природный газ ожидает такая перспектива несколько позже, но восполнить за его счёт дефицит нефти по разным причинам, скорее всего, не удастся. Не менее пессимистичны и оценки значительного увеличения добычи твёрдого топлива. И дело здесь не столько в дефицитности этих энергетических источников, сколько в том, что их расширенная добыча потребует привлечения больших инвестиций для освоения бедных месторождений в более сложных геологических и климатических условиях, а это приведёт к росту цен на энергетическое сырьё, поэтому они потеряют свою привлекательность для современной экономики.

Чрезмерные надежды возлагаются на крупномасштабное использование биоресурсов и других возобновляемых источников энергии. Вклад их в решение проблемы энергообеспечения и развития масштабов хозяйственной деятельности вряд ли может стать определяющим в глобальном плане.

Что касается ожиданий существенного вклада в рост ВВП повышения эффективности использования энергии, то они также «сильно преувеличены». В течение последних двадцати шести лет энергоэффективность — количество долларов, полученных с 1 т н.э. энергии, — росла в среднем по миру с темпом 0,8% в год. Это примерно в 2 раза ниже темпа роста населения Земли, т.е. пока повышение энергоэффективности не в состоянии компенсировать темп роста потребностей в энергии. Несмотря на привлекательность и несомненную необходимость этого процесса, не приходится рассчитывать на то, что более экономное использование энергии позволит хотя бы стабилизировать её потребление при существующей структуре экономики, а главное, ценностных ориентирах общества.

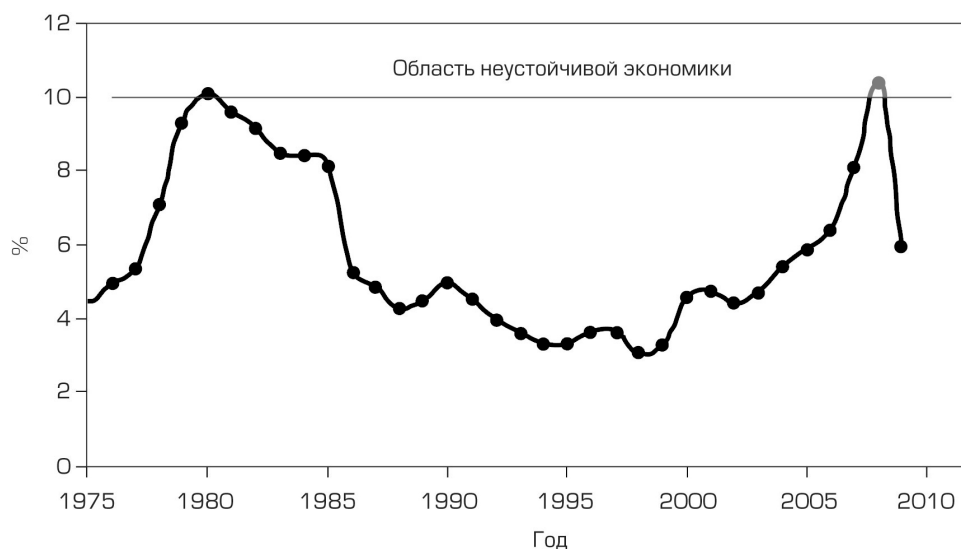


Рис. 7. Доля затрат на первичные энергоисточники от валового продукта в мировой экономике

Очень важно, что людям нужна не просто энергия, а дешёвая энергия. На рис. 7 представлен график изменения во времени доли затрат на энергетические ресурсы в мировом ВВП. В 80-х годах прошлого века и в 2009 году эта величина превысила 10%, и экономические кризисы не заставили себя ждать.

Вообще говоря, не столь важно, по каким причинам подорожала энергия, важно, что структура современного общества и его экономики не в состоянии выдержать высокие цены на энергию, а следовательно, и дорогой энергоисточник. Даже в том случае, когда ресурсная база первичного энергоисточника очень большая, он не будет востребован обществом, если затраты на его добычу будут превышать некоторую предельную величину в ВВП. Сейчас по имеющимся статистическим данным можно говорить, что это пороговое значение составляет примерно 10% мирового валового продукта.

В качестве небольшого отступления можно провести такую оценку для России. Годовое потребление природного газа в России составляет около 400 млрд м³. Если предположить, что внутренние цены на газ будут соответствовать мировым (около 300 дол./тыс. м³), то доля газа в ВПП страны составила бы около 1%, что, очевидно, неприемлемо, ведь природный газ составляет немногим более половины общего внутреннего потребления первичной энергии. В этом контексте довольно странно выглядят намерения уравнивать цены на внутреннем рынке природного газа со среднемировыми в ближайшей перспективе. Скорее всего, это намерение не будет реализовано. По тем же причинам подобные цены вряд ли приемлемы для Украины и Белоруссии.

Представленный выше прогноз перспектив развития мировой экономики начал формироваться ещё лет пятьдесят назад, и огромная инерция цивилизационной машины будет его реализовывать даже тогда, когда последствия станут очевидными для всех.

Другие варианты, связанные с изменением ценовых соотношений между сырьевыми товарами и товарами конечного потребления, или даже варианты, связанные с увеличением производства первичной энергии в два раза по сравнению с базовым прогнозом, не способны уже качественно изменить основной прогноз. К настоящему времени сложилась ситуация, когда свободных ресурсов для роста экономик развивающегося мира просто нет, и начинается перераспределение на мировом рынке имеющихся.

Изменение характера экономического роста развитых и развивающихся стран могло бы произойти в том случае, если бы существенным образом изменились глобальные тенденции, сложившиеся в настоящее время в мире — например, тенденция по сближению в потреблении энергоресурсов, а это возможно, если возникнут условия, при которых развивающиеся страны резко сократят темпы своего экономического роста (снижат их примерно

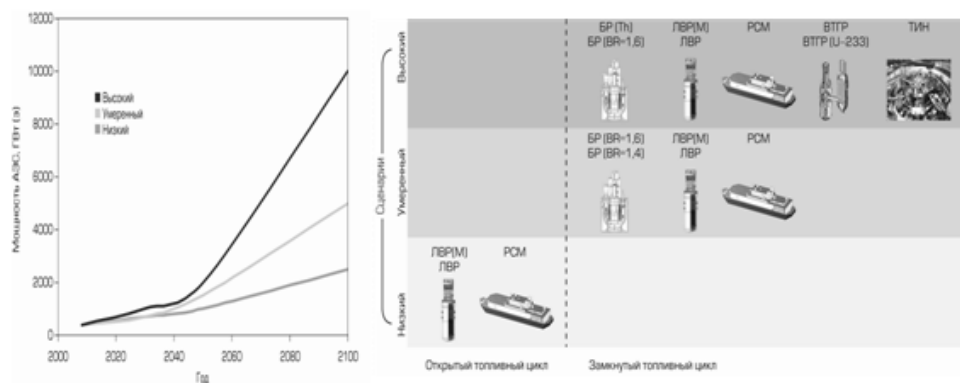


Рис. 8. Структура мировой ядерной энергетики в зависимости от сценарии её развития. Обозначения: ЛВР — легководные реакторы, ЛВР(М) — модернизированные легководные реакторы, РСМ — реакторы средней мощности, БР — реакторы на быстрых нейтронах, ВТГР — высокотемпературные реакторы, ТИН — термоядерные источники нейтронов

в три раза) и сконцентрируются на производстве сырьевых товаров. Расчёты показывают, что в этом случае темпы роста экономик развитых и развивающихся стран уравниваются и в перспективе до 2030 г. доля последних в мировом валовом продукте сохранится на современном уровне — около 30%. Считать такой сценарий реалистичным нет оснований.

Важно ещё обратить внимание и на такой ресурс, как экологический, который сейчас воспринимается значительной частью общества как критический. Нарастать в больших масштабах потребление органического топлива, усугубляя и без того весьма напряжённую климатическую картину, крайне опасно, но это, без сомнения, будет происходить. Преодоление последствий такой политики в будущем потребует ещё больших затрат, опять же энергетических, к которым современное общество и его технологии просто не готовы.

Все это, несомненно, не более чем гипотеза, ставящая под сомнение возможности людей управлять процессом своего развития только с помощью упрощённых экономических воззрений, определяющих прибыль как единственную цель. К сожалению, эта гипотеза, скорее всего, соответствует действительности.

С большой вероятностью можно констатировать, что кардинально изменить ситуацию в течение ближайших десятилетий не удастся, придётся приспосабливаться к новым реалиям. Хорошо, если этот период глобальной перестройки всей цивилизационной машины пройдёт не только в конфликтах, а за это время удастся создать механизм, который позволит сконцентрировать серьёзные ресурсы и усилия на развитии посткризисных технологий для более отдалённой перспективы, масштабы которых будут достаточными, чтобы не только обеспечивать потребности в энергии, но и активно и значимо воздействовать на экологические процессы и восстанавливать среду обитания.

Естественно, нельзя обойти вопрос о возможной роли ядерной энергии в решении проблем XXI века. Сегодня это апробированная технология производства энергии, обеспечивающая в высшей степени стабильное энергоснабжение с базовой нагрузкой по сравнению с неустойчивым энергоснабжением от возобновляемых источников, не дающая выбросов, доказавшая свою работоспособность и уже сейчас развёрнутая в широком масштабе. Оценки возможного масштаба развития ядерной энергетики весьма противоречивы и сильно зависят от экспертных групп, которые ими занимаются.

Наши исследования, представленные в МАГАТЭ в рамках проекта ИНПРО (рис. 8), дают оценки возможных сценариев ядерно-энергетического развития мира: от достаточно «низкого», реализуемого в открытом топливном цикле, до «высокого», а скорее близкого к максимально возможному по ресурсным ограничениям и достижимой скорости развёртывания топливообеспечивающих технологий.

Следует отметить, что в таком «максимальном», но ещё теоретически возможном сце-

нарии развития ядерная энергия давала бы к концу века порядка 25% первичной энергии для мировой экономики.

Выполненные оценки общего объёма необходимых с 2010 года до конца века инвестиций в развитие мировой ядерной энергетики даже для высокого сценария дают величину менее 1% от суммарного мирового валового продукта за этот период, при условии его роста с темпом 1% в год. Если учитывать, что доля затрат на энергию в мировом валовом продукте за последние 35 лет колебалась в диапазоне от 4 до 10%, возможные затраты на большую ядерную энергетику не представляются неприемлемыми.

Принципиально то, что существует чёткая корреляция между масштабами развития и структурным наполнением ядерной энергетики. Для реализации достаточно высоких сценариев ядерно-энергетического развития интенсивные ядерные программы должны начинаться сейчас, а перестройка структуры ядерной энергетики на замкнутый топливный цикл — в ближайшие десятилетия.

Россия примерно так и поступает, развернув сегодня второе в мире (после Китая) ядерное строительство.

Поступила в редакцию 19.09.2011