

Энергетика

УДК 621.3

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ И ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ

В.Я. Ушаков

Томский политехнический университет

E-mail: rcr@tpu.ru

Рассмотрены три группы основных проблем, связанных с удовлетворением растущего спроса на энергию: дефицит энергоресурсов и энергии, нарастающая нагрузка на окружающую среду, геополитические и социальные угрозы. На основе анализа «энергетической картины» современного мира показано, что основным способом решения этих проблем является реализация концепций энергосбережения и энергозамещения. Приведены основные причины неоправданно высокой энергоёмкости экономики России, потенциал энергосбережения и государственные и общественные меры по его реализации. Раскрыта концепция энергозамещения – замещение традиционных первичных энергоресурсов вспомогательными/альтернативными топливными ресурсами и нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии, а также освоение альтернативных способов получения электрической и тепловой энергии. Подчёркнута важная роль в обеспечении энергетической безопасности формирования справедливого мирового энергетического рынка.

Ключевые слова:

Энергетическая безопасность, энергосбережение, энергозамещение, нетрадиционное топливо, возобновляемые источники энергии, альтернативные способы производства энергии.

Key words:

Energy safety, energy saving, energy substitution, non-traditional fuel, renewable power sources, alternative way energy production.

«Энергетическая картина» мира

Исключительная важность для современной цивилизации удовлетворения её потребностей в энергии нашла отражение во введении в обиход такой характеристики как «энергетическая безопасность», которая является одним из важных элементов национальной безопасности страны (наряду с военной, экономической, экологической, продовольственной и другими видами безопасности) [1, 2]. В Энергетической стратегии России до 2030 г. (ЭС-2030) «энергетическая безопасность» трактуется как «состояние защищённости страны, её граждан, общества, экономики от угроз надёжному топливо- и энергообеспечению». Существует практически линейная зависимость от энергетического благополучия (выраженного, например, в кВт·ч электроэнергии, потребляемой одним её жителем в год) индекса человеческого развития – введённой ООН количественной характеристики состояния общества/государства.

В индексе учтены три основных параметра:

- ожидаемая средняя продолжительность жизни человека,
- образованность (грамотность взрослого населения и охват населения тремя ступенями образования – начальным, средним и высшим);

- материальный уровень жизни, определяемый величиной реального ВВП на душу населения, который пропорционален энергообеспеченности.

Для России индекс человеческого развития составляет 0,80 (60-е место из 173 стран), а для Норвегии – страны с наибольшим душевым потреблением энергии и с одним из самых высоких в мире жизненных стандартов, он достигает 0,98 (1-е место). Эксперты ООН, учитывая особую важность не только количественных, но и качественных показателей энергопотребления, рассматривают возможность введения в индекс человеческого развития ещё одного показателя – энергоёмкости единицы ВВП.

Россия предлагает мировому сообществу проект Конвенции по обеспечению глобальной энергетической безопасности, которую планируется обсудить на форуме АТЭС в 2012 г. Новая доктрина энергетической безопасности страны разрабатывается под эгидой Совета безопасности РФ. (Работа должна быть завершена до конца 2011 г.).

Весь XX в. характеризовался быстрым ростом потребления первичных энергоресурсов и электрической энергии – суммарное мировое потребление энергии увеличилось в 15 раз, а душевое – в 4,4 раза. (Различие обусловлено увеличением численности населения от 1,6 до 6 млрд человек). Одновре-

менно происходило освоение первичных источников энергии со всё более высоким энергосодержанием: каменного угля, нефти, газа, урана. Это послужило материальной основой научно-технического прогресса и обеспечило многократное увеличение производительности труда: в мире в среднем – в 4,5 раза, в Японии – в 15,5, в Норвегии – в 11,5, в Германии и США – в 5,6, в России – в 3,16.

Первое десятилетие нового столетия не внесло радикальных изменений в «энергетическую картину» мира, в сформировавшиеся тенденции [3]. Продолжает возрастать потребление энергии, несмотря на периодически случающиеся экономические кризисы и вызванные ими кратковременные снижения энергопотребления (рис. 1) [4].

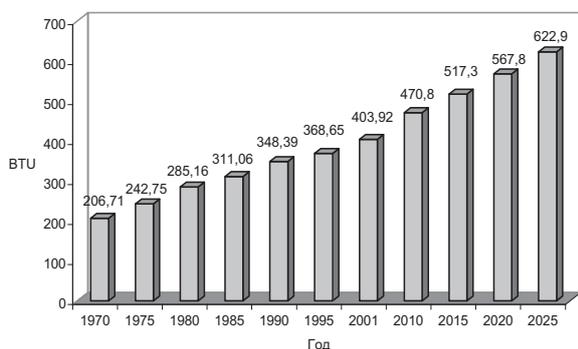


Рис. 1. Динамика мирового потребления первичной энергии (в британских тепловых единицах - BTU. 1 BTU = 252 кал.)

1. Основные проблемы общества, связанные с энергетикой

Можно говорить о «триаде энергетических проблем», в наибольшей мере влияющих на все стороны жизни человека и затрагивающих сами основы устойчивого развития цивилизации.

Эту триаду составляют:

- дефицит энергоресурсов и электроэнергии (журналисты назвали эту проблему как «энергетический голод»);
- угроза благополучию окружающей среды вследствие техногенного воздействия объектов энергетике (угроза «экологического инфаркта»);
- геополитические и социальные угрозы.

Первая проблема, связанная с исчерпаемостью (невозобновляемостью) основных на сегодня и на достаточно отдалённую перспективу энергетических ресурсов (из них сегодня вырабатывается более 80 % электроэнергии), усугубляется крайней неравномерностью их распределения по планете. Даже в рамках «большой восьмёрки» энергообеспеченность (отношение объёма наличных энергоресурсов к их потребному объёму) изменяется в пределах порядка величин, рис. 2.

Существуют 2 способа повышения энергообеспеченности: 1) поиск и освоение собственных энергоресурсов (невозобновляемых и возобновляемых); 2) энергосбережение и повышение энергоэффективности.

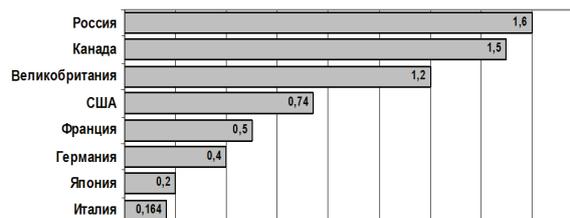


Рис. 2. Энергообеспеченность стран «большой восьмёрки» (отношение объёма наличных энергоресурсов к их потребному объёму), на основе [5]

Энергодефицитные страны вынуждены тратить значительную часть своего ВВП на закупку энергоресурсов, что негативно влияет на экономику и социальную сферу. К тому же они оказываются уязвимыми для политических и социальных катаклизмов в странах-поставщиках энергоресурсов на мировой рынок.

Кажется парадоксальным, но проблема энергоресурсов есть и у энергоизбыточных стран. Речь идёт об опасности для них «сесть на нефтегазовую иглу», т. е. жить за счёт природной ренты. Сырьевая траектория развития экономики страны, привлекательная простотой реализации в начале, обращается опасной зависимостью от конъюнктуры на мировом энергетическом рынке, ослаблением стимулов инновационного развития. Россия в последние десятилетия оказалась, фактически, в числе таких стран. Не случайно отказ от сырьевой модели развития экономики, переход на инновационный путь развития объявлены руководством страны и воспринимаются обществом важнейшей задачей.

Вторая проблема – экологическая – нарастает по мере роста масштабов энергетике. А эти масштабы и используемые энергетикой технологии на сегодня таковы, что более 50 % техногенных выбросов в атмосферу парниковых газов приходится на объекты энергетике. Энергетика интенсивно загрязняет также литосферу и гидросферу. Потоки энергии в энергосистемах становятся соизмеримыми или даже превосходящими потоки энергии в крупномасштабных природных системах и процессах, табл. 1 [6].

Таблица 1. Сопоставление мощностей потоков энергии природного и антропогенного характера

Параметры	Энергия, ТВт	
	В настоящее время	В середине XXI в.
Антропогенная энергия	12...14	55...100
Мощность электростанций	4,8	25...40
Тепловой потенциал океанов и суши	2,0...2,5	
Приливы и отливы	5...6	
Ураганы (торнадо)	20...30	
Землетрясения	25...40 и более	

Всё это негативно влияет на климат («парниковый эффект», сопровождающийся повышением температуры атмосферы) и на погоду (проявляется

в аномально большой нестабильности). Техногенные аварии на энергетических объектах вследствие их огромных масштабов и мощностей стали приобретать черты техногенных катастроф. (Ближайшие примеры – аварии на нефтяной платформе в Мексиканском заливе и на японской АЭС «Фукусима-1»).

Неравномерность распределения энергоресурсов на Земле, которая воспринимается как несправедливость не только частью обывателей энергодефицитных стран, но и некоторыми политическими и государственными деятелями, создает основу *третьей проблемы*. Её следствиями являются:

- неоднократно предпринимавшиеся попытки насильственного передела энергетических ресурсов (экономическими, политическими и даже военными средствами);
- угроза массовой неконтролируемой миграции населения вследствие катастрофического изменения климата и вызванного им голода;
- опасность перерастания социальной напряжённости в социальный взрыв при ухудшении условий жизни.

Международное энергетическое агентство (МЭА) в 2008 г. разработало *базовый и два вариативных варианта* мирового энергопотребления до 2050 г. при одинаковых макроэкономических параметрах развития экономики.

В *базовом варианте* ожидается:

- увеличение объёма потребления энергии с 11,428 млрд т.н.э. в 2005 г. до 23,268 млрд т.н.э. в 2050 г.;
- рост концентрации парниковых газов с 0,0385 % в 2005 г. до 0,055 % в 2050 г.;
- рост температуры атмосферы Земли на 6 °С и, как следствие, угрожающие изменения в условиях жизни населения и необратимые изменения в природных процессах.

За этот период мировые инвестиции в топливно-энергетический комплекс должны составить 254 трлн долл. (6 % от ВВП).

В *первом вариативном варианте* предусмотрено:

- удержание роста температуры атмосферы на уровне не выше 2...2,5 °С от уровня 2005 г., что требует снижения выбросов CO₂ на 50...85 %;
- эффективность использования энергоресурсов и энергии должна увеличиваться на 1,4 % в год и обеспечиваться уже освоенными технологиями или новыми с высокой степенью готовности к применению.

Реализация этого варианта требует дополнительно 17 трлн долл. инвестиций.

Во *втором вариативном варианте* предусмотрено:

- сокращение объёмов выбросов к 2050 г. на 50 % по сравнению с уровнем 2005 г.;
- снижение потребления энергии с темпом 1,7 % в год за счёт применения совершенно новых высокоэффективных энергетических технологий, находящихся только в процессе разработки.

Затраты на НИОКР по новым технологиям, на их продвижение на рынок и коммерциализацию потребуют дополнительно 45 трлн долл.

2. Способы решения проблем

2.1. Концепции развития энергетики

Большинство экспертов приходят к выводу, что решение проблемы удовлетворения растущих потребностей человечества в энергии по приемлемым ценам и при минимальном ущербе окружающей среде в любом из прогнозируемых вариантов развития энергетики лежит на пути реализации концепций *энергосбережения и энергозамещения* в сочетании с наращиванием объёмов добычи традиционного топлива и вовлечением во всё больших масштабах в энергетическое производство вспомогательных /альтернативных топливных ресурсов (ВТР).

Концепция энергосбережения заключается в повышении эффективности обращения с энергоресурсами на всех этапах их жизненного цикла: от поиска – разведки – добычи до производства из них электрической и тепловой энергии – транспортировки энергии к удалённым потребителям – её распределения и, наконец, – потребления. Термин «*энергосбережение*» в Федеральном законе от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» трактуется как «...реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объёма используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования (в т. ч. объёма произведённой продукции, выполненных работ, оказанных услуг)».

Концепция энергозамещения означает постепенный переход от традиционного топлива (газа, угля, нефти, урана) и ВТР к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии (НВИЭ), а также освоение новых технологий получения электрической и тепловой энергии, которые во второй половине столетия могут существенно изменить облик энергетики, снять или хотя бы уменьшить остроту существующих проблем – ресурсных, экологических и геополитических [3–7].

Обе концепции должны реализовываться одновременно с постепенным усилением акцента на энергозамещение, поскольку у энергоэффективности есть пределы роста в виде физических законов. Эксперты МЭА определили «дорожные карты» новых ключевых энергетических технологий, развитие которых наряду с наиболее эффективными существующими способно обеспечить устойчивое, безопасное и эффективное развитие мировой энергетики в долгосрочной перспективе [7]. «Дорожные карты» разработаны для каждого вида новых технологий и предназначены для оценки соответствия их параметров целевым ориентирам развития мировой энергетики, а также выявления конкретных мер научного, технического, финансового и коммерческого характера, которые необходимо принять с целью продвижения их на энергетические рынки.

2.2. Энергосбережение

Отправной точкой для проведения активной целенаправленной политики в области энергосбережения можно считать нефтяной кризис 1973–1974 гг., повлекший за собой рост цены на нефть и последовавшие за этим резкий спад производства, рост безработицы и инфляции в США и странах Западной Европы. Выход был найден, прежде всего, в экономии энергоресурсов за счёт: а) разработки и реализации программ энергосбережения во всех сферах экономики и в социальной сфере; б) в стимулировании расширения масштабов использования НВИЭ; в) в структурной перестройке экономики.

Для нашей страны последствия кризиса были иными – существенное увеличение доходной части бюджета вследствие роста цен на нефть и газ и увеличения объёма их экспорта. Переориентация высококоразвитых стран на энергоэффективный путь развития в нашей стране осталась незамеченной или не принятой во внимание. Развитие экономики продолжало планироваться без серьёзного учёта энергоёмкости ВВП. На сегодня она в нашей стране выше в 3,5..4 раза по сравнению с передовыми странами, а объём избыточно потребляемых энергоресурсов, который фактически является потенциалом энергосбережения, достигает 40..45 % от общего энергопотребления. По оценкам Всемирного Банка, для его реализации необходимы инвестиции в объёме 320 млрд долл., но и окупятся они всего за 2–3 года.

Энергосбережение является привлекательным направлением решения экономических и экологических проблем энергетики: а) соотношение между объёмами инвестиций в энергосберегающие мероприятия и затратами на выработку количества энергии, равного сэкономленному, оценивается в среднем как 1:3; б) энергосбережение борется не с негативными *последствиями* для окружающей среды производства энергии, а с *первопричиной* – избыточным её потреблением и, соответственно, производством.

Основными факторами, обуславливающими большую энергоёмкость российской экономики, являются следующие.

1. Суровые климатические условия на территории России (только 2 % населения Земли, кроме россиян, живут в подобных климатических условиях) – 20,6 %.
2. Большие расстояния (первое место в мире по размерам территории) и большие энергозатраты на их преодоление – 18,3 %.
3. Устаревшие технологии и изношенное оборудование – 24,4 %.
4. Низкие, по сравнению с большинством зарубежных стран, цены на энергоресурсы, не стимулирующие энергосбережение, – 14,6 %.
5. Энерго- и ресурсорасточительный менталитет российских граждан – 10,4 %.
6. Несовершенная нормативно-правовая база энергосбережения, несовершенство учёта ТЭР и слабый энергетический надзор – 11,7 %.

Лишь переход на рыночный путь развития, сопровождавшийся резким повышением цен на энергоресурсы внутри страны, снижение конкурентоспособности российских товаров на внутреннем и внешнем рынках, поиск путей выхода из кризиса заставили руководство страны объявить в середине 90-х гг. прошлого века энергосбережение важнейшей компонентой государственной политики. Стартовые условия для реализации такой политики оказались чрезвычайно тяжелыми: «задержка на старте» на четверть века и, как следствие, отсутствие нормативно-правовой базы, слабая материально-техническая, методическая и кадровая база организации энергосбережения. Ситуация осложнялась большим моральным и физическим износом основных фондов в отраслях экономики, а также утерей населением традиций бережливости и рачительного отношения к природным богатствам. Движение по пути активного энергосбережения началось с создания соответствующей нормативно-правовой базы: федеральных законов, указов президента и постановлений правительства (только на федеральном уровне выпущено несколько десятков документов). Благодаря этому, за последние 15 лет удалось достичь определённых результатов:

- энергосбережение всё чаще стало восприниматься не как очередной лозунг, а как насущная необходимость;
- во всех субъектах РФ действуют программы энергосбережения, центры энергосбережения, сотни программ энергосбережения муниципалитетов и отдельных предприятий/организаций. Создано большое число общественных объединений в сфере энергосбережения, начались подготовка и переподготовка специалистов, международное сотрудничество;
- в период с 2000 по 2009 гг. энергоёмкость в стране снижалась примерно на 4 % в год (но только 1 % из них следует относить на счёт собственно энергосбережения, а 3 % обеспечивались структурными изменениями в экономике).

Однако такие темпы снижения удельной энергоёмкости ВВП не отвечают требованиям перехода страны на инновационный путь развития, не обеспечивают решение общей для всех граждан задачи – распорядиться богатейшими энергоресурсами так, чтобы не решать проблемы сегодняшнего дня в ущерб будущим поколениям.

Объективная оценка сложившейся ситуации послужила побудительным мотивом для принятия в последние годы важных решений по данной проблеме:

- вышел Указ Президента РФ от 04.05.2008 г. № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики»;
- принят новый Федеральный закон от 27.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»,

- в указе Президента от 07.07.2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники» среди 8 приоритетных направлений одно – «**Энергоэффективность, энергосбережение**, атомная энергетика».

За 1,5 года после принятия ФЗ № 261 с целью создания условий для его реализации принято большое количество нормативно-правовых актов и других документов: указ Президента от 13.05.2010 г. № 579 «Об оценке эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов РФ и органов местного самоуправления городских округов и муниципальных районов в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности», более 10 постановлений и распоряжений правительства, столько же приказов министерств и федеральных служб. Уже в процессе исполнения закона выявлено большое количество недоработок и упущений, которые, вероятно, будут учтены в подзаконных актах, а возможно и в новой редакции закона.

2.3. Замещение традиционных первичных энергоресурсов

2.3.1. Вспомогательные/альтернативные топливные ресурсы

По мере удорожания традиционных энергоресурсов (вследствие роста энергопотребления и истощения месторождений, удобных для разработки) возрастает интерес к вспомогательным/альтернативным топливным ресурсам ВТР – горючим сланцам и битуминозным пескам, тяжёлой (с повышенной вязкостью) нефти, попутному нефтяному газу, угольному (шахтному) метану, горючим бытовым и промышленным отходам, газогидратам. По всем видам ВТР (кроме газогидратов) на сегодня разработаны и освоены технологии их добычи и преобразования в электрическую и тепловую энергию. Первоочередной задачей здесь является улучшение экономических показателей производства энергии из ВТР до конкурентного уровня.

Вовлечение в хозяйственную деятельность уже освоенных ВТР в крупных масштабах хотя и «не делает погоду» в большой энергетике, но будет способствовать решению ряда задач:

- продление срока жизни нефтяного и газового секторов топливно-энергетического комплекса;
- сдерживание роста цен на углеводороды;
- увеличение числа стран и регионов, имеющих собственное энергетическое сырьё.

Гигантские запасы метана в газогидратах и столь же гигантские трудности его извлечения без ущерба окружающей среде требуют сопоставимых финансовых затрат. В развитых и в некоторых развивающихся странах (Япония, Южная Корея, США, Канада, Великобритания, Франция, Россия, Китай, Индия и др.) ведётся поиск и разведка месторождений газогидратов и разработка технологий извлечения из них метана. Эксперты отводят на освоение энергетикой газогидратов несколько

десятилетий (примерно до середины столетия). Полагают, что при успешном решении этой задачи проблема «энергетического голода» отодвинется на неопределённый срок.

2.3.2. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии

Нетрадиционные возобновляемые источники энергии НВИЭ – это энергоресурсы постоянно существующих природных процессов на планете, а также энергоресурсы продуктов жизнедеятельности биоценозов растительного и животного происхождения. (Давно освоенный энергетикой возобновляемый источник энергии – гидроэнергия крупных рек – не включается в число НВИЭ. При его учёте используется обобщающий термин «возобновляемые источники энергии» – ВЭИ).

К НВИЭ относят: биомассу, солнце, ветер, земные недра, водотоки (малые реки, каналы), воды морей и океанов, содержащих потенциальную энергию градиентов температуры, кинетическую энергию приливов и отливов, волн и течений, а также химическую энергию градиентов солёности. В последние годы сюда же относят горючие бытовые и производственные отходы.

Характерной особенностью ВИЭ является их неистощимость, либо способность восстанавливать свой потенциал за короткое время – в пределах срока жизни одного поколения людей. По оценкам экспертов, мировой потенциал НВИЭ составляет 20 млрд т.у.т., что в 2 раза больше нынешней добычи минерального топлива [8], табл. 2.

Таблица 2. Ресурсы ВИЭ в мире и России, млн т.у.т.

Вид энергии	Теоретические		Технические	
	Мир	Россия	Мир	Россия
Энергия Солнца	1,3·10 ⁸	2,3·10 ⁶	5,3·10 ⁴	2,3·10 ³
Энергия ветра	2,0·10 ⁵	2,6·10 ⁴	2,2·10 ⁴	2,0·10 ³
Геотермальная энергия (до глубины 10 км)	4,8·10 ⁹	–	1,7·10 ⁵	1,0·10 ²
Энергия мирового океана	2,5·10 ⁵	–	–	–
Энергия биомассы	9,9·10 ⁴	10 ⁴	9,5·10 ³	53
Гидроэнергия	5,0·10 ³	3,6·10 ²	1,7·10 ³	1,2·10 ²

Как отмечено выше, нефтяной кризис 1973–1974 гг., дал старт крупномасштабному использованию в энергетике НВИЭ. При высокой экологической чистоте энергетических технологий на основе НВИЭ, бесплатности ресурса (топливная составляющая в себестоимости электрической и тепловой энергии на ТЭЦ доходит до 70 %) на сегодня доля НВИЭ в производстве энергии в мире измеряется всего единицами, а электрической энергии – десятками долями процентов. Для России эти величины составляют, соответственно, около 2 % (без дров) и менее 1 %.

Рост масштабов использования НВИЭ сдерживается рядом характерных для них недостатков, обусловленных их природой, которые сужают границы экономической эффективности использования НВИЭ:

- 1) низкой удельной мощностью потока энергоносителя, которая обуславливает большие габариты и массу энергоустановок и, соответственно, большие удельные капитальные затраты на их сооружение (примерно от 2 до 15 тыс. долл./кВт);
 - 2) низким КПД – доли первичной энергии, преобразуемой в электричество или техническое тепло (0,3...0,4 – для большинства НВИЭ; 0,6...0,7 – для ГЭС; 0,12...0,16 – для фотопреобразователей).
 - 3) большой суточной, сезонной и стохастической нестабильностью мощности большинства НВИЭ, что требует совместной эксплуатации энергоустановок на различных НВИЭ, работы в паре с агрегатами на традиционном топливе или аккумулирования энергии, что существенно усложняет и удорожает сооружение и эксплуатацию таких энергетических комплексов.
- Энергодефицитные страны разработали хорошо сбалансированные системы стимулирования освоения НВИЭ (в координатах «поощрение – принуждение»). Евросоюз в 2008 г. принял решение довести долю НВИЭ в балансе производства энергии к 2020 г. до 20 %. МЭА прогнозирует достижение 46 %-й доли НВИЭ в мировом балансе производства электроэнергии к 2050 г. Согласно ЭС-2030, доля НВИЭ в выработке электроэнергии в России должна достичь 4,5 % к 2020 г.

2.4. Альтернативные способы производства энергии

В решении проблем энергетики большие надежды человечество возлагает на развитие альтернативной энергетики, которая основывается на известных, но не освоенных в промышленных масштабах эффектах. Речь идет, прежде всего, о расширении масштабов использования атомных реакторов на быстрых нейтронах, об управляемом термоядерном синтезе и о прямом преобразовании энергии водорода и кислорода в электрическую с помощью электрохимических генераторов (топливных элементов). В меньшей степени это относится к магнетогидродинамическому способу производства энергии [9], интерес к которому ослаб в последние 20–25 лет из-за ряда технических проблем его реализации.

2.4.1. Реакторы на быстрых нейтронах.

Замкнутый ядерный топливный цикл

Атомная энергетика сегодня удовлетворяет около 18 % мировых потребностей в *электрической энергии* (в России – около 16 %). Считается реально достижимым к середине столетия увеличение доли атомной энергетики до 30...40 % в общем производстве электроэнергии при условии радикального повышения эффективности использования ядерного топлива и безопасности АЭС, преодоления «синдрома Фукусимы».

Мировые объемы ежегодного потребления урана энергетическими реакторами превосходят 68 тыс. т, а производства – 35...38 тыс. т. Недостаю-

щие объемы обеспечиваются складскими запасами. Нарращивание объемов добычи природного урана не может обеспечить долгосрочное развитие крупномасштабной атомной энергетики при использовании существующей технологии, основанной на «тепловых» реакторах с водяным или графитовым замедлителем нейтронов. Это обусловлено низкой эффективностью использования природного урана в таких реакторах: используется только изотоп ^{235}U , содержание которого в природном уране составляет только 0,72 %; основной составляющей является ^{238}U (99,28 %), вероятность деления которого в реакторе на тепловых нейтронах очень низка.

Поэтому долговременная стратегия развития атомной энергетики предполагает переход к прогрессивной технологии на основе использования «быстрых» реакторов (БР) [10]. Принципиально важно, что в БР возможны превращение ^{238}U в делящийся изотоп плутония ^{239}Pu и реализация замкнутого топливного цикла – переработка топлива, выгруженного из реакторов АЭС, для последующего дожигания невыгоревших и вновь образовавшихся делящихся изотопов. Из 20 тыс. т отработанного ядерного топлива можно изготовить 19,5 тыс. т нового ядерного топлива. Для получения такого количества «свежего» топлива необходимо добыть и переработать 6 млн т урановой руды. Только за счет вовлечения в ядерный топливный цикл ^{238}U удастся увеличить энергетический потенциал добываемого природного урана в 100 раз.

В целом, перевод атомной энергетики на «всеядные» БР открывает перспективу создания топлива для АЭС в виде искусственных делящихся элементов на неограниченную перспективу, а само ядерное топливо перевести в разряд практически возобновляемых энергетических ресурсов.

Однако, несмотря на «всеядность» БР и возможности реализации с их помощью замкнутого ядерного топливного цикла, они не получили широкого распространения из-за ряда серьезных проблем с их эксплуатацией. Вследствие высокой энергонапряженности в активной зоне реактора, жесткие требования предъявляются к теплоносителю. Использование жидкометаллических теплоносителей полностью не устраняет такие проблемы, как их горение, затвердение и кипение, взаимодействие с материалами активной зоны и контура. Потребность не в двух, а в трех тепловых контурах усложняет и удорожает реактор.

Согласно прогнозам, достижение конкурентоспособности АЭС-БР можно ожидать только после 2025 г. при эквивалентной цене урана порядка 200 долл./кг. США и Западная Европа практически свернули свои программы перевода атомной энергетики на БР из-за отсутствия на сегодня экономических предпосылок. Япония продолжает выполнять полномасштабную программу разработки БР и намерена к 2020 г. выйти с ними на мировой рынок. (Если авария на АЭС «Фуку-

сима-1» не внесёт существенные коррективы в эти планы).

Россия является лидером в разработке нового поколения БР. Эксплуатация в СССР и России в течение четверти века промышленных реакторов БН-350 в Шевченко (Актау, Казахстан), БН-600 в Заречном (Свердловская обл.) и нескольких опытных БР доказала реализуемость идеи регенерации отработанного урана, плутония, продуктов деления в целях создания нового топлива. Начато строительство реактора БН-800 (площадка Белоярской АЭС), который рассматривается МАГАТЭ как перспективная модель атомной энергетики XXI в., способной обеспечить в недалеком будущем лидирующие позиции России на этом рынке. Начато проектирование реактора БН-1600. Ожидается, что к 2025–2030 гг. именно этот реактор станет основой для российской программы развития атомной энергетики.

Одним из путей решения задач по увеличению ресурсов ядерного топлива, повышению безопасности реакторов, обеспечения режима нераспространения и улучшения экологической приемлемости АЭС может оказаться разработка и широкомасштабное применение *ториевого топливного цикла* (в качестве топлива используется ^{232}Th) [11, 12]. Работы по ториевому циклу выполнялись или выполняются в ведущих ядерных державах (в США и Германии есть готовые технологии и реакторы, но они законсервированы из-за высокой цены производимой с их помощью электроэнергии), а также в Индии и Бразилии. В России с небольшой интенсивностью они проводятся в ряде научных центров и университетов. Их судьба будет зависеть от успехов развития других направлений атомной энергетики.

2.4.2. Термоядерная энергетика

А. Реакторы с магнитным удержанием плазмы. Начиная с 50-х гг. XX в. ведущие державы тратят большие усилия и средства на овладение реакцией управляемого синтеза легких элементов (УТС) — практически неисчерпаемым источником энергии. На единицу веса термоядерное топливо дает в 10 млн раз больше энергии, чем органическое топливо и в 100 раз больше, чем уран.

Многолетние исследования УТС показали, что создание промышленного реактора (термоядерной электростанции) — дело отдаленного будущего. (Успехи первых десятилетий освоения УТС позволяли физикам обещать энергетическое изобилие благодаря созданию на Земле «рукотворных Солнц» уже к концу XX столетия). Движение к конечной цели оказалось столь трудным и затратным, что стала очевидной необходимость международной кооперации, а создание промышленного реактора пришлось отодвинуть на середину или даже на вторую половину этого столетия.

Страны ЕС, Япония, СССР и США в 1987 г. начали совместное проектирование эксперименталь-

ной термоядерной установки ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Позднее к ним присоединились Китай, Южная Корея и Индия. Желание принять участие в проекте изъявляют также Бразилия, Казахстан, Канада, Мексика.

Основными целями проекта ITER являются достижение условий зажигания и длительного термоядерного горения, которые будут типичны для реального термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы, а также испытание и демонстрация технологий для практического использования УТС.

Создаваемый экспериментальный реактор (начало строительства — 2010 г., окончание — 2019 г., место строительства — Франция) — огромное, сложное и дорогостоящее сооружение. Его высота (включая системы обеспечения) 60 м, диаметр 30 м, вес — 23 тыс. т. Объем плазмы в установке — 850 м³, ток в плазме — 15 МА. Стоимость проекта — около 16 млрд долл. ITER — предпоследний этап на пути к практическому использованию УТС. Ожидается, что научные и инженерные знания, полученные в экспериментах на ITER (2019–2037 гг.), приведут к сооружению в Японии демонстрационной термоядерной электростанции, по-видимому, к 2050 г. (проект ДЕМО). Ее мощность составит примерно 1,5 ГВт; стоимость 1 кВт·ч — примерно в 2 раза выше, чем средняя стоимость 1 кВт·ч сейчас в нашей стране. К сожалению, и на сегодня нет 100 % уверенности в успешной реализации этой идеи.

Б. Реакторы с инерциальным удержанием плазмы. Инерциальное удержание плазмы и, соответственно, инерциальный термоядерный синтез (ИТС) были предложены в СССР в середине 60-х гг. Это направление, во многом альтернативное первому, ориентировано на то, чтобы, не затрачивая усилий на удержание плазменных сгустков, создать такие условия (плотность), при которых основная часть термоядерного топлива «сгорала» бы до того, как оно разлетится [13]. Трудности, которые в токамаке заключаются в удержании плазмы с температурой около 50 млн град., трансформировались в задачу нагрева ее за очень малое время. Временные параметры этого процесса определяются инерцией топливной смеси, поэтому нагрев должен осуществляться за время порядка 10^{-9} с. Возможность создания термоядерных реакторов, работающих короткими импульсами при воздействии лазерных лучей или ионных пучков, в значительной мере зависит от успехов в разработке лазеров и высокоточных ускорителей с высоким КПД. Необходимо увеличить КПД разогревающих лазеров до 10...15 % вместо существующих 0,3 %, увеличить частоту импульсов до 10–100 вспышек в секунду. В полной мере эти проблемы относятся и к пучковому варианту ИТС. В обоих вариантах весьма сложной проблемой является механическая и термическая устойчивость реактора, способного длительное время выдерживать повторяющиеся с та-

кой частотой взрывы дейтерий-третиевых мишеней. При взрыве только одной мишени (шарики миллиметровых масштабов) выделяется энергия в десятки кВт·ч.

Даже при успешном решении научно-технических проблем на пути широкого использования будущих ИТС-электростанций встанут экономические проблемы. Но, тем не менее, это направление в освоении УТС продолжает развиваться в Великобритании, Франции, США, Японии, России.

2.4.3. Водородная энергетика

Перспективным направлением в решении экологических проблем энергообеспечения в последние годы признана водородная энергетика, базирующаяся на водороде как топливе. Важнейшим преимуществом водорода является экологическая чистота получения из него электрической энергии с помощью *топливного элемента*. Последний представляет собой электрохимический генератор, осуществляющий прямое преобразование химической энергии в электрическую. При этом единственным побочным продуктом реакции является вода.

В конце прошедшего столетия в промышленно развитых странах (в том числе в России) работы в области водородной энергетике отнесены к приоритетным направлениям развития науки и техники и находят всё большую поддержку государственных структур и частного капитала. Основным инициатором всплеска в последние годы интереса к водороду как энергоносителю является автомобильная промышленность. Достоинства водорода здесь настолько очевидны, что автомобилестроители ведущих стран вкладывают огромные средства в исследование и разработки в области водородных технологий. Стационарная энергетика (в первую очередь автономная, а в последние годы и системная) стала проявлять интерес к водородной энергетике и к топливным элементам, как к ее технологической основе, в связи с быстрым ростом мощности топливного элемента. В большой энергетике водород, вероятно, сможет занять лидирующее положение (35..40 % генерации на основе топливного элемента) только к концу нынешнего столетия.

В настоящее время большую часть производимого в промышленных масштабах водорода получают в процессе *паровой конверсии метана*. Этот способ на сегодня наиболее хорошо освоен и широко распространен, хотя и имеет ряд недостатков: а) исходное сырье – природный газ – представляет собой ценный невозобновляемый ресурс; б) около 50 % газа расходуется на проведение эндотермической реакции паровой конверсии; в) производство сопровождается вредными выбросами. Более перспективным, но пока и более дорогим способом производства водорода является *электролитическое разложение воды* – электролиз с помощью электроэнергии, получаемой либо из традиционного топлива, либо из НВИЭ. Третий способ получения водорода – *термолиз воды*, т. е. разложение

воды на водород и кислород при температуре выше 2500 °С. Такая температура может быть получена с помощью концентрации солнечных лучей, а примерно в два раза меньшая – в атомном высокотемпературном гелиевом реакторе.

Европейской программой «Водородные технологии и топливные элементы», названной «стратегическим выбором Европы», планируется довести долю водорода в энергетическом балансе до 2 % к 2015 г. и до 5 % – к 2020 г. Для этого общи инвестиции должны составить 4–15 млрд евро.

США на разработку проблем водородной энергетике в ближайшие 10 лет планируют направить из федерального бюджета 5 млрд долларов и 50–60 млрд долл. инвестиций ожидается от частных компаний. Департамент энергетике установил следующие этапы коммерциализации разработок:

- к 2010 г. – первичный выход водорода на рынок;
- к 2015 г. – коммерческая доступность водорода;
- к 2025 г. – полномасштабная реализация водородной энергетике.

(Экономические проблемы последних лет могут внести неблагоприятные коррективы).

В Японии планируется почти пятикратное увеличение водородных электростанций (на основе топливных элементов) за ближайшие 10 лет (от 2,2 ГВт в 2010 г. до 10 ГВт в 2020 г.).

В нашей стране в последние годы работы в области водородной энергетике и топливных элементов выполняются, в основном, в кооперации с зарубежными партнерами. Это внушает оптимизм относительно масштабного внедрения топливного элемента в электроэнергетику. Наиболее вероятно, что произойдет это не ранее середины этого столетия.

Выводы

1. На сегодня основной проблемой в мировой энергетике является не недостаток энергоресурсов, а недостаток инвестиций. В XXI в. человечеству не грозит глобальная нехватка энергетических ресурсов при условии успешной реализации стратегий энергосбережения и энергозамещения, а также создания цивилизованного мирового рынка энергоресурсов и энергетике.
2. Наиболее вероятным представляется сценарий развития энергетике на основе использования всех или, по крайней мере, большинства уже известных на сегодня энергоресурсов и наиболее прогрессивных технологий их преобразования в электрическую и тепловую энергию. На ближайшие десятилетия не просматриваются ни новые источники энергии, ни принципиально новые способы получения электричества и теплоты.
3. Более реальная угроза устойчивому развитию цивилизации исходит от нарастающего губительного техногенного воздействия на природу.

ную среду, в первую очередь, топливно-энергетического комплекса. В энергетике уменьшение ущерба природе должно осуществляться как за счёт энергосбережения, так и за счёт повышения экологической чистоты энергетических технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон РФ от 5 марта 1992 г. № 2446-1 «О безопасности».
2. Бушуев В.В., Воропай Н.И., Мастепанов А.И. и др. Энергетическая безопасность России. – Новосибирск: Наука, 1998. – 302 с.
3. Ушаков В.Я. Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 469 с.
4. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
5. Безруких П.П. Роль возобновляемой энергетики в энергосбережении в мире и России // *Электрика*. – 2004. – № 4. – С. 3–5.
6. Энергетика окружающей среды. 2011. URL: <http://crimean-center.com/?p=288> (дата обращения: 19.09.2011).
7. Ушаков В.Я. Возобновляемая и альтернативная энергетика: ресурсосбережение и защита окружающей среды. – Томск: Изд-во «СибГрафикс», 2011. – 137 с.

Доложено на пленарном заседании Международной молодёжной конференции «Энергосберегающие технологии», состоявшейся в ТПУ 28–30 июня 2011 г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (мероприятия 2.1 – I очередь) в соответствии с государственным контрактом ГК № 14.741.11.0163.

8. Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050. (Second Edition) OECD/IEA. – Paris, 2008. – 650 p.
9. Твайделл Д., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
10. Роза Р. Магнетогидродинамическое преобразование энергии. – М.: Энергоиздат, 1970. – 250 с.
11. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Кошелёв Ф.П. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 490 с.
12. Мурогов В.М., Троянов М.Ф., Шмелёв А.М. Использование тория в ядерных реакторах. – М.: Энергоиздат, 1983. – 96 с.
13. Гуськов С.Ю. Прямое зажигание мишеней термоядерного синтеза потоком ионов лазерной плазмы // *Квантовая электроника*. – 2001. – № 31 (10). – С. 885–890.

Поступила 19.09.2011 г.

УДК 620.91.004

ЗАМЫКАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В ПРЕОДОЛЕНИИ МИРОВОГО ДЕФИЦИТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ. Ч. 1. СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Г.И. Полтараков*, Р.Е. Водянкин, А.В. Кузьмин

*Институт ядерной энергетики (филиал) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, г. Сосновый Бор
Томский политехнический университет
E-mail: kuzminav@tpu.ru

Приводятся данные экспертных оценок глобального потребления энергии на душу населения, структуры и динамики изменения мирового энергопотребления. Анализ структуры мирового обеспечения энергоресурсов показывает их нарастающий дефицит.

Ключевые слова:

Глобальное потребление энергии, структура энергоресурсов, дефицит энергоресурсов.

Key words:

Global energy consumption, structure of energy resources, shortage of energy resources.

Анализ глобального потребления энергии на душу населения, структуры и динамики изменения мирового энергопотребления и структуры обеспечения энергоресурсов показывает их нарастающий дефицит.

На протяжении всей истории своего развития человечество потребляло энергию, и потребности в ней постоянно росли. Так, за последние 50 лет при удвоении населения планеты, потребление энергии увеличилось в 4 раза [1]. Несмотря на то, что начиная с 1980 г. энергопотребление на душу населения остаётся практически неизменным на уровне 2,3 т. условного топлива на человека

с точностью $\pm 3\%$ (рис. 1), динамика роста общего энергопотребления [2] остаётся достаточно высокой (рис. 2).

Этот рост определяется тремя основными факторами: развитием мировой экономики, ростом населения и стремлением к более равномерному распределению душевого энергопотребления между странами [3].

Предполагается, что экономический рост до 2025 г. будет достаточно высоким – среднегодовой прирост мирового ВВП составит 4,3 % [4]. Во второй четверти (2025–2050 гг.) экономический рост замедлится и прежде всего из-за замедления