

## КРИТИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ: ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЯДЕРНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

**В.М. Мурогов**

*МЦЯО НИЯУ МИФИ*

*115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31*



В работе сделана попытка на основании упрощенного феноменологического подхода проанализировать историю ядерной науки и техники, их противоречия и проблемы, без разрешения которых несостоятельны обсуждения сценариев полномасштабного развития ядерной энергетики (ЯЭ). Дан краткий анализ истории развития ядерных технологий в США и СССР. Рассматривается современное состояние ядерной энергетики. Для поиска выхода из наступившего кризиса в развитии ЯЭ в 2000 г. были организованы два международных проекта – ИНПРО и GIF-IV. Цель ИНПРО – определение стратегии развития и требований к будущей ядерной энергетике. Проект GIF-IV по разработке реакторов четвертого поколения для АЭС будущего направлен на создание инновационных реакторов, решающих проблемы дальнейшего развития ядерной энергетики.

В результате системного анализа рассмотрены проблемы

- дальнейшего развития ядерной энергетики в мире;
- ядерного нераспространения;
- безопасности АЭС;
- ядерных отходов;
- климата и выжигания кислорода при использовании ЯЭ;
- образования и воспитания молодых поколений специалистов атомной отрасли.

Проведенный критический анализ истории, состояния и перспектив развития ядерных технологий на современном этапе показывает, что ядерный энергетический рынок монополизировал индустрию проектирования, конструирования и строительства практически только одного типа ЯР для АЭС (95% строящихся АЭС используют водо-водяные реакторы), что обуславливает подготовку, в основном, специалистов узкого профиля для строительства и эксплуатации станций такого типа.

Достижение полномасштабного уровня развития ЯЭ, способной решить социально-экономические и экологические проблемы человечества, требует принципиально новой концепции совершенствования всех предметных областей ядерной отрасли.

**Ключевые слова:** ядерная энергетика, ядерные технологии, системный анализ ЯЭ.

### ВВЕДЕНИЕ

Если анализировать этапы развития ядерной науки и техники, определившие создание и развитие ядерного оружия и затем ядерной энергетики, то надо вернуться более чем на 100 лет назад в начало XX в. Тогда еще не был открыт нейтрон, не было прием-

© В.М. Мурогов, 2019

лемой теории строения ядра атома и даже не обсуждалась возможность цепной реакции деления ядра, но уже в 1910 г. выдающийся российский ученый Владимир Иванович Вернадский выступил в Российской Академии наук с докладом о новых ядерных силах на базе исследований радиоактивности радия. В то время были известны опыты лауреатов Нобелевской премии Марии Склодовской-Кюри и Пьера Кюри. Вернадский понимал, что открыты ядерные силы, которые в миллион раз более эффективны, чем известные химические силы. И исходя из этого предположил, что человечество вступает в новую эру, когда не будет ограничения доступа к энергии и все проблемы питания, здоровья, промышленного и социального развития будут решены [1].

Это было одним из первых предсказаний о грядущем «Золотом веке» человечества на основе научно-технологической революции. Однако позднее при открытии Радиевого института (1922 г.) он же впервые осознал весь трагический драматизм этого открытия «дверей» не только в светлое будущее, но и к возможности самоуничтожения самого человечества. В своем выступлении перед собравшимися учеными и общественными деятелями [2] он сказал:

*«Мы подходим к великому перевороту в жизни человечества, с которым не могут сравняться все им ранее пережитые. Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь как он захочет. Это может случиться в ближайшие годы, может случиться через столетие. Но ясно, что это должно быть.*

*Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, направить ее на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать ту силу, которую неизбежно должна дать ему наука?*

*Ученые не должны закрывать глаза на возможные последствия их научной работы, научного прогресса. Они должны себя чувствовать ответственными за все последствия их открытий. Они должны связать свою работу с лучшей организацией всего человечества».*

### **ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. КРАТКИЙ АНАЛИЗ**

В декабре 1942 г. коллективом под руководством итальянского ученого лауреата Нобелевской премии по физике Энрико Ферми был запущен первый в мире уран-графитовый ядерный реактор (CP-1, Chicago Pile 1) на природном уране. Затем этот реактор был разобран и перенесен в Аргонскую Национальную лабораторию (ANL), созданную в США, под названием CP-2. Через два года в 1944 г. в США в ANL запустили первый в мире «тяжеловодный «реактор» CP-3 на природном уране. Эти два типа ядерных реакторов на природном уране стали основой развития индустрии наработки плутония. Параллельно успешно развивалась технология обогащения урана. Эти две технологии позволили перейти к созданию ядерного оружия [3].

В июле 1945 г. США взорвали первую ядерную бомбу – плутониевую. Этот взрыв «Тринити» считается началом ядерной эпохи. Следующие две ядерные бомбы (урановая и плутониевая) были взорваны над Японией.

Успешное испытание ядерного оружия сконцентрировало усилия ученых, инженеров и технологов стран-союзников над основной приоритетной государственной задачей их выживания – на создании арсеналов ядерного оружия и средств его доставки.

Развитие ядерной энергетики и наступление «Золотого века» энергетического благополучия ушло на 10 лет на «обочину» государственного научно-технического прогресса.

29 августа 1949 г. в 7:00 по местному времени на Семипалатинском полигоне был взорван первый советский ядерный заряд РДС-1.

В решение атомной проблемы необходимо было вовлечь специалистов самых различных областей науки и техники – металлургов, механиков, химиков, биологов, текстильщиков и специалистов по стеклу. Проблема была комплексной, и ее можно было решить только путем объединения максимального числа людей, наиболее сведущих в области науки и техники. На решение этой сложной важной проблемы в СССР были брошены все силы страны и созданы все необходимые условия. Одновременно был заложен фундамент – инфраструктура ядерной отрасли, послужившая основой дальнейшего ядерного развития страны.

Таким образом, задача создания ядерного оружия в СССР и ликвидации ядерной монополии США была, в принципе, решена. В дальнейшем за время «холодной войны» в результате ядерной гонки вооружений в мире было проведено более 1500 ядерных испытаний и суммарно создано в США и СССР более 85000 ядерных зарядов.

Одновременно в США и СССР решалась проблема доставки ядерного оружия. Огромные средства (материальные, технические и финансовые) были затрачены на создание более 500 атомных подводных лодок (АПЛ), оснащенные примерно 1000 ядерных реакторов и ракетами, несущими ядерные заряды. Число государств, обладающих ядерным оружием, «ядерных держав» стало расти: вслед за США и СССР – Великобритания, Франция, Китай. Появилась опасность «расползания» ядерного оружия.

В 1954 г. Генеральная Ассамблея ООН после долгих дебатов приняла решение о создании Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) для контроля развития и использования ядерных технологий. В качестве первого практического шага было решено провести I Женевскую конференцию по мирному использованию ядерной энергии под эгидой ООН, где можно было бы обсудить пути мирного использования ядерной энергии. На этой конференции настоящий фурор произвел доклад о Первой в мире атомной станции в СССР, запущенной в 1954 г. в Обнинске (5 МВт<sub>эл</sub>), с уран-графитовым реактором, охлаждаемым водой на обогащенном уране (АМ-1).



Рис. 1. Рост мощностей АЭС в мире (по регионам) и число новых ежегодных строек АЭС [3]

В 1956 г. была пущена в Англии первая в мире коммерческая АЭС Колдер-Холл (50 МВт<sub>эл</sub>) с уран-графитовым реактором на природном уране, охлаждаемым углекислым газом. Ядерный реактор был типа MAGNOX, разработанный для производства оружейного плутония.

В 1957 г. впервые в мире была пущена АЭС Шеппингпорт (70 МВт<sub>эл</sub>) с водо-водяным реактором типа PWR (в России – типа ВВЭР). Этот тип реактора был разработан для ЯЭУ атомного подводного флота, и в настоящее время составляет основу современной ядерной энергетики.

Принципиально важным шагом стал запуск в 1946 г. в США последователями Э. Ферми первого в мире реактора на быстрых нейтронах (без замедлителя) Clementine

(СР-4) с плутониевым топливом. В качестве охлаждающей жидкости впервые использовался жидкий металл – ртуть [3].

После этого количество атомных станций по всему миру начало быстро расти (рис. 1) на «базе», созданной оружейными атомными проектами: топливная база, вся промышленная инфраструктура – от добычи урана до производства ядерного топлива и использования его в реакторе, подготовка кадров, знания и опыт специалистов.

Более того, пущенные первые в мире АЭС различного типа реально были результатом «конверсии» разработок для военных целей [3].

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

К середине 1980-х гг. в мире строилось до 40 ядерных блоков в год, и полная мощность ядерной энергетики достигла более 350 ГВт<sub>эл</sub>. Все шло прекрасно до 1979 г. – до крупнейшей аварии в истории коммерческой атомной энергетики в США на АЭС «Три-Майл-Айленд», приведшей к существенным экономическим потерям (было отменено более 200 заказов на строительство новых АЭС с самым распространенным типом реакторов – PWR). Затем в 1986 г. случилась авария на Чернобыльской АЭС, переросшая в ядерную катастрофу как с экономическими, так и глобальными социально-политическими последствиями. Прежде всего это касалось СССР, поскольку реакторы такого типа строились только в Советском Союзе. Однако резко возросло негативное отношение населения в странах Европы. Семь малых стран приняли решение о запрете развития ядерной энергетики.

В развитии ядерной энергетики к концу XX в. наступила стагнация. Начался процесс пересмотра концепции безопасности АЭС и дальнейшего развития «культуры ядерной безопасности» как одной из основ ядерной энергетики. Стало очевидной истиной высказывание генерального директора МАГАТЭ Х. Бликса «Ядерная авария где-либо – есть авария везде» [3].

Для поиска выхода из наступившего кризиса в развитии ЯЭ в 2000 г. были организованы два международных проекта – ИНПРО (INPRO) и Генерация-4 (GIF-IV) [3].

Инновационный проект ядерной энергетики ИНПРО, предложенный Россией [4], существует под эгидой МАГАТЭ и объединяет усилия специалистов развитых в ядерном отношении стран (более 40 стран). Цель ИНПРО – определение стратегии развития и требований к будущей ядерной энергетике.

Проект по разработке реакторов четвертого поколения для АЭС будущего (GIF-IV) направлен на создание инновационных реакторов, которые после 2030 г. должны решить проблемы дальнейшего развития в четырех областях ядерной энергетики: устойчивости, безопасности и надежности, экономической эффективности, нераспространения и физической защиты [5]. В настоящее время в этот проект, предложенный по инициативе США, входят 13 наиболее развитых в ядерном отношении участников – Аргентина, Бразилия, Великобритания, Евросоюз, Канада, Китай, Россия, США, Франция, Швейцария, ЮАР, Южная Корея и Япония.

Проект GIF-IV предполагает использование разработок шести основных типов реакторов:

- на быстрых нейтронах с жидкометаллическим (натриевым) охлаждением (SFR) [5];
- на быстрых нейтронах с гелиевым охлаждением (GFR) [6];
- сверхвысокотемпературный с графитовым замедлителем и гелиевым охлаждением (VHTR) [7];
- сверхкритический водоохлаждаемый (SCWR) [8];
- на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (LFR) [9];
- на расплавленных солях (MSR) [10].

К сожалению, ситуация резко усугубилась в результате самой крупной ядерной аварии уже в XXI в. Она произошла на АЭС Фукусима в 2011 г. в Японии – одной из самых развитых в промышленном и ядерном отношении стран мира.

Ядерное сообщество должно найти выход из возникшего противоречия: ядерные технологии до сих пор не привели человечество в золотой век решения энергетических проблем, но позволили создать ядерный оружейный потенциал, способный человечество уничтожить.

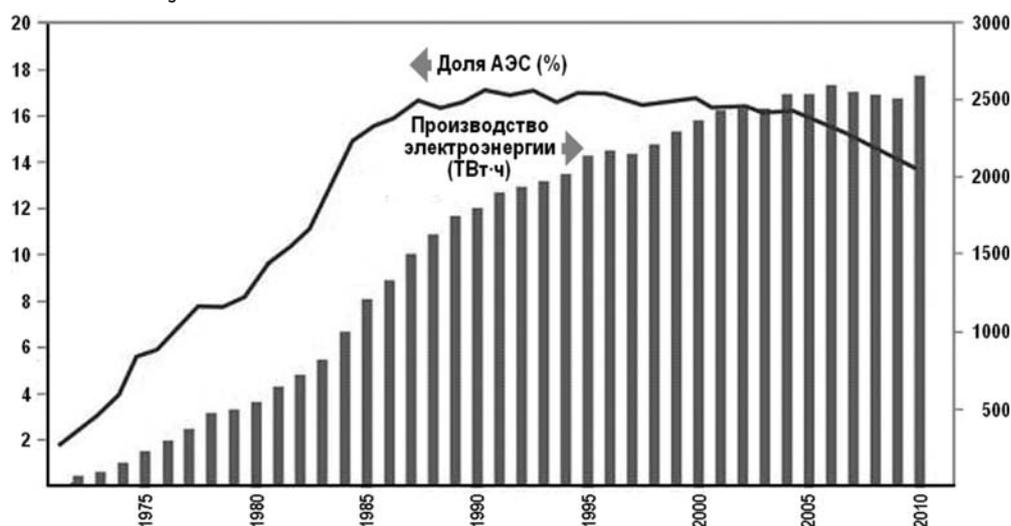


Рис. 2. Масштаб и сокращение доли АЭС в производстве электроэнергии в мире [11]

В последние годы, несмотря на строительство в мире 54 новых блоков, при ежегодном пуске до 5 – 10 блоков АЭС, вклад ЯЭ в выработку как электроэнергии (сейчас около 11%), так и в полный энергетический баланс (сейчас около 5%) – сокращается. Происходит это не столько за счет снятия с эксплуатации устаревших блоков АЭС, сколько за счет более быстрого роста традиционных и альтернативных источников энергии (рис. 2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМОГО АНАЛИЗА

### Проблемы дальнейшего развития ядерной энергетики в мире

Подведем итог краткому поверхностному анализу истории развития ядерной науки и техники, а с другой стороны, перейдем к анализу сложившейся сегодня ситуации в ядерной энергетике (ЯЭ) и проблем, осложняющих ее дальнейшее полномасштабное развитие. При этом можно констатировать парадоксальную ситуацию – то, что считалось «пионерами-основателями» безусловным преимуществом ЯЭ превратилось в ее нерешенные проблемы.

Неограниченность топливных ресурсов ЯЭ (декларировавшаяся «пионерами») превратилась в один из главных аргументов, не позволяющих говорить о современной ЯЭ как о стабильном источнике энергии. Дело в том, что основу современной ЯЭ составляют АЭС с водо-водяными ядерными реакторами (88,5%) типа ВВЭР, PWR, BWR, использующими менее 0.5% энергетического потенциала урана, что по запасам в два – три раза меньше доступных запасов нефти (рис. 3).

Принципиальное решение этой проблемы известно. Неограниченные (практически) запасы урана становятся доступными при развитии ЯЭ с использованием реакторов-бридеров, например, реакторов на быстрых нейтронах типа БН. Как известно, первый реактор на быстрых нейтронах, охлаждаемый жидким металлом, был пущен еще на заре

развития ЯЭ – в 1946 г. в США (ANL) и в 1956 г. в СССР (БР-2, ФЭИ).

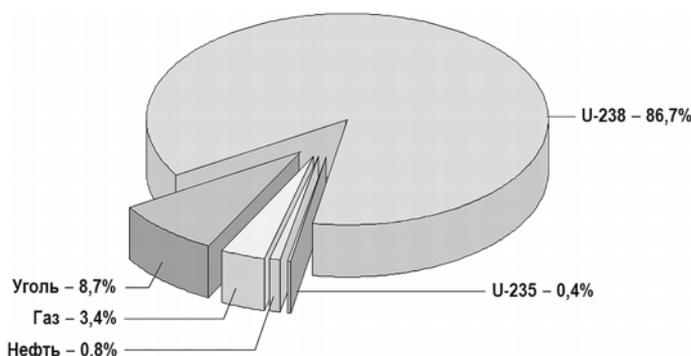


Рис. 3. Относительное энергетическое содержание природных топливных ресурсов. Потенциал традиционных энергоисточников и ЯЭ на уране [3]

Прошло более 70-ти лет разработок и исследований – сейчас в мире работают только два реактора на быстрых нейтронах (БН-600, БН-800 в России) из общего числа блоков в ЯЭ – около 450.

Работают они, в основном, на уране-235 (как и ВВЭР) и не являются бридерами, поскольку их ядерный топливный цикл (ЯТЦ) не замкнут (выделенный при переработке ОЯТ плутоний повторно в них в промышленном масштабе не используется).

Идея бридинга на основе БР и замкнутого ЯТЦ, выдвинутая Э. Ферми и восторженно встреченная его коллегами в 1944 г., на практике была реализована в начале атомной эры для увеличенной наработки оружейного плутония путем переработки ОЯТ уран-графитовых и тяжеловодных реакторов. Последовавшая затем разработка технологии ЗЯТЦ в ЯЭ для мирных целей явилась, как и в случае создания АЭС, конверсией «оружейной» технологии, созданной для наработки изотопно-чистого «оружейного» плутония. Этот неквалифицированный перенос военных идей на мирные энергетические технологии заложил основы риска «ядерного распространения».

### Проблемы дальнейшего развития ядерной энергетики в мире

Реализация замкнутого ЯТЦ в современной ЯЭ – дорогостоящая и сложная научно-техническая задача. Ее осуществление на современном этапе может привести к обострению проблемы распространения ядерноопасных материалов и технологий (рис. 4).

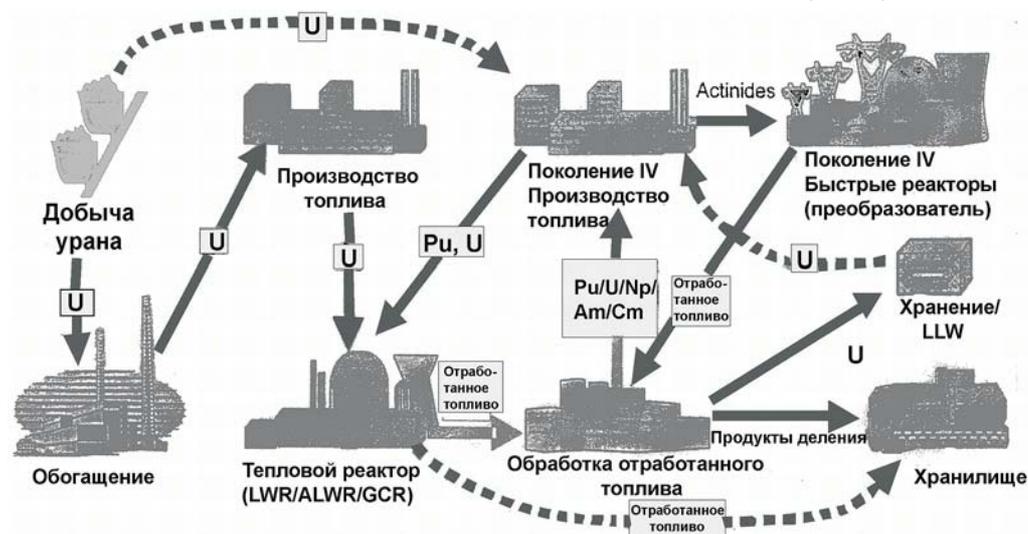


Рис. 4. Схема реализации замкнутого ядерного топливного цикла энергетики XXI в.

Дело в том, что переработка ОЯТ в замкнутом ЯТЦ приведет в рамках рассматриваемой сейчас двухкомпонентной модели развития ЯЭ дополнительно к существующей «чувствительной» технологии обогащения урана еще к одной «чувствительной» технологии – радиохимической переработке, т.е. к выделению в явном виде из «горы» облученного топлива двух потенциально опасных, с точки зрения нарушения режима нераспространения, компонентов – плутония и высокоактивных радиоактивных материалов (продуктов деления, актиноидов и др.), потенциально пригодных для создания оружия массового уничтожения (ОМУ) или «грязных» бомб [11, 12]. Поэтому следует обратить особое внимание на три фактора, влияющие на риск распространения [13]:

- увеличение масштабов ядерной энергетики (рост числа АЭС и региональных малогабаритных РУ, количества установок ЯТЦ и их номенклатуры; увеличение количества перевозок ядерных материалов и увеличение объема РАО);

- структурные изменения в производстве атомной энергетики (воспроизводство ядерного топлива с использованием БР; переработка ОЯТ, ЯТЦ, замкнутый топливный ядерный цикл);

- развитие атомной энергетики в неядерных странах, которые исторически не готовы к использованию ядерных технологий (безопасность и гарантия нераспространения).

### **Безопасность АЭС**

Полномасштабное развитие ЯЭ (стабильность, практическая неограниченность ресурсов, бридеры в замкнутом ЯТЦ, нераспространение «чувствительных» материалов, технологий и знаний) возможно только при гарантированном обеспечении ядерной и радиационной безопасности АЭС и предприятий ЯТЦ.

Анализ развития ЯЭ показал явную зависимость конкурентоспособности ЯЭ от реализации перечисленных факторов. Как известно, на начальном этапе развития ЯЭ с использованием созданной оборонной «ядерной» платформы (топливная и промышленная инфраструктура, образование и подготовка кадров) стоимость киловатта установленной мощности АЭС с водо-водяными реакторами составляла около 200 \$, современное значение – до 4000 \$ и выше. В чем основная причина такого огромного роста (кроме инфляции) – в 20 раз?

По оценке NRC (США), одно только удовлетворение возрастающих требований «инженерной» безопасности привело к ежегодному росту стоимости выработки электроэнергии атомными станциями на 10 – 12%. С учетом дополнительных «пенальти» на ЯЭ, не существующих для традиционной энергетики, «рынок» (рыночная экономика) начинает избавляться от этой неконкурентоспособной технологии. Это рационально с точки зрения рынка. Но в действительности практическое использование ядерной энергии начиналось как важнейшая государственная задача. И именно так продолжается в области ядерного вооружения. А ЯЭ передали на откуп рынку [11].

### **Проблема ядерных отходов**

На начальном этапе развития мирного использования ЯЭ считалось, что ядерные отходы дают преимущество ЯЭ в силу их высокой концентрации, ограниченности по объему (с возможностью строгого контроля, учета и изоляции) и постепенного радиоактивного распада.

Но присутствие долгоживущих высокоактивных осколков и актиноидов (в первую очередь, плутония) требует долговременного контролируемого захоронением радиоактивных отходов (на сотни тысяч и миллионы лет), что не имеет аналогов в истории человечества. Не случайно в МАГАТЭ создана и развивается приоритетная программа сохранения ядерных знаний для следующих поколений, в том числе для уникального долговременного сохранения знаний по захоронению отходов.

Что касается технологии трансмутации долгоживущих высокоактивных изотопов, то для реализации этого процесса требуются специальные быстрые реакторы с большим

избытком нейтронов (так называемые быстрые реакторы-выжигатели), которые пока что существуют только на концептуальном уровне [11].

Анализ истории развития ядерной науки и техники заставляет нас задуматься над пророчеством столетней давности академика В.И. Вернадского о глобальных последствиях развития и реализации ядерной технологии.

### **Климат и выжигание кислорода – роль ЯЭ**

Развитие ядерной энергетики современного уровня встретилось с рядом проблем, препятствующих ее полномасштабному развитию до уровня, определяющего глобальное развитие энергетики.

Вызовы, стоящие перед человечеством, определяемые техногенной деятельностью, требуют именно глобальных перемен, выходящих за рамки рыночных отношений, т.е. речь идет о необходимости введения государственного регулирования в хозяйственную деятельность (включая промышленность, транспорт, сельское хозяйство).

Фактически таким первым шагом было установление под эгидой ООН международного ядерного режима (создание МАГАТЭ, NPT и т.д.). Затем последовали Киотский протокол и Парижское соглашение, налагающие определенные ограничения на техногенную деятельность государств, его подписавших.

В атмосферу периодически выбрасываются тысячи кубических километров водорода, метана и других газов, в том числе углекислого газа и водяного пара при вулканической деятельности, катастрофических пожарах и техногенной деятельности, создающих парниковый эффект на планете Земля. Водяной пар в атмосфере «секвестрируется» его постепенной конденсацией, а углекислый газ многие-многие тысячелетия «секвестрируется» в биомассе растительного мира планеты в результате реакции фотосинтеза с образованием молекулярного атмосферного кислорода – энергетической основы нашей сегодняшней цивилизации [14].

С энергетической точки зрения фотосинтез есть процесс аккумуляции световой энергии в потенциальную химическую энергию взаимодействия продуктов фотосинтеза – углеводов и кислорода атмосферы:



Наряду с широко обсуждаемой «парниковой» проблемой накопления углекислого газа, водяного пара, метана и т.д. в атмосфере защита запасов атмосферного кислорода от его промышленного потребления является сегодня приоритетной задачей в сфере регулирования взаимоотношений между человеком и природой!

Большинство промышленно развитых стран уже давно стали странами-«паразитами», у которых промышленное потребление атмосферного кислорода на их территории многократно превышает его воспроизводство (чистую первичную продукцию) растительным миром. Россия, Канада, Скандинавские страны, Австралия, Индонезия, другие страны – это «доноры», которые безвозмездно снабжают страны-«паразиты» своим окислителем – атмосферным кислородом. В странах Западной Европы промышленное использование кислорода в пять – шесть раз превосходит его «жизненное» потребление для дыхания человеком [14].

Атмосферный кислород должен в результате фотосинтеза постоянно и непрерывно восстанавливаться растениями планеты в объеме, учитывающем и его антропогенное поглощение.

Сегодня же промышленное потребление кислорода из атмосферы для сжигания органического топлива на планете приближается к  $40 \cdot 10^9$  тоннам в год и в совокупности с его годовым потреблением природой ( $\sim 165 \cdot 10^9$  т) намного превысило верхнюю границу оценки его воспроизводства природой [14]. Защита запасов атмосферного кислорода от его промышленного потребления стала приоритетной задачей в сфере регулирования взаимоотношений человека и Природы.

Глобальный экологический кризис, к которому неизбежно привело человечество широкомасштабное развитие энергетики на органическом топливе, сегодня не оставляет ему другой альтернативы для полномасштабного удовлетворения своих энергетических потребностей кроме развития безопасной и экономичной атомной энергетики [15]! Но для выполнения своей глобальной роли ядерная энергетика должна быть по масштабам сравнима с традиционной энергетикой на органическом топливе. По оценкам [16] для выполнения этой задачи установленная мощность ЯЭ должна быть к 2100 г. не ниже 10 000 ГВт<sub>эл</sub>.

Более того прогресс, связанный, например, с электрификацией транспорта, если он будет осуществляться на базе традиционных электростанций на органике, только существенно усугубит ситуацию с «парниковым» эффектом и «выжиганием» кислорода.

Международное энергетическое агентство (IEA OECD), рассматривая на Совещании высокого уровня в июле 2018 г. эту проблему в более конкретном плане, пришло к выводу, что необходимый уровень мощностей АЭС должен быть утроен к 2050 г. путем ввода дополнительно около 1000 ГВт<sub>эл</sub>, чтобы обеспечить 25% глобального значения производства электроэнергии в мире на АЭС [15]. Выход на такой уровень мощностей потребует принципиально нового уровня гарантии ядерной и радиационной безопасности, нераспространения и образования профессионалов и населения в целом.

Как известно, технологическое развитие находится в соответствии с «законом Гроша», согласно которому, «если техническая система совершенствуется на базе неизменного научно-технического принципа, то с достижением некоторого уровня ее развития стоимость новых ее моделей растет как квадрат ее эффективности» [14].

#### **Образование и воспитание**

Не менее серьезной задачей для следующих молодых поколений специалистов и общества в целом является воспитание нового менталитета, вступившего в ядерный век человечества. На итоговой Международной конференции по Договору о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) 11 мая 2010 г. совместное заявление по вопросам роли образования в области нераспространения и разоружения сделал от имени 40 стран представитель Японии г-н Акио Сада. В этом заявлении прозвучали такие слова [11]:

*«Образование является императивом для содействия разоружению и нераспространению, и следовательно, для создания мира без ядерного оружия. Образование прививает знания и критическое мышление людям и отдельным личностям. Образование может повысить осведомленность общественности, в особенности будущих поколений, о трагических последствиях применения ядерного оружия. Образование может также подвигнуть людей и отдельных личностей, граждан мира внести свой вклад в дело разоружения и нераспространения».*

К сожалению, рыночные приоритеты современного индустриального этапа развития ЯЭ (по крайней мере, в ведущих странах этой отрасли – в странах-«донорах» развития ядерных технологий, в том числе и в нашей стране) не способствуют подготовке творческих критически мыслящих специалистов высокой квалификации (к чему призывает приведенная выше декларация). Рынок монополизировал индустрию проектирования, конструирования и строительства практически только одного типа ЯР для АЭС (95% строящихся АЭС используют водо-водяные реакторы), что обуславливает подготовку, в основном, специалистов узкого профиля для строительства и эксплуатации этого типа АЭС.

Можно сказать, что «ядерная» отрасль занялась **преждевременной «капитализацией» реакторной науки**, не развив ее в полной мере в слишком «младенческом» возрасте. Спешим и втискиваем ядерную энергетику в «паровозный» уровень термодинамики, получая и работая на самых низких параметрах в энергетиках [17].

Не ставя задачи будущего, не зная ответы и решения на вопросы, возникающие «задним» числом, сначала строим АЭС, а потом, когда случается, например, тяжелая

авария, пытаемся в спешке создать **технологии выхода из проблемы**. С культурой нераспространения – еще сложнее.

## ВЫВОДЫ

В 1955 г. академик П.Л. Капица писал, что нельзя без смены научно-технического принципа преобразования ядерной энергии в электрическую создать конкурентоспособные новые энергоблоки АЭС (рис. 5) [17].

Приведенные материалы, мне кажется, указывают на большое будущее ядерной энергетики даже если идти проторенным путем, беря за основу уже известный термодинамический цикл, разработанный и приспособленный для сжигания обычных горючих (уголь, нефть и пр.). Но естественно предвидеть, что далекое будущее будет за энергетическими циклами, которые будут более полно отвечать специфике получения ядерной энергии.

На всем этом поприще для ученых и инженеров открывается перспектива крупнейшей, интереснейшей и многообещающей творческой научной работы. Успешно и быстро она может быть осуществлена только при дружном участии ученых всех стран мира, работающих в самых разнообразных областях, как то в области: физики, электроники, металлургии, химии, электрохимии, тепло-техники и пр.

Я верю, что не за горами то время, когда великое открытие – ядерная энергия не будет проклинаться человечеством, но станет неотъемлемой частью нашей культуры и благосостояния, каким сейчас является электричество.

1955



Рис. 5. Фрагмент статьи Капицы П.Л. «Ядерная энергия» 1955 г. [17]

Достижение полномасштабного уровня развития ЯЭ, способной решить социально-экономические и экологические проблемы – вызовы, стоящие перед человечеством, потребует принципиально новой концепции развития ЯЭ [18] и ее ядерного топливного цикла [19]. Не менее серьезной задачей нашего общества является воспитание нового менталитета вступившего в ядерный век человечества.

## Литература

1. Вернадский В.И. Собрание сочинений. Т. 1. – М.: Наука, 2013. – Стр.504.
2. Вернадский В.И. Очерки и речи. Вып. 1. – Пг. 1922.
3. Андрианов А.А. и др. «Ядерные технологии: история, состояние, перспективы»./ – М.: НИЯУ МИФИ. 2012. 180 стр.
4. Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/publications/7202/methodology-for-the-assessment-of-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-report-of-phase-1b-first-part-of-the-international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro> (дата доступа 04.02.2019).
5. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System Электронный ресурс: <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/genivroadmap2002.pdf> (дата доступа 04.02.2019).
6. Реактор GFR. Электронный ресурс: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/reaktory-razmnozhiteli-na-bystryh-neytronah-76.html> (дата доступа 04.02.2019).
7. Реактор высокотемпературный с графитовым замедлителем и гелиевым охлаждением (VHTR) Электронный ресурс: [https://studopedia.su/16\\_20508\\_visokotemperaturniy-reaktorVHTR.html](https://studopedia.su/16_20508_visokotemperaturniy-reaktorVHTR.html) (дата доступа 04.02.2019).
8. Реактор сверхкритический водоохлаждаемый (SCWR). Электронный ресурс: <https://docplayer.ru/40919080-Reaktor-ohlazhdaemu-yu-vodoy-sverhkriticheskogo-davleniya-vver-sk-d-osnovnoy-pretendent-v-super-vver.html> (дата доступа 04.02.2019).
9. Реактор на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (LFR). Электронный ресурс: <https://tnenergy.livejournal.com/87320.html> (дата доступа 04.02.2019).

10. Реактор на расплавленных солях (MSR). Электронный ресурс: <http://www.atomic-energy.ru/video/28796> (дата доступа 04.02.2019).
11. *Murogov Victor* The History of Nuclear Science and Technology. Theses of Simplified Analysis. Электронный ресурс: [www.atominform.ru/2018/](http://www.atominform.ru/2018/) (дата доступа 04.02.2019).
12. Comparative evaluation of nuclear fuel cycles from the nuclear proliferation standpoint: illustrative material for the lecture course/ edited by V. Murogov. – Moscow: NRNU MEPHI, 2014. – 236 pp.
13. Culture of nuclear nonproliferation: multiple-author monograph/ edited by V. Murogov. – Moscow: NRNU MEPHI, 2014. – 280 pp.
14. *Болдырев В.М.* Возобновляемые источники энергии, органическое топливо и экологичная атомная энергетика. Доклад на X Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва. 25-27.05.2016.
15. IAEA meeting considers future of nuclear. World Nuclear News, July 2018.
16. *Salvatores M. et al.* How much can nuclear energy do about global warming. // Int. J. Global Energy Issues. – 2017. – Vol. 40. – No 1-2.
17. *Капица П.Л.* «Ядерная энергия», Статья, запрещенная ЦК КПСС к изданию. 1955 г.
18. *Капица П.Л.* «Эксперимент, теория, практика»//М. «Наука», 1981. Стр. 430.
19. *Башкиров Д.* Основные проблемы ЗЯТЦ и пути их преодоления. Электронный ресурс: [www.proatom.ru/](http://www.proatom.ru/); 2018. (дата доступа 04.02.2019).

Поступила в редакцию 11.02.2019 г.

**Автор**

Мурогов Виктор Михайлович, профессор, д-р техн. наук

E-mail: [VMMurogov@mephi.ru](mailto:VMMurogov@mephi.ru)

UDC 621.039.009

**CRITICAL NOTES: HISTORY, STATE, PROBLEMS AND PROSPECTS OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY**

Murogov V.M.

ICNE, NRNU MEPHI

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

This paper attempts to analyze, based on a simplified phenomenological approach, the methodology of the evolution histories of nuclear science and technology, as well as the contradictions and issues which, if not resolved, make senseless any discussions of scenarios for the full-scale evolution of nuclear power.

The paper analyzes in brief the evolution history of nuclear technologies in the USA and in the USSR. It also considers the present-day status of nuclear power. Two international projects, INPRO and GIF-IV, were initiated in 2000 to look for the way out of the crisis that had occurred in the evolution of nuclear power. INPRO aims to define the evolution strategy for and the requirements to the nuclear power of tomorrow. The GIF-IV project aiming to develop Generation IV reactors for future NPPs focuses on building innovative reactors capable to address the challenges involved in further evolution of nuclear power.

The following issues were considered as the result of the system analysis: further evolution of nuclear power internationally; nuclear nonproliferation; NPP safety; nuclear waste; climate and oxygen burning by NPP operation; education and training of younger generations of nuclear workers.

The critical analysis into the history, status and future evolution of nuclear technologies at the present-day stage shows that the nuclear energy market has monopolized the industry of designing, engineering and building practically only one type of nuclear reactors for NPPs (95%

of the NPPs under construction have water-cooled water-moderated reactors) due to which single-skilled personnel are largely trained for the construction and operation of this type of plants.

Achieving the full-scale evolution level of nuclear power capable to resolve the socio-economic and ecological issues faced by humankind requires a basically new evolution concept for all domains of nuclear industry.

**Key words:** nuclear power, nuclear technologies, system analysis of nuclear power.

#### REFERENCES

1. Vernadsky V.I. *Collected works*. Vol. 1. Moscow. Nauka Publ., 2013, 514 p. (in Russian).
2. Vernadsky V.I. *Sketches and speeches*. Issue 1. Petersburg, 1922 (in Russian).
3. Andrianov A.A., et al. *Nuclear technologies: history, state, prospects*. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2012, 180 p. (in Russian).
4. Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). Available at: <https://www.iaea.org/publications/7202/methodology-for-the-assessment-of-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-report-of-phase-1b-first-part-of-the-international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro> (accessed Feb 04, 2019).
5. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System Available at: <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/genivroadmap2002.pdf> (accessed Feb 04, 2019).
6. Reactor GFR. Available at: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/reaktory-razmnozhiteli-nabystryh-neytronah-76.html> (accessed Feb 04, 2019) (in Russian).
7. Reactor VHTR Available at: [https://studopedia.su/16\\_20508\\_visokotemperaturniy-reaktorVHTR.html](https://studopedia.su/16_20508_visokotemperaturniy-reaktorVHTR.html) (accessed Feb 04, 2019) (in Russian).
8. Reactor SCWR. Available at: <https://docplayer.ru/40919080-Reaktor-ohlazhdaemyy-vodoy-sverhkriticheskogo-davleniya-vver-skd-osnovnoy-pretendent-v-super-vver.html> (accessed Feb 04, 2019) (in Russian).
9. Reactor LFR. Available at: <https://tnenergy.livejournal.com/87320.html> (accessed Feb 04, 2019) (in Russian).
10. Reactor MSR. Available at: <http://www.atomic-energy.ru/video/28796> (accessed Feb 04, 2019) (in Russian).
11. Murogov Victor. *The History of Nuclear Science and Technology. Theses of Simplified Analysis*. Available at: [www.atominfo.ru/2018/](http://www.atominfo.ru/2018/) (accessed Feb 04, 2019) (in Russian).
12. *Comparative evaluation of nuclear fuel cycles from the nuclear proliferation standpoint: illustrative material for the lecture course*. Ed. by V. Murogov. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2014, 236 p. (in Russian).
13. *Culture of nuclear nonproliferation: multiple-author monograph*. Ed. by V. Murogov. Moscow. NRNU MEPhI, 2014, 280 p. (in Russian).
14. Boldyrev V.M. Renewables, organic fuel and eco-friendly nuclear power. The report at the X International scientific and technical conference «Safety, Efficiency and Economy of Nuclear Power». Moscow. May 25-27, 2016 (in Russian).
15. IAEA meeting considers future of nuclear. *World Nuclear News*, July 2018.
16. Salvatores M. et al. How much can nuclear energy do about global warming. *Int. J. Global Energy Issues*. 2017, v. 40, no. 1-2.
17. Kapitsa P.L. *Nuclear energy*. Article forbidden the Central Committee of the CPSU to the edition. 1955 (in Russian).
18. Kapitsa P.L. *Experiment, Theory, Practice*. Moscow. Nauka Publ., 1981, 430 p. (in Russian).
19. Bashkirov D. *Main problems of a CNFC and way of their overcoming*. Available at: [www.proatom.ru/](http://www.proatom.ru/); 2018 (accessed Feb 04, 2019) (in Russian).

#### Author

Murogov Viktor Mikhailovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: VMMurogov@mephi.ru