

ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Курс лекций

Лекция 7. ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ, ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Содержание

1. Базовые компоненты ядерной индустрии	2
2. Новая энергетическая революция и ядерный ренессанс	5
3. Атомная энергетика в мире	9
4. Перспективы развития атомной энергетики	11
5. Атомная энергетика в России	20
6. Приложение. Промышленная энергетика и ее перспективы.	27
6.1 Гидроэлектростанции.	27
6.2 Тепловые станции.	27
6.3 Установки, преобразующие энергию ветра, солнца, приливов и отливов в электрическую.	28
6.4 Атомные станции.	28

Никакой вид энергии не обходится так дорого, как её недостаток.

Гоми Баба, 1964.

За сто лет развития, наука о радиоактивности породила новую отрасль производства – ядерную индустрию.

Ядерная индустрия (ЯИ), отрасль промышленности, связанная с использованием ядерной энергии; совокупность технологий и технических средств, предназначенных для целесообразного использования ядерной энергии.

Ядерная энергия, внутренняя энергия атомных ядер, выделяющаяся при некоторых ядерных превращениях. Ядерная энергия по своим масштабам в миллионы раз превосходит энергию, выделяющуюся при химических реакциях, что отражает огромную величину ядерных сил по сравнению с электромагнитным взаимодействием, которое играет основную роль в атомах и молекулах.

Естественная радиоактивность демонстрирует наличие больших энергетических ресурсов, запасенных в атомных ядрах (например, при полном превращении 1 кг радия выделяется $3,5 \cdot 10^5$ квт-ч энергии). Однако малая скорость распада делает полезную мощность практически ничтожной. Бета-радиоактивные элементы (например, ^{90}Sr) нашли применение в атомных батареях – источниках электрического тока, в которых ядерная энергия преобразуется в электричество.

Широкое применение ядерной энергии стало возможным благодаря открытию самоподдерживающихся ядерных реакций: цепных реакций деления и термоядерных реакций синтеза. При делении ядер 1 кг урана выделяется $2 \cdot 10^7$ квт-ч энергии, что эквивалентно сжиганию 2500 тонн каменного угля. Один 1 см³ урана имеет энергетическое содержание, эквивалентное 60000 л бензина, 110-160 т угля или около 60000 м³ природного газа. При использовании рецикла ресурсы ядерных материалов смогут обеспечивать прогнозируемые энергетические потребности мира на протяжении 1000 лет. Мир никак не может игнорировать этот факт.

В настоящее время осуществлены как неуправляемые цепные реакции взрывного типа (атомная бомба), так и управляемые реакции с регулируемым уровнем выделения энергии (атомные реакторы). Ядерная энергия, получаемая в ядерных цепных реакциях, используется на атомных электростанциях, кораблях, подводных лодках, космических аппаратах и т.п. Реакции

термического синтеза, легких ядер, т.е. термоядерные реакции, благодаря их большому тепловому эффекту способны стать самоподдерживающимися. Ядерная энергия, выделяющаяся при термоядерных реакциях, играет огромную роль в природе, т.к. является основным источником энергии Солнца и звезд. В настоящее время удалось осуществить неуправляемые термоядерные реакции взрывного типа (водородная бомба). Управляемую термоядерную энергию осуществить достаточно просто (например, облучая дейтерид лития тепловыми нейтронами), но добиться превышения энергетического выхода над затратами пока не удалось. Ведутся поиски путей осуществления управляемой термоядерной реакции, способной стать мощным энергетическим источником. Есть еще один, потенциально более мощный, чем термояд, источник ядерной энергии – аннигиляция частиц и античастиц. В этом случае изменение массы покоя близко к 100%, поскольку конечными продуктами процесса аннигиляции являются самые легкие из заряженных частиц – электроны, и лишенные массы покоя нейтрино. Реализовать этот способ получения энергии тоже пока не удалось.

Важным направлением ядерной индустрии является ядерная энергетика. Ядерная энергетика (атомная энергетика), отрасль энергетики, использующая ядерную энергию для электрификации и теплофикации. Одновременно это область науки и техники, разрабатывающая методы и средства преобразования ядерной энергии в электрическую и тепловую.

На первом этапе своего развития ядерная индустрия, ЯИ, ориентировалась на выделение, концентрирование и очистку природных радионуклидов (урана, тория, радия и т.п.). Производство радиоактивных изотопов было направлено в основном на научные и медицинские цели. В середине 20-го века мощный рост ЯИ связан с созданием оружия массового поражения: атомного и термоядерного. К концу века все большее значение стало приобретать энергетическое направление ЯИ: производство электроэнергии и транспортные двигатели.

В данной лекции мы рассмотрим основные компоненты современной ядерной индустрии, существующие ядерно-топливные энергетические комплексы военного и гражданского назначения, а также проблемы ядерной энергетики (как в глобальном смысле, так и в России).

1. Базовые компоненты ядерной индустрии

В настоящее время ядерная индустрия это:

1. Ядерное топливо и компоненты ядерного оружия (горючее для атомных реакторов и термоядерных установок, оружейный уран, плутоний и некоторые актиниды, керамика на базе делящихся материалов);
2. Ядерное оружие (атомные, водородные, нейтронные и радиационные бомбы (снаряды, мины), геофизическое и пучковое оружие и др.);
3. Оборудование для испытания ядерного оружия (стенды, компьютеры);
4. Оборудование для проведения ядерных взрывов в мирных целях (создание подземных газовых резервуаров, стимулирование нефтяных пластов, тушение пожаров на газовых скважинах, уничтожение радиоактивных отходов, химического или бактериологического оружия, прокладка каналов и т.п.);
5. Оборудование для демонтажа ядерного оружия и утилизации его компонентов (обратные технологии);
6. Ядерные реакторы (исследовательские, энергетические и транспортные (корабельные, самолетные, ракетные), реакторы для радиационного материаловедения и химического синтеза;
7. Термоядерные установки (магнитные ловушки, устройства лазерной стимуляции);
8. Радиоактивные изотопы и меченые соединения (в том числе – средства медицинской диагностики и терапии);
9. Источники излучения (для технологических, радиационно-химических и сельскохозяйственных целей);

10. Приборы и методики использования радиоактивных изотопов в технике, химии, материаловедении, биологии, физиологии, медицине, геологии, экологии, сельском хозяйстве, археологии и т.п.,

11. Методы и средства защиты персонала от излучения, а также системы обеспечения безопасности населения и окружающей среды;

12. Оборудование для регистрации ионизирующего излучения и мониторинга радионуклидов и радиационных полей в среде обитания человека, а также дозиметрии;

13. Оборудование для переработки и захоронения отходов (установки для остекловывания, керамизации или битумирования отходов, хранилища, могильники, полигоны для захоронения отходов; оборудование по демонтажу и утилизации отработавших свой срок реакторов);

Центральной частью ядерной индустрии является ядерный топливно-энергетический комплекс (ЯТЭК), основными продуктами которого является компоненты ядерного оружия, а побочными – электрическая энергия, тепло, пресная вода, продукты радиационного синтеза или радиационно-термической модификации материалов. ЯТЭК включает предприятия добычи и переработки урановых и ториевых руд, конверсии урана, изотопного обогащения его, изготовления топливных элементов и сборок ядерных реакторов, ядерного машиностроения, атомные электростанции, ядерные станции теплоснабжения, исследовательские ядерные установки и т.д. Ключевой проблемой функционирования ЯТЭК является обеспечение безопасности производства (в первую очередь – работников предприятия), населения и окружающей экосистемы. Ее решение во многом зависит эффективности решения радиохимических задач.

В истории развития ядерной энергетики можно выделить два этапа:

1. Создание энергетики на базе реакторов на тепловых нейтронах, использующих в качестве горючего уран-235; накопление в них плутония для запуска и параллельного освоения реакторов на быстрых нейтронах.
2. Развитие на основе реакторов на быстрых нейтронах атомной энергетики большого масштаба, постепенно замещающей традиционную энергетику на ископаемом органическом топливе.

Стратегической целью ЯТЭК - овладение на основе ядерного бридинга (размножения) неисчерпаемыми ресурсами дешёвого топлива — урана-238 и, возможно, тория-232. Тактическая цель - использование тепловых реакторов на ^{235}U (освоенных для производства оружейных материалов — плутония и трития — и горючего для реакторов атомных подводных лодок) с целью производства энергии и радиоизотопов для народного хозяйства и накопления энергетического плутония для реакторов на быстрых нейтронах. По мере накопления тепловыми реакторами плутония для запуска и освоения быстрых реакторов может быть развита атомная энергетика большого масштаба, постепенно замещающая традиционную, не имеющая в дальнейшем ограничений со стороны ресурсов дешёвого топлива. Это связано с тем, что для реакторов с коэффициентом воспроизводства равным или большим единицы, полностью использующих природный уран или торий, приемлемы бедные месторождения последних с неисчерпаемыми ресурсами.

Два обстоятельства оказали сильное влияние на становление атомной энергетики:

- Высокие темпы роста традиционной энергетики в послевоенные десятилетия - в мире 5-7% в год, в СССР до 12% в год — требовали от атомной энергетики еще более высоких темпов развития.
- Успехи ядерных технологий в военной области и первых АЭС породили амбициозные цели создать уже к концу 20-го века атомную энергетику масштаба тысяч гигаватт (Намерения эти, впрочем, осуществить не удалось).

Развитие мирной ядерной энергетики началось в 1954 г. с пуском в СССР первой атомной электростанции в г. Обнинске. Мощность первой АЭС была всего 5 МВт (эл.), но за ней

последовало сооружение более мощных АЭС во всем мире. К 80-м годам 20-го века в мире насчитывалось около 300 действующих ядерных реакторов общей установленной мощностью около 200 ГВт (эл.). Атомная энергетика производила около 10% общемирового количества электроэнергии. Таким образом, всего за четверть века мощность АЭ возросла от 5 до 200000 МВт. Трудно найти в истории пример подобного быстрого внедрения новой энергетической технологии в жизнь общества. Такие темпы во многом определялись государственными инвестициями в реакторную базу и топливный цикл, развивавшихся для военных целей. В 1999 в 33 странах 436 атомных энергоблока с суммарной электрической мощностью ~350 ГВт выработали ~2300 млрд кВт·ч. В 2004 г. в мире эксплуатировалось 439 ядерных реактора (еще 31 строился) и 274 исследовательских реактора (16 строилось). В 20-м веке АЭС в разные периоды производили от 16 до 21,5% всей электроэнергии мира.

Но амбициозные программы развития уже в 20-ом веке атомной энергетики крупных масштабов оказались и невостребованными, и неподготовленными технически.

Крупные аварии на АЭС ТМІ (Трехмильный остров, США) и в Чернобыле (СССР) указали на неприемлемый уровень безопасности АЭС первых поколений; строительство реакторов на быстрых нейтронах ограничилось первыми опытными блоками из-за высокой стоимости, а вопросы топливообеспечения на длительную перспективу отошли на второй план; не нашли приемлемого решения проблемы обращения с отдельными видами облучённого ядерного топлива и с радиоактивными отходами; не было найдено надёжного решения проблемы нераспространения ядерного оружия. Базовая стратегия развития атомной энергетики — стратегия интенсивного внедрения в энергетику ядерных реакторов, на быстрых нейтронах, не была осуществлена ни в одной стране.

Сейчас ядерная энергия вносит существенный вклад в производство и использование энергии во всем мире (составляя около 15% вырабатываемой в мире электроэнергии), однако, она не смогла полностью удовлетворить ожидания, которые были широко распространены несколько десятилетий назад. Указанная ситуация сложилась в силу таких факторов, как:

аварии на АЭС Три Майл Айленд, на Чернобыльской АЭС и в Токай-Мура,

в США наблюдается существенное превышение начальных смет расходов на строительство АЭС, что является следствием чрезмерного государственного регулирования в электроэнергетической отрасли и низкого качества управления в этом секторе,

не была решена проблема долговременного хранения и утилизации отработанного топлива и высокорadioактивных отходов,

развертывание ядерных технологий, использующих наработки военных ядерных программ, было проведено слишком быстро,

“раскол” 1970-х годов между США и государствами, имеющими существенные ядерные энергетические мощности (напр., Францией, Великобританией, Россией, Японией), относительно использования плутония препятствовал дальнейшему развитию ЯТЦ, в особенности, разработке технологий следующего поколения. В настоящее время наличие и хранение 200 тонн оружейного плутония, отражающее экономическую невыгодность вторичного использования плутония, вызывает беспокойство в аспекте распространения ядерного оружия (как и накопление плутония в ОЯТ энергетических реакторов),

уменьшение государственного регулирования электроэнергетических отраслей во многих странах препятствует развертыванию новых мощностей в ядерной энергетике, требующему больших первоначальных капиталовложений (даже при относительно низких эксплуатационных затратах),

привлечение общественного внимания к международному терроризму после 11 сентября 2001 года повысило уровень озабоченности относительно безопасности объектов ядерного топливного цикла, например, хранилищ отработанного ядерного топлива, как возможных целей акций массового устрашения (т.н. “грязные бомбы”).

Поэтому, несмотря на значительную роль, которую играет атомная энергетика, к концу 20-го века она пришла к определённому кризису. Об этом свидетельствовало падение её доли в мировом энергопроизводстве, сворачивание ядерных программ и разработок по быстрым реакторам в развитых странах Запада. Кроме того, атомная энергетика подверглась критике, вплоть до требования ее полного закрытия. И хотя в подобной критике присутствует субъективизм, а иногда и полная необъективность, следует признать, что для нее есть основания.

Атомная энергетика, как и любая технология, требует совершенствования. Есть и особые причины для обостренного внимания к ней:

- потенциальная опасность катастроф с большим экологическим и экономическим ущербом (реальность этой опасности подтверждена рядом аварий);
- накопление высокоактивных, делящихся и долгоживущих отходов;
- связь ядерной энергетике с опасностью распространения ядерного оружия.

Современные ядерные реакторы при существующем масштабе атомной энергетике являются достаточно безопасными установками. Атомная энергетика к концу 20-го века наработала 8000 реакторо-лет, из них ~5000 без крупных аварий после апреля 1986. Это — серьезный успех ядерной технологии. Безопасность второго поколения реакторов обеспечивается увеличением числа различных систем безопасности и систем ограничения выхода радионуклидов, ужесточением требований к оборудованию и персоналу. Правда, в результате АЭС становятся все более сложными и, следовательно, - более дорогими. При господствующей в настоящее время философии безопасности, атомная энергетика близка к её экономически «предельному» уровню: дальнейшее наращивание систем безопасности ведёт к неминуемой потере конкурентоспособности атомной энергетике.

Анализ современного состояния атомной энергетике показывает, что эксплуатационная безопасность атомной энергетике приемлема для существующих масштабов её использования при условии постепенного замещения действующих энергоблоков на ядерные реакторы третьего поколения. Следует, однако, учесть, что ресурсы природного рентабельно извлекаемого из недр урана ограничены. При доминирующей сегодня практике «сжигания» урана в тепловых реакторах эти ресурсы будут исчерпаны уже в текущем веке, как в России, так и в мире в целом. Переработка отработавшего топлива при рецикле плутония (МОХ-топливо) в тепловых реакторах может лишь ненамного продлить эти сроки. Поэтому будущее ядерной энергетике – строительство энергетических ядерных реакторов на быстрых нейтронах, вовлекающих в топливный цикл весь уран (не только уран-235, но и уран-238). Из-за принятой в настоящее время стратегии, ориентирующейся на реакторы с тепловыми нейтронами, конкурентоспособность атомной энергетике под бременем растущих расходов на безопасность, обеспечиваемую наращиванием инженерных систем, имеет устойчивую тенденцию к снижению.

2. Новая энергетическая революция и ядерный ренессанс

В настоящее время мировое сообщество стоит перед глобальным экологическим кризисом, связанным с истощением почв, водных и морских ресурсов, природных ископаемых. В мировом масштабе развиваются такие опасные явления, как потепление климата, истощение озонового слоя, уменьшение биоразнообразия, загрязнение среды обитания и др. Интенсивный рост народонаселения и бурное экономическое развитие отдельных регионов оказывает все возрастающее давление на природные ресурсы и системы, уже и так достигшие высокого уровня деградации.

С целью борьбы с надвигающейся катастрофой, ООН выдвинула концепцию устойчивого развития. Устойчивое развитие – это экономическое развитие, устойчивость которого поддерживается неопределенно долго без носящего циклический характер чередования бумов и депрессий, но одновременно - развитие без истощения экологического или социального капитала в неприемлемых пределах и без возложения непропорционально тяжелого бремени на будущее поколение. Основной компонент концепции устойчивого развития - существенный рост

производства энергии, в частности - электрической. Действительно, без энергетических затрат невозможно справиться ни с экологическими проблемами, ни с усугубляющими их проблемами нищеты и голода. Однако безопасных и безвредных источников электроэнергии не существует: все они связаны с риском для здоровья человека и окружающей среды. Поэтому новые разработки энергосистем должны иметь ярко выраженный экологический аспект.

Энергия по разумной цене является определяющим фактором — как для экономического роста, так и для роста уровня жизни.

В настоящее время в мире основным источником энергии является природное топливо. Около 95% энергии, используемой мировой экономикой, приходится на природное топливо, причем рост его использования составляет 20% в десятилетие. Сжигание природных органических топлив приводит к выбросу в атмосферу больших количеств изменяющих климат парниковых газов. В частности, накопление CO_2 в верхних слоях атмосферы приводит к потеплению климата, что, в свою очередь, может вызвать таяние приполярных льдов, затопление обширных территорий и к выделению другого парникового газа — метана, огромные запасы которого в виде гидратов распределены в слоях вечной мерзлоты. Образующиеся при горении природного топлива оксиды углерода, азота и серы выпадают в виде кислотных дождей, отравляя леса, почву, озера и реки. Крайне неприятен и сам процесс уничтожения при горении кислорода, поскольку его поступление в атмосферу и так сильно уменьшилось из-за вырубания тропических лесов. Вредным последствием использования в энергетике природного угля является радиоактивное загрязнение местности долгоживущими радионуклидами.

Газ, нефть и уголь относятся к невозобновляемым источникам энергии. Интенсивная их эксплуатация приводит к уменьшению запасов, удорожанию разведки и добычи, и может лишить будущие поколения источников энергии и ценного сырья для химической промышленности. Перспективы развития тепловых станций связаны с возможным падением цен на энергоносители. Однако для конца 20-го и начала 21-го века имеет место тенденция роста цен на уголь, газ и нефть. Рост цен затормозил программы развития тепловых электростанций и снова сделал ядерную энергетику экономически конкурентноспособной. Этому способствовал и тот факт, что для стран, не имеющих больших ресурсов ископаемого топлива, использование ядерной энергетики обеспечивает надежность, которую не может гарантировать энергетика, основанная на поставке ископаемого топлива. Ведь зачастую такие поставки идут из политически нестабильных регионов.

Существующая технология производства электроэнергии на базе использования органических топлив связана с превращением всех затраченных материальных ресурсов и большей части энергии в отходы, выбрасываемые в окружающую среду. В атмосферу земли в начале 21-го века ежегодно поступало 200 млн.т. окиси углерода, 50 млн.т. различных углеводородов, 150 млн.т. двуокиси серы, 50 млн.т. окиси азота, 250 млн.т. мелкодисперсных аэрозолей. За последние несколько десятилетий концентрация углекислоты в земной атмосфере возросла на 10-12%, а содержание пылевых частиц только за последние 10 лет увеличилось на 12%. Такая нагрузка на окружающую среду перестает иметь локальное или региональное значение, она превращается в глобальную проблему.

Наиболее весомый вклад в загрязнение окружающей среды пылью, сернистым газом, окислами азота дают тепловые электростанции и котельные. Например, при сжигании антрацита на ТЭС мощностью 2400 МВт из топок удаляется в атмосферу $10^7 \text{ м}^3/\text{ч}$ дымовых газов, содержащих 2350 т/ч двуокиси углерода, 251 т/ч паров воды, 34 т/ч двуокиси серы, 9.34 т/ч окислов азота и 2 т/ч летучей золы. В США на долю ТЭС приходится до 70% общего выброса SO_2 , до 20% -пыли, до 40%-окислов азота. Ущерб от загрязнения окружающей среды исчисляется миллиардами долларов. К этому необходимо добавить, что содержащиеся в угольной золе ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th , ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{40}K рассеиваются в окружающей среде, что приводит к внешнему и внутреннему облучению населения, живущего вблизи ТЭС. И хотя дозовая нагрузка на население от угольной ТЭС не превышает нескольких процентов естественного радиационного

фона, она, как правило, в 5 - 40 раз выше дозовой нагрузки от АЭС такой же мощности. А с учетом выбросов химических компонентов проживание вблизи АЭС менее опасно, чем вблизи ТЭС в 36000 раз.

Поэтому одной из срочных мер является уменьшение на 60% эмиссии диоксида углерода, чтобы хотя бы удерживать концентрацию CO_2 на современном уровне. Следовательно, проблема защиты климата Земли требует существенного сокращения использования в энергетике природного топлива. Так, мир в начале 21-го века оказался на пороге третьего глобального перехода от природного топлива на другие источники энергии. Основные надежды сейчас вновь связаны с процессами ядерного деления.

Известно, что ядерная энергия достаточно широко распространена в мире: более 20% энергии сейчас вырабатывается на атомных электростанциях. Некоторые страны (Франция, Англия, Япония) планируют довести выработку энергии на АЭС до 90%. На **Рис.1** в качестве примера приведены диаграммы вкладов различных источников в энергетику России и Франции.



Рис. 1 Структура энергетики Франции и России (2000 г.)

Суммарная электрическая мощность АЭС в мире составляет 400 ГВт (2000 г.). Сначала ядерная энергетика бурно развивалась, и планировалось к 2000 году 50% мировой энергетики перевести на АЭС.

Однако серия аварий на АЭС, казалось, похоронили все эти намерения.

Почему же мировое сообщество вновь обращает свое внимание на ядерное топливо?

Вызвано это явными преимуществами ядерной энергетики по сравнению с другими энерготехнологиями:

1. Высокая концентрация энергии (Ядерное топливо имеет в миллионы раз большую концентрацию энергии, чем органическое топливо).
2. Неисчерпаемые ресурсы (необходимость экономии горючих ископаемых, как ценного химического сырья).
3. Экологическая чистота (отсутствие потребления кислорода, выбросов CO_2 , серосодержащих кислотных газов, оксидов азота).
4. Высокая безопасность (малая аварийность с низким числом жертв);
5. Малый объем отходов, возможность их локализации и «сжигания» в ядерных реакторах.
6. Ядерно-энергетические комплексы - источник электроэнергии, промышленного тепла, энергии для химического синтеза, обессоливания воды, производства пресной воды.
7. Низкие транспортные расходы. (Малый объем топлива для АЭС значительно снижает транспортные расходы на его перевозку и обеспечивает возможность долговременной эксплуатации АЭС в автономном режиме. Особенно это важно для отдаленных и труднодоступных районов).
8. Утилизация компонентов ядерного оружия (Накопление в некоторых странах больших количеств оружейного плутония и других делящихся материалов требует использования ядерных реакторов для их сжигания).

Ограниченность природных топливных ресурсов делает тепловые станции неконкурентными в долговременном плане: быстрое истощение природных ресурсов лишит будущие поколения как источников энергии, так и ценного химического сырья. Расширенное воспроизводство топлива в ядерных реакторах делает запасы топлива для АЭС практически неисчерпаемыми. Очевидной является и невозможность освоения в ближайшем будущем альтернативных

источников энергии (энергии солнца, ветра, приливов и т.п.), сравнимых по мощности с источниками на органическом топливе и АЭС. Альтернативные источники энергии полезны для некоторых конкретных целей, но они не могут обеспечивать устойчивое развитие мирового сообщества. (Гидроэнергия эффективна только в горных районах, термояд откладывается до конца 21-го века, развитие солнечных, геотермальных, ветровых и приливных электростанций сдерживается как отсутствием аккумуляторов, так и методов транспортировки электрической энергии на большие расстояния).

Никаким рациональным энергосбережением невозможно обеспечить возрастающие потребности населения и промышленности в электрической и тепловой энергии. Основной прирост производства энергии в XXI столетии будет обеспечиваться за счет увеличения числа АЭС. Разработка и освоение нового поколения энергетических ядерных реакторов с пассивными системами защиты, при которых опасное развитие цепной реакции останавливается не техническими средствами, а законами природы, сделает АЭС самым безопасным производителем энергии.

Ядерная индустрия открывает принципиально новые возможности и перспективы развития энергетики. Для этого необходимы:

1. Реализация такого топливного цикла, при котором из ограниченных природных запасов топливного сырья в течение тысячелетий можно получать необходимое количество энергии для удовлетворения энергопотребности человечества при любом прогнозируемом сценарии развития цивилизации.
2. Осуществление такого замкнутого технологического цикла, при котором воздействие атомной энергетики на окружающую среду будет существенно меньше, чем воздействие других традиционных энерготехнологий.
3. Развитие энергетики для удалённых районов и для крупных транспортных средств.
4. Замещение ядерным топливом органического топлива, которое в отличие от первого может быть эффективно использовано для других целей: химический синтез, транспорт и т.д.

В некоторых индустриальных странах существует сильная оппозиция развитию ядерной энергетики. Но в развивающихся странах идея перехода на ядерное топливо встречает большой энтузиазм.

Для совершения новой энергетической революции необходимо перейти на новые типы ядерных реакторов, удовлетворяющих следующим требованиям:

1. Безопасность
2. Малоотходность
3. Малый риск всего ядерно-топливного цикла.
4. Высокая экономическая эффективность по сравнению с альтернативными способами производства энергии.

Перспективы ядерной энергетики следует рассматривать в контексте трех политических проблем: устойчивость поставок и использования энергии, озабоченность по поводу воздействия энергопотребления на природную среду и приход конкуренции на рынки электроэнергии. Очевидно, что ядерная энергетика располагает потенциалом конкуренции на рынках электричества на базе экологической устойчивости, но при условии решения ключевых вопросов. К ним относятся: 1) Принятие обществом новых ядерных установок и идеи продления срока службы действующих АЭС. 2) Создание эффективных и дешевых установок по удалению высокоактивных отходов и переработке отработанного топлива. 3) Обеспечение расширения программы гражданской ядерной энергетики без увеличения риска распространения ядерного оружия.

Атомная энергетика обладает всеми необходимыми качествами для постепенного замещения значительной части энергетики на ископаемом органическом топливе и становления в качестве доминирующей энерготехнологии. Способность ядерной энергетики производить электричество без эмиссий двуокиси углерода и кислых газов приведет к росту ее использования,

при условии, что будут преодолены препятствия, лежащие вне сферы экономики. Например, если будет найдено простое средство лечения раковых заболеваний радиационного происхождения, масштабы воздействия и, следовательно, издержки, связанные с ядерным топливным циклом, могут стать пренебрежимо малыми.

3. Атомная энергетика в мире

Атомная энергетика до катастрофы на Чернобыльской АЭС считалась надежным и перспективным направлением развития энергетики. С 1970 она развивалась ускоренными темпами и достигла наивысшего расцвета в период 1980-1985. Суммарная мощность действовавших тогда АЭС в мире достигла 117 МВт. В последующие годы можно было ожидать сохранения того же темпа развития. Однако Чернобыльская катастрофа перечеркнула многие планы, и после 1986 начинается явный спад в атомной энергетике. На рубеже 1990-х. количество закрываемых реакторов превысило количество вводимых в эксплуатацию. Во многих странах развернулись серьезные дискуссии об экономических и экологических проблемах атомной энергетики. Все настойчивее стали обсуждаться вопросы экологической безопасности атомной энергетики и проблемы обращения с радиоактивными отходами (РАО) и отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), образующимися в процессе работы АЭС. Некоторые страны, такие, как Швеция, Италия, Австрия, кардинально пересмотрели свою политику по отношению к атомной энергетике, Германия стала снимать с эксплуатации энергоблоки, построенные в восточных землях по советским проектам. В настоящее время ни в одной стране Западной Европы, кроме Франции, не ведется строительство новых реакторов.



Рис. 2а. Вклад АЭС в мировую энергетику

Тем не менее, потенциал действующих АЭС в мире велик. На ядерную энергию в 2001 приходилось 6% мирового топливно-энергетического и 17% производимой электроэнергии. По состоянию на начало 1997, в 31 стране мира находились в эксплуатации 432 атомных энергоблока общей установленной мощностью 367,4 ГВт. Еще 53 энергоблока находятся в стадии строительства.

	Реакторы в эксплуатации		Реакторы в процессе строительства	
	Число блоков	Суммарная мощность, МВт(э)	Число блоков	Суммарная мощность, МВт(э)
АРГЕНТИНА	2	935	1	662
АРМЕНИЯ	1	376		
БЕЛЬГИЯ	7	5712		
БРАЗИЛИЯ	2	1901		
БОЛГАРИЯ	6	3538		
КАНАДА	14	10018		
КИТАЙ	5	3715	6	4878
ЧЕШСКАЯ РЕСП.	5	2560	1	912
ФИНЛЯНДИЯ	4	2656		
ФРАНЦИЯ	59	63073		
ГЕРМАНИЯ	19	21283		
ВЕНГРИЯ	4	1755		
ИНДИЯ	14	2503	8	2693
ИРАН			2	2111
ЯПОНИЯ	54	44289	3	3696
КОРЕЯ, НДР			1	1040
КОРЕЯ, РЕСП.	18	14890	2	1920
ЛИТВА	2	2370		
МЕКСИКА	2	1360		
НИДЕРЛАНДЫ	1	450		
ПАКИСТАН	2	425		
РУМЫНИЯ	1	655	1	650
РОССИЯ	30	20793	2	1875
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1800		
СЛОВАКИЯ	6	2408	2	776
СЛОВЕНИЯ	1	676		
ИСПАНИЯ	9	7524		
ШВЕЦИЯ	11	9432		
ШВЕЙЦАРИЯ	5	3200		
ВЕЛИКОБРИТАНИЯ	33	12498		
УКРАИНА	13	11207	4	3800
США	104	97860		
ВСЕГО В МИРЕ	442	356 746	35	27 743

* Сумма включает шесть реакторов суммарной мощностью 4884 МВт (э) в эксплуатации и два блока в стадии строительства, 2700 МВт (э), на Тайване, Китай. Таблица отражает состояние на ноябрь 2002 года.

Рис.26. Состояние атомной энергетики в мире (на ноябрь 2002)

На долю атомной энергетики приходится 17% вырабатываемой электроэнергии в мире. При этом в ряде стран АЭС являются одним из основных ее источников (**Рис. 2**). Лидируют в области использования атомной энергетики США, где в эксплуатации находится 109 энергоблоков общей электрической мощностью 105,4 ГВт. Во Франции работает 56 энергоблоков мощностью 61 ГВт. Далее следует Япония, где работает 52 энергоблока общей мощностью 44 ГВт, и Германия с 20 энергоблоками мощностью 23,5 ГВт. В России в эксплуатации находится 29 энергоблоков установленной мощностью 21,2 ГВт. В десятку стран, имеющих развитую атомную энергетику входят также Канада, Украина, Великобритания, Швеция, Республика Корея. У целого ряда стран есть намерение вступить в «ядерный энергетический клуб» (Турция, Иран, Индонезия, Вьетнам).

Из всех действующих АЭС мира две трети работают в Северной Америке и Европе (**Рис. 3**). В Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР) многие активно развивающиеся, но ограниченные

в запасах топлива и гидроресурсов государства уделяют большое внимание национальным программам по ядерной энергетике. Из 53 строящихся энергоблоков 20 сооружается в Азии и на Дальнем Востоке. Планируется, что через 10-15 лет общее число коммерческих реакторов в АТР приблизится к 120, а в 2025 здесь будут действовать более трети всех АЭС мира. В этом регионе

Рис.3 Места размещения ядерных реакторов на планете.



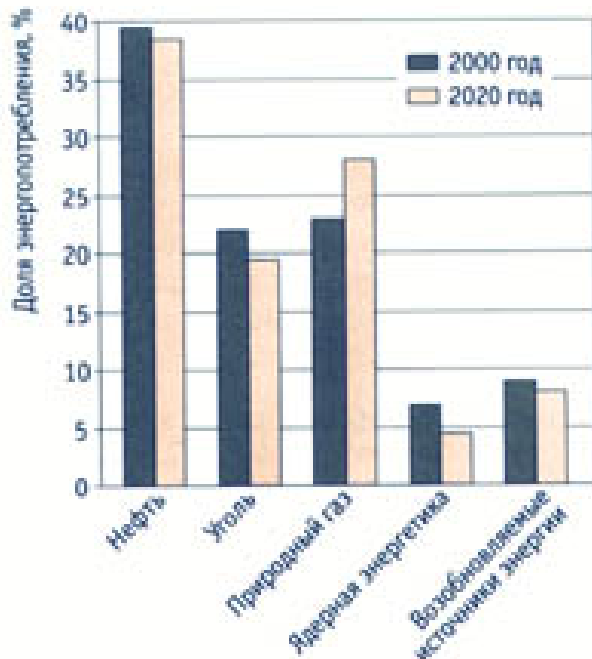
наиболее развита атомная энергетика у Японии, которая планирует построить 20 новых АЭС. Сейчас атомная энергетика дает в этой стране 30% вырабатываемого электричества, и здесь располагается 2/3 всех азиатских атомных станций. Предполагается увеличить к 2010 долю АЭС в энергобалансе страны до 43%, а количество реакторов - до 70. В Китае, несмотря на наличие богатых месторождений угля и гидроресурсов в центральной части страны, строительство АЭС признано экономически эффективным для удовлетворения растущих потребностей в электроэнергии, особенно в прибрежных районах вблизи промышленных зон. В КНР имеется 3 действующих реактора и 4 строящихся. К 2020 Китай намеревается довести суммарную мощность АЭС до 50 ГВт, что означает строительство десятков новых энергоблоков. Основное реакторное оборудование сейчас экспортируется, но Китай хочет иметь свою атомную индустрию.

4. Перспективы развития атомной энергетики

Ожидаемое к середине XXI века удвоение населения Земли, в основном за счёт развивающихся стран, и приобщение их к индустриальному развитию может привести (даже если исходить из очень низких темпов роста) к удвоению мировых потребностей в первичной и к утроению (до 6000 ГВт) в электрической энергии. Этот рост зависит от развития мировой экономики, роста населения и стремления к более справедливому и равномерному распределению энергии по регионам мира. Атомная энергетика, отвечающая требованиям крупномасштабной энергетике по безопасности и экономике, способна взять на себя существенную часть прироста мировых потребностей в топливе и энергии [~4000 ГВт (эл.)]. Развитие к середине века мировой атомной энергетике такого масштаба явилось бы радикальным средством стабилизации потребления обычных топлив и предотвращения следующих кризисных явлений:

- истощения дешёвых ресурсов углеводородных топлив и возникновение конфликтов вокруг их источников, дестабилизации мирового топливного цикла;
- достижения опасных пределов выбросов продуктов химического горения.

Тем не менее, углеводородное топливо будет продолжать служить главным источником энергии в ближайшие десятилетия. До 2020 его доля в потреблении первичных ресурсов останется на уровне 90%, потому что на него рассчитана вся инфраструктура современного производства и потребления энергии. Однако освоенные месторождения углеводородного топлива истощаются, а введение в оборот новых запасов требует все больших



инвестиционных затрат. Следствием этого должны стать постепенные изменения в инфраструктуре энергопроизводства, обусловленные как экономическими (изменения цен и их изменчивость), так и природоохранными факторами, а также дальнейшим развитием технологий новых видов топлива.

Рис.4. Эволюция структуры производства энергии в начале 21-го века

Энергетическая безопасность останется одним из ключевых факторов, определяющих политику многих стран, особенно, стран, имеющих очень скромные запасы ископаемых видов топлива. Геополитика предложения природного газа – энергоносителя, который во многих странах выбран в качестве основного на ближайшую

перспективу, вероятно, будет усложняться по мере роста потребности в производстве электроэнергии, при том же отсутствии географической корреляции спроса и предложения, которое характеризует рынок нефти. Подобная озабоченность отражается в некоторых странах в принятии подходов, которые, предлагают включение соображений энергетической безопасности в цены на энергоносители.

В последнее десятилетие большое внимание уделяется экологическим последствиям использования ископаемого топлива. И электроэнергетика, и транспорт производят существенные атмосферные выбросы, которые приводят к локальной (напр., смог), региональной (напр., кислотные дожди) и глобальной (напр., изменение климата) деградации окружающей среды и ухудшению здоровья людей. Введение глобальных ограничений на выбросы парниковых газов и региональные ограничения на другие загрязнители атмосферы серьезно повлияют на структуру мировой энергетики, и потребуют значительных дополнительных инвестиций для сдерживания темпов роста выбросов, оказывающих влияние на окружающую среду. Включение озабоченности экологическими проблемами в цены на энергоносители – важная проблема, определяющая эволюцию энергетического сектора на десятилетия вперед.

Для сохранения выбросов окиси углерода от электроэнергетики на уровне середины прошлого – начала нынешнего века, потребуется увеличение на порядок источников электроэнергии, не производящих выбросов углерода. Задача становится еще более трудной, если признать, что гидроэнергетика, которая сегодня является самым крупным источником электроэнергии, не производящим выбросов углерода, имеет очень ограниченный потенциал роста.

Существуют следующие технологические направления решения этой глобальной задачи:
 повышение эффективности производства и использования электроэнергии,
 возобновляемые технологии помимо гидроэнергетики,
 ядерные технологии (деление и синтез),

изоляция углерода (потенциально позволяющая увеличить использование угля).

Таблица 1

Общее потребление первичных энергоносителей, доля первичных энергоносителей, используемых для производства электроэнергии, и доля АЭС в потреблении первичных энергоносителей в регионах мира в 1997 г. и прогноз до 2020 г.*

Регион	1997 г.			2000 г.			2010 г.			2020 г.		
	Общее потребление, ЭДж	Для производства электроэнергии, %	Доля АЭС, %	Общее потребление, ЭДж	Для производства электроэнергии, %	Доля АЭС, %	Общее потребление, ЭДж	Для производства электроэнергии, %	Доля АЭС, %	Общее потребление, ЭДж	Для производства электроэнергии, %	Доля АЭС, %
Северная Америка	108,7	35,9	6,3	113 117	36 36	5,8 5,7	123 139	36 36	4,8 4,7	131 157	38 39	3,1 5,3
Латинская Америка	28,7	29,6	0,7	31 32	30 31	0,6 0,6	39 47	33 34	0,6 0,7	48 64	36 36	0,4 1
Западная Европа	62,6	41,3	12,9	64 66	42 42	13 12	68 76	44 47	12 11	72 86	45 52	8,6 11
Восточная Европа и страны бывшего СССР	54,1	30,7	4,5	54 55	31 31	5,1 5,2	61 67	32 33	4,8 5,4	75 90	34 34	3 5,2
РОССИЯ	31	31	4,1	30,4 30,4	32 32	4,6 4,6	32 34,5	36,5 36	8,0 7,9	33,3 41	43 41	12 11,5
Африка	17,2	21,5	0,7	19 19	22 22	0,7 0,7	25 28	23 23	0,5 0,5	33 42	26 25	0,4 0,8
Средний Восток и Южная Азия	35,6	25,7	0,2	40 42	26 26	0,2 0,3	59 71	29 29	0,4 0,5	88 122	32 32	0,5 0,7
Юго-Восточная Азия и Океания	19,6	24,3	—	21 22	25 25	— —	30 34	28 28	— 0,1	43 53	30 30	— 1
Дальний Восток	80,5	33,3	5,2	88 91	34 34	4,9 4,8	118 134	38 38	5,8 6,4	159 198	42 42	5,1 6,5
Всего в мире	406,9	33,0	5,4	430 445	33 33	5,1 5,0	524 597	35 35	4,6 4,7	648 812	37 38	3,3 4,7

* Числитель - нижняя оценка; знаменатель - верхняя оценка.

В настоящее время, видимо, нельзя сказать с уверенностью, что какое-либо из этих направлений сможет ответить на вышеописанный вызов с экономической точки зрения; скорее всего, потребуется существенный вклад нескольких направлений.

В связи с этим приобретает актуальность развитие и совершенствование сравнительной оценки риска и «внешней цены» разных видов энергопроизводства для поддержки принятия решений по изменению структуры топливно-энергетического комплекса на глобальном и региональном уровнях.

Отметим, что глобальные перспективы ядерной энергетики на ближайшее десятилетие или чуть более отдаленный период предполагают лишь небольшие изменения общего объема ядерной энергии или ядерных технологий ее производства. За прошедшие два десятилетия техническое развитие было гораздо более значительным в других областях производства электроэнергии. Это касается, в особенности, технологии комбинированного цикла на природном газе, но также технологий очистки некоторых загрязнителей, выделяющихся при использовании угля, и снижения затрат, связанных с некоторыми возобновляемыми технологиями производства электроэнергии.

Долгосрочные прогнозы мировой атомной энергетики весьма противоречивы, что отражает и отношение к ней общества, и неблагоприятную для нее конъюнктуру, а также настроения в самом ядерном сообществе после неудавшейся попытки решить все ее проблемы с ходу. В прогнозах Мирового энергетического совета доля атомной энергетики к 2050 г. в мировом энергобалансе не превысит 10%. По прогнозу Института систем энергетики (ИСЭМ СО РАН) общий вклад атомной энергетики в мировой энергетический баланс может возрасти к 2100 до 30%. Международное Энергетическое Агентство прогнозирует к 2020 снижение доли атомной энергетики в производстве электричества до ~10% при сохранении общей установленной мощности атомных энергоблоков на сегодняшнем уровне. Министерство энергетики США (EIA/DOE 1999) в качестве наиболее вероятного сценария рассматривает снижение к 2020 установленной мощности атомных энергоблоков на 10% в мире и на 25% в развитых странах. Институт энергетических исследований РАН указывает на возможность роста производства электроэнергии АЭС России с 120 млрд. кВт*ч (1999) до 160 млрд кВт*ч в 2010 и до 330 млрд кВт*ч в 2020.

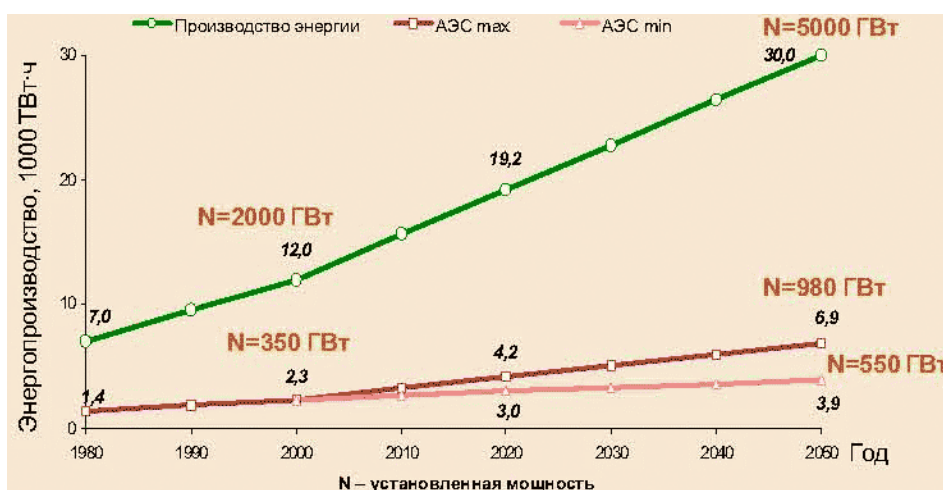


Рис.5 Прогноз развития атомной энергетики

Каждый год МАГАТЭ публикует прогнозы развития атомной энергетики — они составлены до 2030. Прогноз предусматривает увеличение на 20% выработки энергии на АЭС до 2020, но с учетом

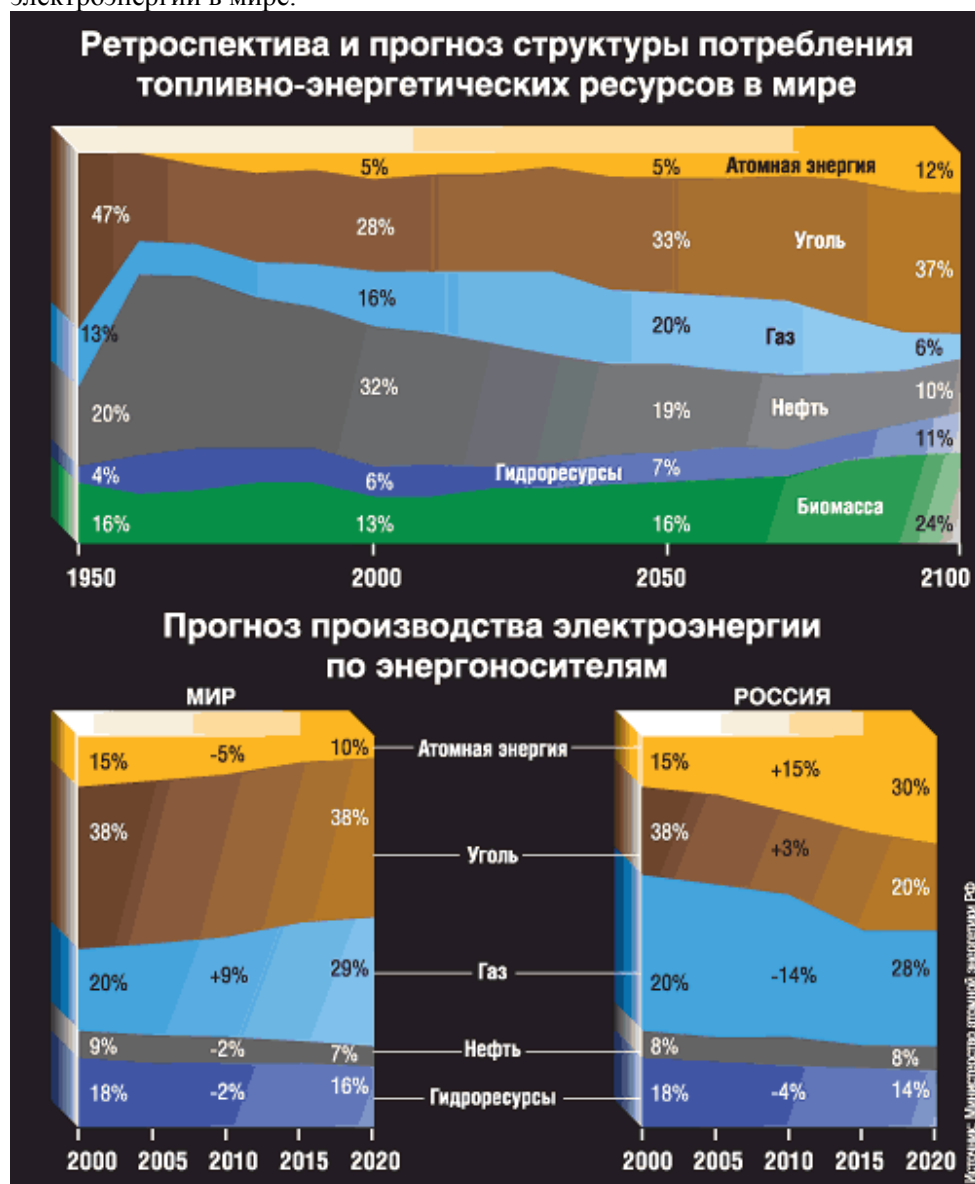
вывода из эксплуатации старых блоков к 2030 году атомная энергетика вырастет по отношению к 2002 всего на 12%. (Лучший сценарий предполагает, что к 2020 г. показатели отрасли вырастут на 46%, к 2030 — на 70%). Однако в любых сценариях доля атомной энергетики будет снижаться после 2010 до 12% в 2030 г. против 16% в 2002. Общие тенденции таковы, что производство электроэнергии в мире растет быстрее, чем ядерная энергетика. Рост сохранится на Дальнем Востоке, а самое большое снижение прогнозируется в Западной Европе. При этом Концепция развития энергетики в России предполагает ускоренное и опережающее развитие атомной энергетики.

Прогноз на начало 21-го века по развитию вклада атомной энергетики как в топливно-энергетические ресурсы, так и в электроэнергию в целом по миру положителен (см. **Рис.5 и 6**).

Хотя для развития ядерной энергетики еще необходимо решить целый ряд сложных проблем, некоторые моменты, касающиеся ядерного топливного цикла, способствуют пересмотру взгляда на будущее ядерной энергетики, так строится несколько новых энергоблоков, в США существенно улучшилась эксплуатация станций (коэффициент использования мощностей

превысил 85%). Цены на электроэнергию, вырабатываемую на грамотно управляемых станциях, конкурентоспособны по сравнению с ценами на энергию станций, работающих на ископаемом топливе. Кроме того, в долгосрочной перспективе производство водорода и/или опреснение морской воды с помощью технологии высокотемпературных ядерных реакторов позволит избежать импорта миллиардов баррелей нефти.

Рис.6. Современное состояние и прогноз топливо энергетических ресурсов и производства электроэнергии в мире.



Важнейшей проблемой ядерной энергетики продолжает оставаться проблема нераспространения. Цель – не допустить, чтобы ядерная энергетика способствовала дополнительному распространению ядерного оружия. Снижение риска распространения – важный критерий выбора перспективного топливного цикла. На США и России лежит особая ответственность за сокращение накопленных в этих странах огромных запасов допускающих военное использование ядерных материалов. Как показал успешный опыт выполнения соглашения ВОУ-НОУ, ядерные индустрии обеих стран способны предложить эффективные, рыночные подходы к решению этой проблемы. Для эффективного решения проблемы снижения количества накопленных делящихся материалов требуется не только рассмотрение новых

технологических подходов, но и разработка новых институциональных рамок (таких как лизинг топлива и реакторов, контракты на поставки топлива с сопровождением “от колыбели до могилы”, создание крупных международных центров ядерного топливного цикла, обеспечение международного контроля и мониторинга этих центров).

С точки зрения перспектив атомной энергетики важное значение имеет проблема обеспечения её урановым топливом. Мировые ресурсы урана в наиболее богатых месторождениях с концентрацией металла в рудах 0,1% в настоящее время оцениваются следующим образом: разведанные – несколько более 5 млн т., потенциальные – 10 млн т. За время жизни (50 лет) тепловой реактор мощностью 1 ГВт (эл) потребляет 10 тыс. т природного урана, поэтому 10 млн т урана позволяют ввести 1000 блоков АЭС с такими реакторами, из которых 350 ГВт (эл) работают сейчас, а 650 ГВт (эл) могут быть введены в 21 веке. Поэтому в первой половине этого столетия мощности мировой атомной энергетики на тепловых реакторах, с учётом вывода из эксплуатации отработанных блоков, могут вырасти вдвое, но её вклад в производство энергии будет падать, а во второй половине века сойдёт на нет.

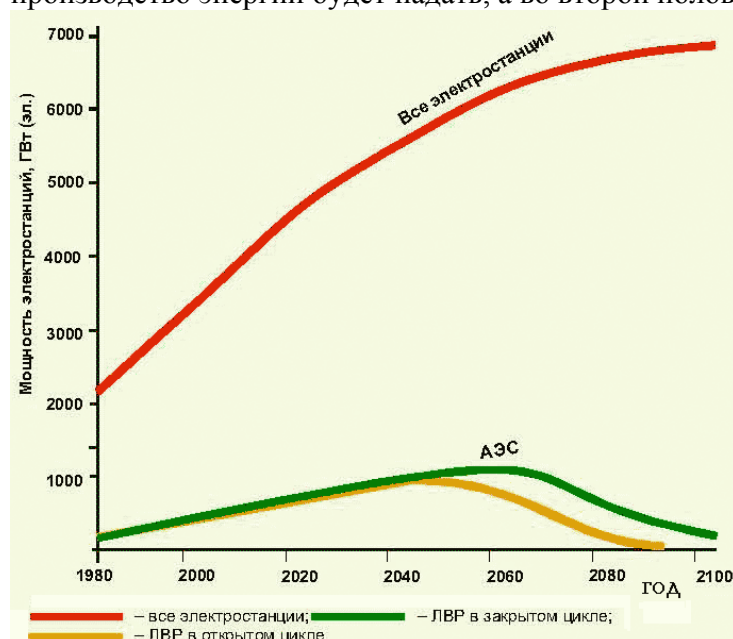


Рис.7. Топливный потенциал развития атомной энергетики на тепловых реакторах (предполагаемые запасы дешёвого урана 10 млн. т).

Ежегодная потребность современной атомной энергетики России в природном уране составляет до 3000 т, а с учётом экспортных поставок ядерного топлива 7000 т. При имеющихся ресурсах урана (залежи в недрах, складские запасы на горнодобывающих предприятиях, запасы высокообогащённого урана) срок функционирования отечественной атомной энергетики на тепловых реакторах, если оставаться на уровне мощности 20 ГВт (эл), составляет 80 лет. Замыкание топливного цикла тепловых

реакторов с вовлечением энергетического плутония и регенерированного урана продлит этот срок на 20 лет в зависимости от способа изготовления регенерированного топлива.

Таким образом, имеющиеся запасы природного урана не могут обеспечить устойчивого долговременного развития атомной энергетики на тепловых реакторах.

В быстром реакторе при коэффициенте воспроизводства равном единице или выше можно сжигать уран практически полностью. Увеличение энергетического выхода от ядерного топлива в 200 раз по сравнению с тепловым реактором, позволяет обеспечить 4000 ГВт (эл) на быстрых реакторах дешёвым ураном с запасом топлива в течение 2500 лет при малой топливной (сырьевой) составляющей затрат. Для быстрых реакторов приемлем и уран из бедных месторождений, ресурсы которого в сотни и даже в тысячи раз больше ресурсов дешёвого урана. При использовании реакторов на быстрых нейтронах устойчивое развитие атомной энергетики возможно в течение тысяч лет (см. **Рис.8**).

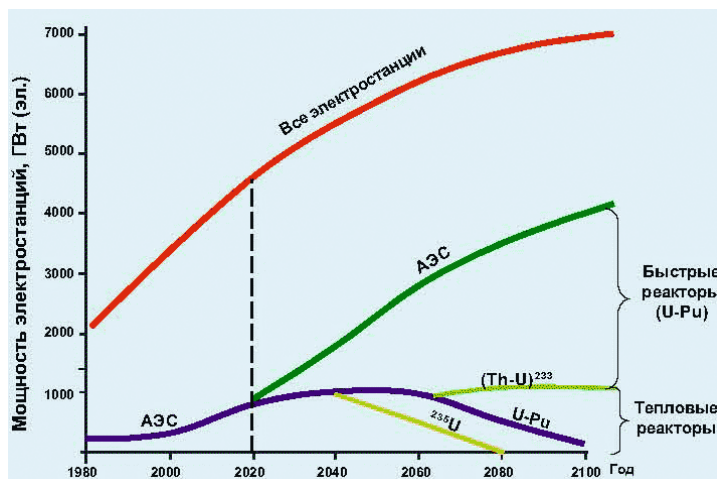


Рис.8. Топливный потенциал развития атомной энергетики на быстрых реакторах.

Рассматривая обеспечивающие меры, которые помогут реализовать крупномасштабное глобальное развитие ядерной энергетики к середине столетия полезно структурировать обсуждение, разделив 21-й век на три периода. При этом следует учесть, что другие технологии в электроэнергетике, не производящие выбросы углерода

(повышение эффективности, возобновляемые технологии, изоляция углерода, ядерный синтез), также продвинутся в течение тех же временных периодов.

Текущий период. В течение следующих приблизительно десяти лет вряд ли возможны существенные изменения либо в объеме производимой ядерными станциями электроэнергии, либо в характере технологий ее производства. Тем не менее, это крайне важный период для обеспечения увеличения числа ядерных станций с улучшенными технологиями в последующие периоды. В течение этого периода необходимо разработать и ввести в эксплуатацию проекты усовершенствованных тепловых реакторов, которые станут основой последующего периода наращивания ядерных мощностей. В течение этого периода реализуется начальная стадия утилизации оружейного плутония.

Важнейшие обеспечивающие меры этого периода: повышение эффективности работы АЭС (КИУМ, снижение эксплуатационной составляющей стоимости электроэнергии). Функционирование топливного цикла может быть улучшено в отношении технической безопасности, режима нераспространения и обращения с отходами. Например, требуют усиления нормы режима нераспространения в отношении выделенного плутония (защита, учет и контроль, снижение накопления, сокращение запасов); должны реализовываться улучшенные технологии хранения и утилизации избыточного оружейного плутония. Равным образом, для решения проблем защиты и нераспространения следует развивать международное сотрудничество в области хранения отработанного топлива. В течение этого периода должны проводиться работы по поиску новых технологических решений ядерной энергетики последующих периодов. Предполагается создание технологии замкнутого цикла, основанной на наиболее чистой, эффективной, малоотходной и устойчивой к распространению технологии. Второе направление - разработка новых видов топлива с глубоким выгоранием (топливо на основе тория, топливо в инертной матрице, микротопливо и т.п.).

Начальный период роста. В течение следующих нескольких десятилетий, до середины столетия, для того, чтобы ответить на глобальный вызов, масштабы ядерной энергетики потребуются расширить в четыре или пять раз. Вероятно, важным фактором, определяющим, будет ли это реализовано, явится реакция общества на опасность для окружающей среды обычной энергетики, и возможность реализовать привлекательность ядерной энергетики при развитии ее технологий, которые снимут сомнения населения по отношению к ядерной энергии. Видимо в этот период общая архитектура/инфраструктура топливного цикла будет весьма схожей с нынешней. Это тепловые реакторы, работающие в открытом урановом цикле, однократное использование некоторого количества выделенного плутония, утилизация избыточного военного плутония.

Важнейшие технологические направления этого периода могут включать:

усовершенствованные тепловые реакторы, отвечающие определенным потребностям или обладающие определенными очевидными преимуществами (напр., модульные

высокотемпературные реакторы, малые реакторы, графитовые реакторы с неограниченным сроком службы, производство водорода и опреснение воды и др.)

широкую международную программу, направленную на долговременную геологическую изоляцию РАО (напр., лучшее понимание транспорта радионуклидов в различных геологических средах, глубоких скважинах и т.п.). Важность программы, направленной на расширение числа вариантов геологической изоляции, состоит в том, что при значительном росте объемов ядерной энергии способы обращения с большими объемами отработанного топлива/высокорadioактивных отходов должны будут удовлетворять требованиям населения демонстрацию усовершенствованных технологий замкнутого топливного цикла

Урановые ресурсы не будут представлять большой проблемы даже при таком масштабном увеличении ядерных энергетических мощностей в первой половине века. В течение этого периода ядерная энергетика еще не исчерпает запасов приемлемого по стоимости урана, и с этой точки зрения может использоваться открытый топливный цикл, который к тому же имеет преимущества с точки зрения режима нераспространения. Однако в дальнейшем она неизбежно столкнется с ограниченностью ресурсов дешевого урана и, в особенности, с обращением с большими объемами отходов, содержащих актиниды. Поэтому этим необходимо будет создать способы увеличения ресурсов урана при разумном уровне цен, а также разработать новые топливные циклы и инфраструктуру. В этот период будут построены демонстрационные реакторы и топливные производства, основанные на новых ядерных технологиях.

Период новых технологий. Вторая половина столетия – это период, в течение которого начнется развертывание принципиально новых технологий, требующих новой инфраструктуры. При ядерной энергетике таких масштабов и при использовании традиционных тепловых реакторов она столкнется с исчерпанием запасов дешевого урана. В связи с этим придется реализовать возможности ядерной энергии по замыканию топливного цикла, сжиганию плутония, а затем, возможно, и расширенному воспроизводству топлива. В системе ядерной энергетике этого периода будут функционировать тепловые (легководные, высокотемпературные газовые, жидкосолевые) и быстрые (жидкометаллические, газовые) реакторы с замкнутым U-Pu и Th-U топливным циклом. Эти установки обеспечат долгосрочный, устойчивый топливный цикл, одновременно поддерживая высокий уровень безопасности. Однако, перед этими топливными циклами, в целом, на ряду, с технологическими проблемами стоят проблемы экономического плана и проблемы распространения ядерного оружия, которые должны решаться одновременно в целях обеспечения более раннего развертывания мощностей.

Примерный перечень направлений должен включать реакторы на быстрых нейтронах с вторичным использованием актинидов, которые являются главными кандидатами в связи с их способностью уменьшить потребности в урановых ресурсах и снизить бремя долговременного хранения высокорadioактивных отходов. Такая схема, возможно, потребует нескольких тепловых реакторов на один реактор на быстрых нейтронах, поэтому этот период может использовать результаты предыдущего периода роста без серьезных перестроек, при условии значительной предварительной работы в области планирования и международной координации.

Важнейшие обеспечивающие меры на этот период. При подготовке к периоду «новых технологий», за несколько десятилетий до его наступления, важно провести адекватный системный анализ, с тем, чтобы заниматься наиболее перспективными направлениями масштабной отрасли гражданской ядерной энергетике в условиях наличия конечных ресурсов. В самый ближайший период главное внимание следует уделить исследованию спектра представляющих интерес вариантов переработки топлива и связанных с ними топливных форм в фазе анализа и исследований, когда определяются приоритеты для последующих разработок и масштабной демонстрационной фазы. Необходимо также провести исследования усовершенствованных реакторов, оптимизированных для таких топливных циклов.

В целях обеспечения ядерного будущего необходимо будет заниматься рядом «нетехнических» вопросов. Среди них – вопросы международных институтов, принудительно

применяющих нормы режима нераспространения, роль государственных органов и частного сектора в продвижении демонстрационных проектов и развертывании передовых технологий и инфраструктуры, а также государственные механизмы принятия обязательств относительно масштабных международных проектов в области разработок и демонстрационных проектов.

В мае 2002 российскими и американскими учёными был подготовлен доклад **«От атома для мира к атому для мира и процветания»**, посвящённый Глобальному ядерному будущему.

Инициатива «Глобальное ядерное будущее» основана на целостном подходе при анализе вызовов и возможностей, характерных для второй ядерной эры. (Первая ядерная эра — период, начавшийся с выступления Президента США Д. Эйзенхауэра в 1953 г. под девизом «Атом для Мира».) Обладающие ядерным оружием страны должны поощряться к использованию излишков оборонных запасов (материалы, люди и инфраструктура) для производства энергии и содействия экономическому развитию при сохранении качества природной среды.

Приведём некоторые ключевые концепции и цели этой инициативы:

- признание взаимосвязи между энергетической безопасностью, глобальной стабильностью и климатическими изменениями;
- беспристрастное признание ведущей роли ядерной энергии в национальной и международной энергетической политике;
- поддержание высочайшего уровня безопасности и надёжности при эксплуатации ядерной энергетики в мировом масштабе;
- реализация замкнутого ядерного топливного цикла;
- предотвращение распространения ядерного оружия;
- расширение понимания и поддержки ядерной энергетики и связанных с ней технологий среди политиков и общественности;
- поощрение ядерных держав к конверсии их оборонного потенциала в производство ядерной энергии.

В мире имеется достаточно «избыточных ядерных материалов» для снабжения сотни реакторов по 3000 МВт(т) на протяжении 20 лет, то есть практически всей энергопроизводящей инфраструктуры США. В усовершенствованных реакторах использование этих материалов позволило бы предотвратить производство миллиардов тонн тепличных газов, влияющих на парниковый эффект. При применении для эффективного производства водорода (возможно, из угля) эти материалы также позволили бы избежать импорта миллиардов баррелей нефти. При рецикле эти цифры могут быть утроены.

С другой стороны, этот материал может быть использован и для создания тысяч единиц ядерного оружия. В этом и состоит парадокс: США и Россия могут либо поощрять и развивать мирное использование своих ядерных фондов на благо каждой из стран, либо вечно беспокоиться из-за их существования.

Задача может быть решена таким образом, чтобы поставки и контроль ядерных материалов, а также развитие и использование ядерных технологий могли вестись безопасным, честным и экономически эффективным образом. В долгосрочной перспективе может быть предложена идея создания ограниченного числа крупных центров ядерного топливного цикла на базе технологического опыта ведущих ядерных государств. Эти центры, подлежащие международному контролю, могли бы производить ядерное оборудование и топливо, а также реализовать лизинговые поставки и возвращать сопутствующие продукты на переработку, кондиционирование и минимизацию отходов.

Такой подход к организации глобальной ядерной инфраструктуры полностью удовлетворяет требованиям предотвращения распространения ядерного оружия при сохранении открытого доступа к ядерным энергоисточникам для всех стран мира.

5. Атомная энергетика в России

Значение развития ядерной технологии и атомной энергетики для России определяется её национальными интересами:

- ядерные технологии - основа обороноспособности России;
- атомная энергетика без ограничений со стороны дешевого и общедоступного топлива открывает новые возможности в развитии экономики России;
- крупномасштабная атомная энергетика переносит центр тяжести в энергетическом производстве с топливодобывающих отраслей и транспорта топлива на современные наукоёмкие ядерные и сопутствующие неядерные технологии, а в экспорте - с топливного сырья на продукцию этих технологий, что даст новый импульс социальному и культурному развитию России;
- развивающаяся атомная энергетика позволит избежать опасностей, связанных с истощением органического топлива и международными конфликтами из-за его источников, что будет способствовать стабилизации международной обстановки;
- вовлечение плутония из сокращаемых ядерных боеголовок и ядерного топлива (ЯТ) в сбалансированный по нему замкнутый топливный цикл быстрых реакторов будет способствовать режиму нераспространения; с переводом же в дальнейшем тепловых реакторов в торий-урановый цикл, отпадёт нужда в технологиях обогащения урана и выделения Pu или ^{233}U , что будет являться важной технологической предпосылкой к полному запрещению ядерного оружия и значительным фактором увеличения глобальной безопасности;
- способствуя безопасному экономическому и социальному развитию и сохранению среды обитания, атомная энергетика даст весомый вклад в рост продолжительности и качества жизни граждан России.



Рис.9 Распределение АЭС и НИИ ядерного профиля по территории России.

Современное распределение атомных объектов по территории России представлено на **Рис.9**. В России в 2000 году эксплуатировалось 29 ядерных энергоблоков общей установленной электрической мощностью 21,2 ГВт. В их числе 13 энергоблоков с реакторами типа - ВВЭР, 11 энергоблоков с реакторами типа РБМК, 4 энергоблока типа ЭГП Билибинской АТЭС с канальными водографитовыми реакторами и один энергоблок на быстрых нейтронах БН-600.

Россия имеет опыт эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах - БН-350 и БН-600 (безаварийная работа в течение 20 лет).

Продолжается эксплуатация в режиме энергообеспечения канальных уран-графитовых промышленных реакторов в г. Северске (Сибирская АЭС) и г. Железногорске. Кроме этого, на стадии высокой степени достройки находятся 5 энергоблоков: на Ростовской АЭС два блока с ВВЭР-1000, на Калининской АЭС ВВЭР-1000, на Балаковской АЭС ВВЭР-1000 и на Курской АЭС РБМК-1000. В 1999 г. АЭС России выработали на 16 % больше электроэнергии, чем в 1998 г. - 120 млрд. кВт*ч. Стратегия развития атомной энергетики России включает в себя появление до 2020 года следующих новых АЭС: Северо-Кавказская (4 блока), Архангельская (1), Башкирская (4), Южно-Уральская (2), Дальневосточная (2), Приморская (2). Кроме того, на существующих АЭС России будут также возводиться новые блоки: по 2 на Кольской, Калининской, Ленинградской, Смоленской, Курской, Нововоронежской, Ростовской АЭС, а также 3 на Балаковской АЭС и 1 на Белоярской АЭС. Всего 23 новых атомных реактора.

Будущее атомной энергетики России зависит от решения трёх главных задач:

- поддержание безопасного и эффективного функционирования действующих АЭС и их топливной инфраструктуры;
- постепенное замещение действующих АЭС энергоблоками повышенной безопасности (энергоблоки третьего поколения) и осуществление на их основе в последующие 20-30 лет умеренного роста мощности энергоблоков при увеличении экспортного потенциала;
- овладение в промышленных масштабах ядерной энерготехнологией, отвечающей требованиям крупномасштабной энергетики по экономике, безопасности и топливному балансу.

Остановимся теперь на основных положениях Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI века принятой в 2000 году по предложению Министерства по атомной энергии. Государственная политика России по ядерной энергетике определена Программой развития атомной энергетики РФ на 1998—2005 годы и на период до 2010 года. В ней поставлены задачи обеспечения безопасного и рентабельного функционирования ядерно-энергетического комплекса и создания усовершенствованных АЭС для строительства в следующем десятилетии.

Рост потребностей в топливе и энергии при ресурсных и экологических ограничениях традиционной энергетики делает актуальной своевременную подготовку новой энергетической технологии, способной взять на себя существенную часть прироста энергетических нужд, стабилизируя потребление органического топлива. Активные исследования новых возобновляемых источников энергии и управляемого термоядерного синтеза пока не позволяют рассматривать их в качестве способов крупномасштабного замещения традиционного топлива.

В Программе подчеркивается, что полувековое развитие атомной энергетики (АЭ) не привело пока к ядерной технологии, готовой в масштабах мировой энергетики конкурировать с традиционной энерготехнологией. Но, исходя из большого практического опыта её первого этапа, эта задача может быть решена.

Современное состояние российской энергетики характеризуются двумя особенностями:

- время дешёвых энергоресурсов в стране закончилось,
- «газовая пауза» в электроэнергетике завершилась.

К 2000 добыча нефти стабилизировалась на уровне около 300 млн т/год. Снижение нефтедобычи связано с объективным процессом качественного ухудшения сырьевой базы отрасли. Степень выработки рентабельных запасов на разрабатываемых месторождениях страны достигла 53%, в том числе в главном нефтедобывающем регионе - Западной Сибири - 43%. Основные нефтегазовые провинции вышли на поздние стадии разработки с падающей добычей. Начальный ресурсный потенциал «новых» нефтегазоносных провинций в несколько раз меньше «старых». Время открытия гигантских месторождений, за счёт которых обеспечивались приросты запасов, а издержки разведки и добычи снижались, прошло. Сегодня открываются в основном мелкие и средние месторождения, расположенные вдали от существующей

производственной инфраструктуры. Доля трудноизвлекаемых запасов достигла 60% и продолжает расти. Приросты разведанных запасов в последние годы не компенсируют текущую добычу нефти.

Базовые газовые месторождения Западной Сибири, обеспечившие в 1999 72% добычи газа в России, преждевременно вышли на стадии с падающей добычей и выработаны более чем наполовину: Медвежье — на 78%, Уренгойское — на 67%, Ямбургское — на 46%. К 2020 г. добыча газа на этих месторождениях не превысит 83 млрд м³, что составляет лишь 14% нынешней добычи в России. Вследствие превышения отборов газа над приростом разведанных запасов величина последних снижается. Для поддержания сегодняшних объёмов добычи на период до 2020 г. необходимо трёхкратное увеличение инвестиций для освоения Штокмановского и Ямальского газовых месторождений.

Для оздоровления российской экономики, которую идеология «газовой паузы» завела в «газовую ловушку», необходима интенсивная дегазификация электроэнергетики на основе атомной энергетики. Разница между затратами на замещение старых газовых ТЭС новыми АЭС может быть частично скомпенсирована за счёт увеличения экспортной выручки от продажи замещаемого таким образом газа.

Новая энергетическая политика России, основывается на следующих основных принципах энергетической безопасности:

1. **Принцип независимости от исчерпаемого ресурса:** энергетика не должна чрезмерно зависеть от какого-либо одного невозобновляемого топливного ресурса, т.е. доля газа в топливно-энергетическом балансе должна снижаться за счёт ядерного топлива и угля.
2. **Принцип постепенного роста доли возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом балансе страны:** энергетика должна постепенно освобождаться от естественной неопределённости, связанной с разведкой и добычей ископаемого топливного сырья, т.е. ископаемое топливо необходимо заместить на неисчерпаемые источники энергии и, например, на такой антропогенно-возобновляемый источник, как ядерное топливо быстрых реакторов.
3. **Принцип экологической приемлемости энергетики:** развитие ТЭК не должно сопровождаться увеличением его воздействия на окружающую среду, в частности, рост электрогенерирующих мощностей должен обеспечиваться в основном ядерными энергоблоками и возобновляемыми источниками энергии.
4. **Принцип экономии органического сырья:** использование органического топлива в электроэнергетике не должно приводить к истощению запасов органического сырья для химической промышленности и транспорта, т.е. необходим постепенный переход к крупномасштабной атомной энергетике с замещением ТЭС на АЭС с естественной безопасностью.
5. **Принцип систематического уменьшения доли сырья в экспорте топливных ресурсов:** экспорт топливных ресурсов не должен сводиться к перекачиванию относительно дешёвого ископаемого сырья за рубеж, т.е. необходимо постоянно увеличивать в экспорте долю продуктов, получаемых из топливного сырья, в т.ч. таких высокотехнологичных продуктов, как моторное и ядерное топливо.
6. **Принцип самофинансирования простого воспроизводства:** модернизация и обновление энергетического оборудования должны проводиться за счёт собственных средств энергетики, т.е. ценовая и налоговая политика государства в энергетике должна обеспечивать условия для самофинансирования простого воспроизводства всех отраслей ТЭК.
7. **Принцип экспортного финансирования замещения газа:** часть увеличения экспортной выручки от продажи газа за счёт замещения его внутреннего потребления другим топливом должна идти на развитие энерготехнологии, основанной на этом топливе, т.е. рост атомной энергетики и угольных ТЭС, замещающих газовые ТЭС, должен частично финансироваться за счёт экспорта газа.

8. **Принцип госрегулирования рыночного реформирования энергетики:** рыночное реформирование в энергетике должно сопровождаться действенным госрегулированием, т.е. возврат к директивным методам управления энергетикой не допустим, но необходимо государственное регулирование рыночных взаимоотношений в целях формирования эффективного энергетического рынка.

9. **Принцип соответствия законодательной базы России её стратегическим интересам:** законы не должны препятствовать выходу национальных предприятий ТЭКа на мировые рынки высокотехнологичных и наукоёмких товаров и услуг; необходимо снять законодательные ограничения на высокодоходные экспортные услуги по переработке и хранению облучённого ядерного топлива.

Если ориентироваться на новую энергетическую политику, то возможны следующие минимальный и максимальный вариант роста атомной энергетики до 2020 г:

Варианты роста атомной энергетики

Показатели	Минимальный вариант	Максимальный вариант
КИУМ	До 75-82 %	До 80-85%
Продление назначенного срока службы действующих атомных энергоблоков, лет	До 40, что даст до 2020 г. дополнительно более 950 млрд кВт-ч электроэнергии	До 40-50, что позволит выработать дополнительно более 2700 млрд кВт-ч электроэнергии
Вывод до 2020 г. 6,76 ГВт атомных энергоблоков	Билибинская АЭС - 1-4 бл.; Кольская АЭС -1,2 бл.; Курская АЭС-1-2 бл.; Ленинградская АЭС - 1-3 бл.; Нововоронежская АЭС – 3 - 4 бл.	Билибинская АЭС -1-4 бл.; Кольская АЭС -1-2 бл.; Курская АЭС – 1-2 бл.; Ленинградская АЭС - 1-3 бл.; Нововоронежская АЭС – 3-4 бл.
Доведение мощностей АЭС, ГВт		
в 2005 г.	До 24,2 с энергоснабжением ~ 160 млрд кВт-ч	До 25,2 с энергоснабжением -172 млрд кВт-ч
в 2010 г.	До 31,2 с энергоснабжением –205 млрд кВт-ч	До 32,0 с энергоснабжением -224 млрд кВт-ч
в 2020 г.	До 35,8 с энергоснабжением –235 млрд кВт-ч	До 50,0 с энергоснабжением -372 млрд кВт-ч
в том числе:		
до 2010 г:		
рост установленной мощности АЭС	На 10 ГВт	На 10,8 ГВт
Достройка 5 ГВт атомных энергоблоков	Ростовская АЭС – 1- 2 бл.; Курская АЭС-5 бл.; Калининская АЭС - 3 бл.; Балаковская АЭС - 5 бл.	Ростовская АЭС – 1- 2 бл.; Курская АЭС-5 бл.; Калининская АЭС - 3 бл.; Балаковская АЭС - 5 бл.;
Показатели	Минимальный вариант	Максимальный вариант
новое строительство 5-6 ГВт атомных энергоблоков	Калининская АЭС - 4 бл., Курская АЭС-6 бл.; Балаковская АЭС - 6 бл. Нововоронежская АЭС - 6 бл. Башкирская АЭС - 1 бл	Калининская АЭС - 4 бл., Курская АЭС-6 бл.; Балаковская АЭС - 6 бл. Нововоронежская АЭС - 6 бл. Башкирская АЭС -1 бл.; Южно-Уральская АЭС - 1 бл.
до 2020 г:		
Замещение 6, 8 ГВт атомных энергоблоков	Белоярская АЭС - 4 бл.; Ленинградская АЭС-2 -1-3 бл.; Курская АЭС-2 - 1-2 бл.; Нововоронежская АЭС - 7 бл.	Белоярская АЭС - 4 бл.; Ленинградская АЭС-2 - 1-3 бл.; Курская АЭС-2 - 1-2 бл.; Нововоронежская АЭС - 7 бл.

рост установленной мощности АЭС, ГВт	На 4, 6:	На 18,0:
	Южно-Уральская АЭС - 1-2 бл.; Башкирская АЭС - 2 бл.; Смоленская АЭС - 4 бл.; Ленинградская АЭС-2 - 4 бл.	Южно-Уральская АЭС - 2 бл.; Башкирская АЭС - 2-4 бл.; Смоленская АЭС - 4 бл.; Смоленская АЭС-2 - 1, 2 бл.; Ленинградская АЭС-2 - 4 бл.; Курская АЭС-2 - 3, 4 бл.; Архангельская АТЭЦ - 1 бл. Северо-кавказская АЭС -1-4 бл.; Дальневосточная АЭС -1, 2 бл.; Приморская АЭС -1, 2 бл. Кольская АЭС-2 - 1 бл.
Основные задачи		
	Продление назначенного срока службы ядерных энергоблоков на 10 лет и строительство новых АЭС с целью умеренного замещения газа и нефти в электроэнергетике.	Продление назначенного срока службы ядерных энергоблоков на 10-20 лет и строительство новых АЭС с целью умеренного замещения газа и нефти в электроэнергетике.

КИУМ – коэффициент использования установленной мощности.

В пользу таких вариантов развития атомной энергетики говорят следующие обстоятельства:

- резервы урана и промышленной инфраструктуры атомной энергетики достаточны для четырех кратного увеличения существующих мощностей АЭС;
- тенденция к сокращению (до 10 млрд м³ в год до 2002 г.) использования природного газа в теплоэнергетике, которого сегодня в Европейской части России сжигается более 30 млрд м³ ежегодно;
- цена ядерного топлива на внутреннем рынке ниже мировой в ~3 раза, а газа — в ~6 раз; если исходить из самофинансирования только топливных отраслей, оставляя цены остальных издержек на прежнем уровне, то при переходе на мировые цены на топливо, цена электроэнергии АЭС возрастёт в ~1,5 раза, а газовой ТЭС - в ~4 раза при увеличении топливных составляющих с ~20 до ~40% и с ~60 до ~90%;
- к 2010 г. в Европейской части России 12 ГВт тепловые электростанции исчерпают свой физический ресурс и могут быть замещены АЭС;
- имеются строительные заделы для АЭС суммарной мощностью 10 ГВт, достройка которых потребует удельных капитальных вложений 680 дол./кВт;
- в Европейской части России ТЭС на угле имеют большие капитальные затраты, чем АЭС, кроме того для новых угольных ТЭС потребуются существенные дополнительные затраты на строительство шахт и транспортировку угля по железной дороге;
- при удельных инвестициях ниже 950 дол./кВт строительство АЭС в Европейской части России выгоднее, чем строительство ТЭС с ПГУ с учётом инвестиций в добычу, транспортировку и строительство подземных хранилищ газа;
- есть готовый проект АЭС с отечественным оборудованием, для реализации которого достаточно удельных вложений около 900 дол./кВт.

В пользу максимального варианта роста атомной энергетики говорит то стратегически важное обстоятельство, что для Европейской части России из «газовой ловушки» есть только один «ядерный выход».

В крупномасштабной ядерной энергетике будущего могут найти свое место различные типы реакторов на тепловых нейтронах при доминирующей роли реакторов на быстрых нейтронах.

Программа развития ядерной энергетики до 2010 г. предусматривает:

1. Рост установленной мощности атомной энергетики до 30-32 ГВт и поддержание её в безопасном состоянии:

- безопасная и эффективная эксплуатация действующих энергоблоков, при доведении коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) до ~75—82%;
- снижение эксплуатационной составляющей стоимости электроэнергии;
- продление срока эксплуатации энергоблоков, выработавших проектный ресурс;

- завершение строительства энергоблоков высокой и средней готовности;
 - доведение проектов энергоблоков третьего поколения до коммерческой реализации;
 - сооружение блоков третьего поколения на имеющихся площадках;
 - завершение реконструкции завода по переработке отработанных ТВЭЛов (РТ-1), расширение хранилища отработанного ядерного топлива на заводе РТ-2, реализация первой очереди сухого хранения облученного ядерного топлива от реакторов типа РБМК на АЭС; разработка комплекса по утилизации и захоронению радиоактивных отходов.
2. Разработка программы реструктуризации и развития промышленной базы атомной энергетики.
 3. Увеличение экспортного потенциала атомной энергетики:
 - экспорт электроэнергии;
 - экспорт АЭС с реакторами третьего поколения;
 - экспорт ядерного топлива;
 - экспорт услуг по хранению и переработке ядерного топлива.

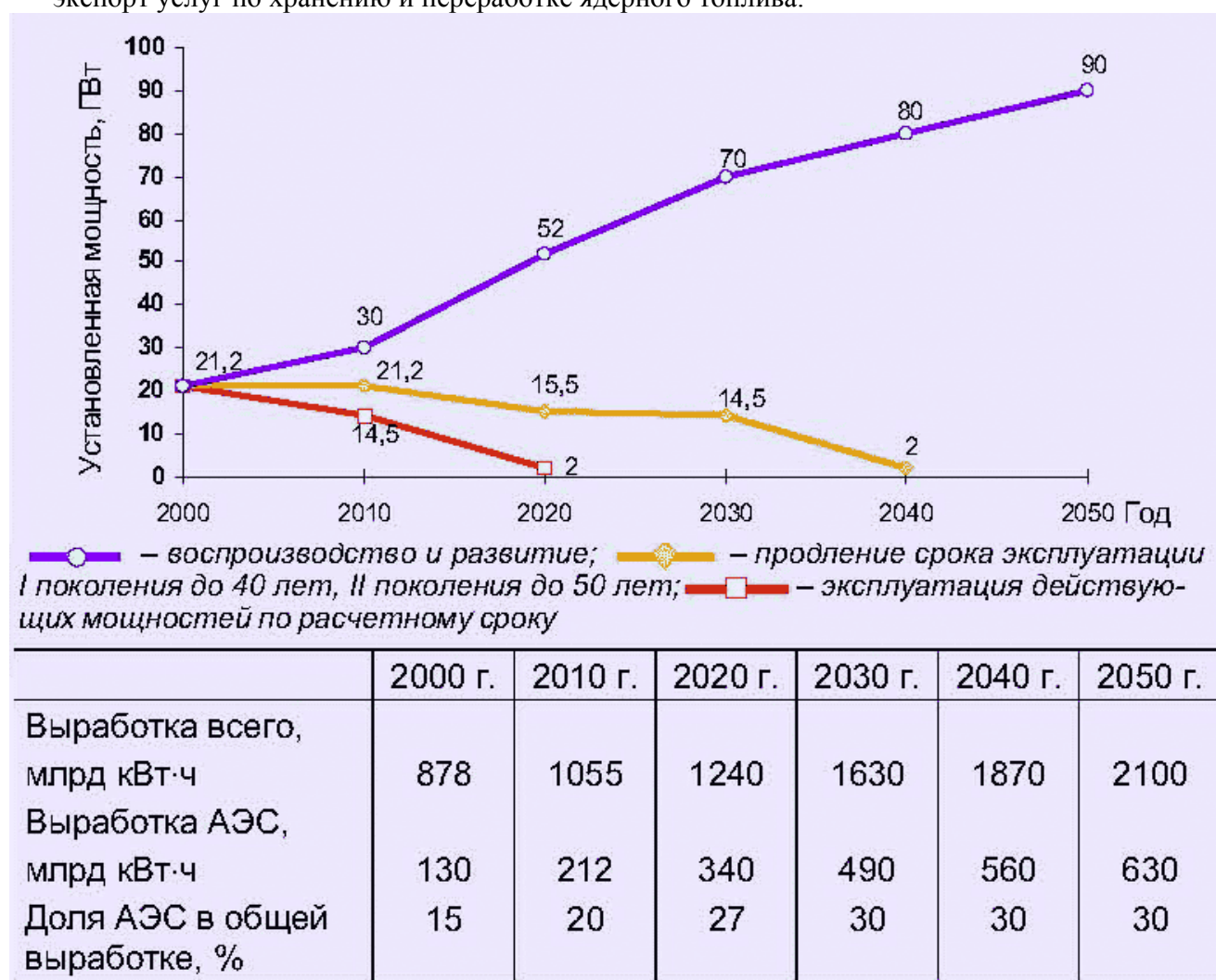


Рис.10 Развитие энергетических мощностей России до 2050.

4. Начальная стадия утилизации оружейного плутония в российских реакторах при финансировании заинтересованными странами и экспорт уран-плутоний (МОХ) топлива.
5. Сооружение АЭС с ректором на быстрых нейтронах типа БН-800, переход на нитридное топливо и коэффициент воспроизводства $K_{BA} \approx 1$.

6. Развёртывание работ по технологии замкнутого ядерного топливного цикла для широкомасштабной атомной энергетики: малоотходная переработка ядерного топлива, технологическая поддержка режима нераспространения, радиационно-эквивалентное захоронение радиоактивных отходов.
7. Разработка и сооружение демонстрационного блока АЭС с естественной безопасностью (быстрый реактор и опытные производства его топливного цикла).
8. Разработка малых ядерных энергетических установок повышенной безопасности для периферийных районов и инфраструктуры их обслуживания.
9. Участие в международном проекте по разработке и сооружению АЭС с ГТ-МГР.
10. Участие в программе строительства исследовательского термоядерного энергетического реактора.

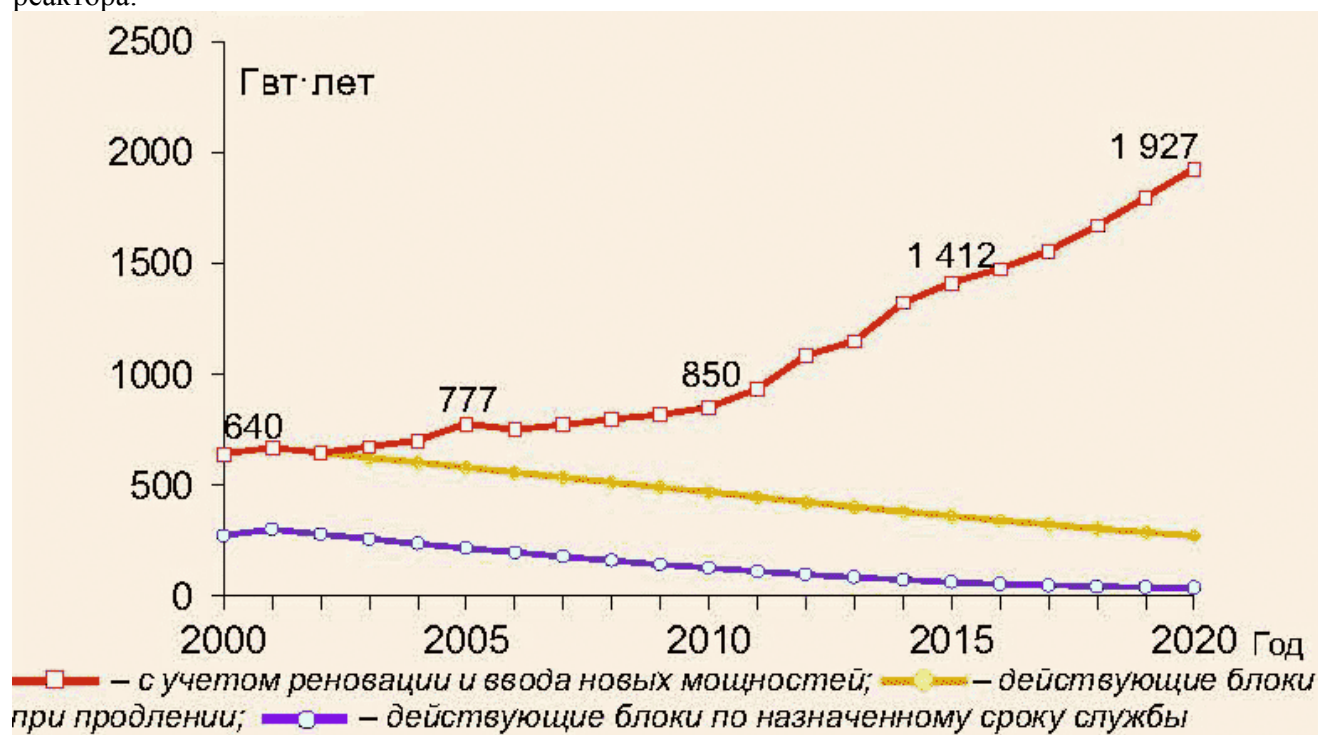


Рис.11 Ресурсный потенциал АЭС России

Программа развития до 2030 г. включает:

1. Вывод из эксплуатации и утилизацию энергоблоков первого и второго поколений и замещение их установками третьего поколения.
2. Формирование технологической базы для перехода к крупномасштабной атомной энергетике:
 - развитие радиохимического производства по переработке топлива;
 - опытная эксплуатация демонстрационного блока АЭС с быстрым реактором и опытными производствами топливного цикла с естественной безопасностью;
 - разработка и сооружение головного промышленного образца быстрого реактора с естественной безопасностью и его опытная эксплуатация;
 - разработка и сооружение при головном блоке АЭС цехов по замыканию ядерного топливного цикла с радиационно-эквивалентным захоронением РАО и с технологической поддержкой режима нераспространения;
 - разработка теплового реактора в Th-U цикле с естественной безопасностью жидкосолевого реактора с $KB \approx 1$;
 - опытная эксплуатация прототипного блока ГТ-МГР и производства топлива для него (в рамках международного проекта);

- сооружение объектов малой энергетики, включая стационарные и плавучие энергетические и опреснительные станции.

Программа развития АЭС до 2050 г. включает:

1. Создание инфраструктуры крупномасштабной атомной энергетики, ориентированной на покрытие возрастающих потребностей в производстве и экспорте электроэнергии.
2. Сооружение демонстрационного блока АЭС с тепловым реактором в Th-U цикле и его опытная эксплуатация.

Ядерная индустрия сегодня - это ядерное и термоядерное оружие, полигоны для испытания оружия, АЭС, урановые рудники, заводы по обогащению урана, заводы по изготовлению ядерного топлива и компонентов ядерного оружия, транспорт радиоактивных продуктов по стране, хранилища отработавших тепловыделяющих элементов, временные и постоянные хранилища радиоактивных отходов, возникающих от ремонтных и эксплуатационных работ, отработавшие АЭС, которые надо выводить из эксплуатации, заводы по переработке отработанного ядерного топлива и могильники для постоянного (на тысячи лет) хранения радиоактивных отходов. В каждом из компонентов производственного цикла возникают свои радиохимические задачи. Многие радиохимические проблемы гражданских и военных производств имеют общие аспекты. Ими мы и будем заниматься в данном курсе лекций.

6. Приложение. Промышленная энергетика и ее перспективы.

В последние годы перед человечеством все острее встает проблема нехватки энергии. Запасы органического топлива заканчиваются, а большинство электростанций в ближайшем будущем исчерпают свой ресурс.

На данный момент существуют следующие способы выработки электроэнергии:

1) Гидроэлектростанции. 2) Тепловые станции. 3) Установки, преобразующие энергию ветра, солнца, приливов и отливов в электрическую. 4) Атомные станции.

Рассмотрим каждый способ и оценим его перспективы в ближайшем будущем.

6.1 Гидроэлектростанции.

Этот способ выработки электроэнергии получил широкое распространение в СССР. Это можно объяснить тремя основными причинами:

- огромными территориальными ресурсами СССР.
- самой низкой себестоимостью выработанной электроэнергии. Но в себестоимость тогда не закладывался ущерб от затопления земель. Возможно, экономическая эффективность этих земель была бы намного выше, распорядись мы ими иначе.
- жесткой линией коммунистической партии в вопросе электрификации страны. Страна готовилась к третьей мировой войне. Немалая часть бюджета уходила на армию и ее вооружение. Возводились гигантские заводы, требующие огромного количества электроэнергии. Было решено, что, затопив земли мы, потеряем меньше, чем получим. А получим мы много дешевой энергии. Еще в советские времена ресурсы гидроэнергетики были практически исчерпаны. В поймах крупных рек были сооружены каскады ГЭС. Больше строить негде, разве что начать перегораживать такие реки как Москва и Яуза. В настоящее время доля ГЭС в суммарной энерговыработке России составляет примерно 30%. Мы не в состоянии обеспечить себя электроэнергией, используя одни ГЭС. Необходимо учитывать и то, что эффективность работы таких станций сильно зависит от природных явлений. Даже затопив всю Сибирь и Урал, мы все равно не обеспечим свои потребности в электроэнергии.

6.2 Тепловые станции.

Этот способ является самым распространенным и безопасным на данный момент. Он относительно дешев. Накоплен огромный опыт в области эксплуатации и проектирования тепловых станций. Но сжигание органических веществ, таких как уголь, газ, нефть, приводит к выбросам, содержащим огромное количества углекислого газа, серосодержащих кислотных газов и других вредных веществ, не говоря уже о выжигании кислорода. По оценкам экспертов запасы органического топлива закончатся через 40- 60 лет. Получается, что котлы на этих станциях нечем будет топить. Тепловые станции придется закрыть. А это около 60 % общей энерговыработки. Отсюда следует, что надо менять топливо.

6.3 Установки, преобразующие энергию ветра, солнца, приливов и отливов в электрическую.

Суммарная доля электроэнергии, полученная этими способами, меньше одного процента. Стоимость такой электроэнергии в десятки раз превышает стоимость электричества, полученного любым другим способом. В данный момент этот способ не может реально соперничать с остальными. Данные источники электроэнергии являются возобновляемыми - это, конечно, огромный плюс. Они относительно безопасны. Поэтому все природоохранные организации призывают развивать энергетику только в этом направлении. Но не надо забывать, что ветряные установки можно устанавливать не везде, а только в районах с установившейся розой ветров. Необходимо, чтобы такие районы находились далеко от жилья. Подобные устройства маломощны, следовательно, для выработки такого же количества энергии как от одной теплостанции ветряки нужно устанавливать на значительных территориях. Установлено, что в районах, где работают ветряные установки, не живут даже комары. Даже если мы покроем пятую часть земли ветряками, вдоль всего побережья установим электростанции использующие приливы, еще пятую часть суши покроем солнечными батареями, мы все равно не обеспечим потребности в электроэнергии.

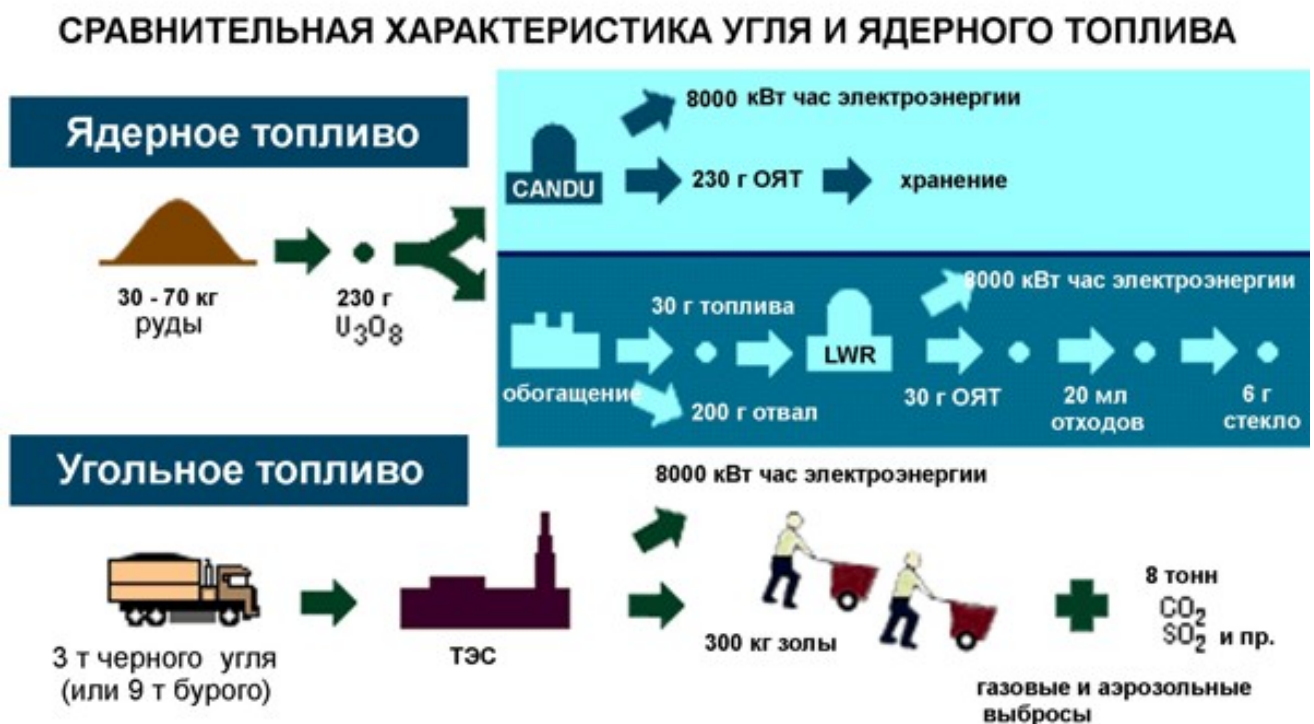


Рис.12 Сравнительная характеристика использования угля и урана в энергетике

6.4 Атомные станции.

Ядерная энергетика у большинства людей ассоциируется с ужасным словом РАДИАЦИЯ, и из-за незнания или не полного понимания, возникает чувство страха. Сразу на ум приходит авария на Чернобыльской станции. Последствия - катастрофичны. Человечество, к сожалению, еще не обладает достаточным опытом конструирования ядерных энергоустановок. Но атомные станции при нормальном режиме ничего не выбрасывают. Радиационный фон в городах при АЭС не превышает естественный. Стоимость электроэнергии АЭС дешевле энергии тепловых станций. Разведанных запасов урана хватит более чем на 2000 лет. Это при условии использования урана в открытом топливном цикле. Если же будет реализован закрытый топливный цикл, то запас увеличивается до 10000 лет. А ведь еще есть торий. По ядерно-физическим свойствам этот материал во многом схож с ураном и уже существуют экспериментальные установки с ториевым топливным циклом. Как видно, запасы топлива и экономические показатели нас вполне удовлетворяют. Однако необходимо уделять большее внимание вопросам ядерной безопасности. Так же считаются перспективными термоядерные установки. Однако при всей общей привлекательности, еще не решен целый ряд конструктивных проблем. И даже сейчас нельзя

сказать с большой вероятностью, что эти установки будут построены. То есть, задумываясь над направлением развития энергетики, необходимо выбирать из реально существующих способов.

* * *

Прогнозы показывают, что глобальная энергосистема по-прежнему сохранит многокомпонентный характер: газ, уголь, нефть, ядерная энергия и возобновляемые источники — все внесут свой вклад в энергоснабжение. Каким образом будет удовлетворен растущий спрос на нефть и другие органические виды топлива? Сегодня пять стран Персидского залива (Саудовская Аравия — 26%, Ирак — 11, ОАЭ — 10, Иран и Кувейт — по 9%) обладают 65% доказанных мировых запасов нефти. Россия имеет 5%, а США — всего лишь 2%. К 2020 мир станет еще более зависимым от поставок нефти из одного из самых нестабильных регионов мира.

Природный газ, который сегодня является наиболее предпочтительным с точки зрения экологии органическим топливом, сконцентрирован в том же Персидском заливе (33%) и России (33%). Мировая добыча природного газа в течение всего века будет нарастать с постепенным увеличением его использования для производства синтетического топлива, а также в химической промышленности и на транспорте.

Ресурсы угля исчерпываются в гораздо меньшей степени, и, соответственно, повышение мировых цен на него будет значительно меньшим, чем на другие органические топлива. Однако влияние глобальных и региональных экологических ограничений на потребление угля будет особенно сильным. При этом уголь, сегодня непопулярный по экологическим причинам и дающий на 80% больше эмиссии углерода на сожженную единицу энергии по сравнению с природным газом, также сконцентрирован по регионам. Четыре страны (США — 25%, Россия — 16, Китай — 12 и Австралия — 9%) обладают 62% доказанных мировых запасов.

США производят и используют широкий спектр энергоисточников. Энергопроизводство в 2000 обеспечивалось за счет угля (32%), природного газа (27%), нефти (21%), ядерной энергии (11%), гидроэнергии и прочих возобновляемых источников (9%). Энергопотребление в 2000 обеспечивалось за счет несколько иного топливного набора — нефти (39%), угля (24%), природного газа (22%), ядерной энергии (8%), гидроэнергии и прочих возобновляемых источников (7%). Сырье и очищенные нефтепродукты обеспечили 89% нетто-импорта энергии и 53% потребления нефти. Около 80% энергопроизводства и 85% энергопотребления обеспечили органические виды топлива.

Российская структура производства и потребления первичной энергии существенно сдвинута в сторону природного газа (около 49%), при значительно меньшей, чем в США, доле угля (14% в производстве и 19% — в потреблении) и близкой доле нефти (33 и 22% соответственно). Ядерная энергия и возобновляемые источники (в том числе гидроэнергия) обеспечили 10% внутреннего потребления. Производство энергии в России в 2000 составляло всего 1/3 от производства США. Однако, в последнее десятилетие в США производство и потребление энергии устойчиво сокращалось, а в России наблюдался обратный процесс. Хотя в области производства энергии ситуации в США и России различны, они также содержат и общие черты. Перспективы производства углеводородов в США и России на следующий двадцатилетний период на основе существующих тенденций очень схожи для нефти (-15 и -6% соответственно), природного газа (+14 и +13%) и угля (+25 и +30%). Аналогичные тенденции существуют и в ожидаемом росте производства электроэнергии в США и России (45 и 40% соответственно), который будет обеспечен за счет значительного увеличения использования природного газа для производства электроэнергии в США и угля — в России. Обе страны нуждаются в мощном развитии ядерно-энергетических ресурсов.

Из возобновляемых источников энергии наиболее экономически приемлемым будет оставаться использование гидроэнергии, биомассы и наиболее дешевых ресурсов ветра. Однако даже при быстром росте использования нетрадиционных источников в производстве энергоресурсов на региональном уровне их доля в общемировом масштабе будет оставаться незначительной.

По мере роста цен ожидается расширение базы доказанных запасов, то есть категории запасов, которые возможно экономически оправданно извлечь при сегодняшнем уровне цен и с использованием существующих технологий. Тем не менее, если потребление нефти, природного газа и угля сохранится на уровне 2000 года, теоретически мир исчерпает доказанные запасы нефти в 2040, природного газа - в 2060, а угля - в 2230. Если же взять прогнозируемый уровень энергопотребления 2020, то теоретически в мире нефть закончится в 2030, природный газ — в 2040, а уголь — в 2160. Это предполагает, при прочих

равных условиях, сужение рынков нефти и рост цен, а также то, что еще большая часть мира станет зависимой от нестабильности в Персидском заливе.

Выводы: органическое топливо скоро закончится; строить ГЭС никто не позволит; термояда нет и не будет, нетрадиционные источники не могут удовлетворить потребности человечества в электроэнергии. Остается одно - ядерная энергетика. Хотим мы этого или нет, за мы или против - другого выхода нет.