

УДК 621.039.5(540)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИЙСКОГО РЕАКТОРА АНWR300-LEU И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

*Н.М. Чернова, В.Э. Белостропова*

На основе прогнозов Международного энергетического агентства по мировой потребности в источниках энергии в ближайшей перспективе, обоснован вывод, что ядерная энергия станет основным вариантом, способным внести существенный вклад в удовлетворение будущих глобальных потребностей в энергии, что требует, прежде всего, надежных вариантов утилизации ядерных отходов и нераспространения ядерного оружия. На основе сравнительного анализа особенностей индийского реактора АНWR300-LEU с другими типами реакторов доказывается, что в долгосрочной перспективе ядерная энергетика с использованием замкнутого топливного уран-ториевого цикла является единственным удовлетворительным вариантом для решения большей части мировых энергетических проблем.

*Ключевые слова:* источники энергии; ядерный реактор; ториевый цикл; эффективность топливного цикла.

---

## АНWR300-LEU ИНДИЯЛЫК РЕАКТОРДУН МҮНӨЗДӨМӨСҮНӨ САЛЫШТЫРМА ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ ЖАНА ЯДРОЛУК ЭНЕРГЕТИКАНЫН ӨНҮГҮҮ КЕЛЕЧЕГИ

*Н.М. Чернова, В.Э. Белостропова*

Эл аралык энергетикалык агенттиктин жакынкы келечекте энергия булактарына дүйнөлүк муктаждык боюнча божомолунун негизинде, ядролук энергия келечекте энергияга болгон глобалдуу муктаждыктарды канааттандырууда олуттуу салым кошууга жөндөмдүү негизги вариант болуп калат деген жыйынтыкка келүүгө болот. Мунун өзү баарынан мурда ядролук калдыктарды кайра иштетүүнүн ишенимдүү варианттарын жана ядролук куралдарды жайылтпоону талап кылат. АНWR300-LEU индиялык реакторунун өзгөчөлүктөрүнө башка типтеги реакторлор менен салыштырма талдоо жүргүзүүнүн негизинде далилденгендей, узак мөөнөттүү келечекте ядролук энергетика туюк отун уран-торий циклин пайдалануу менен дүйнөлүк энергетикалык көйгөйлөрдүн көбүн чечүү үчүн жалгыз канааттандыруучу вариант болуп калат.

*Түйүндүү сөздөр:* энергия булактары; ядролук реактор; торий цикли; отун циклинин натыйжалуулугу.

---

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE INDIAN REACTOR АНWR300-LEU AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER

*N.M. Chernova, V.E. Belostropova*

Based on the International Energy Agency 's projections of the world 's energy demand in the short term, it is reasonable to conclude that nuclear energy will be the main option capable of making a significant contribution to meeting future global energy needs, which requires, above all, reliable options for nuclear waste management and non-proliferation of nuclear weapons. Based on a comparative analysis of the features of India 's АНWR300-LEU reactor with other types of reactors, it is proven that, in the long term, nuclear power using a closed fuel uranium-thorium cycle is the only satisfactory option for solving most of the world 's energy problems.

*Keywords:* energy sources; nuclear reactor; thorium cycle; fuel cycle efficiency.

За последние 30 лет мировое потребление энергетических ресурсов возросло почти в два раза, при этом в структуре мирового потребления органическое топливо составляет около 90 %. По прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА) до 2030 г. и экстраполированным данным до 2050 г. (рисунок 1) в XXI веке можно ожидать рост глобального энергопотребления. Это определяется по оценкам различных мировых экспертов, прежде всего, ростом населения на планете в 1,3–1,9 раза, а также сближением уровня потребления развитых и развивающихся стран [1].

В настоящее время ресурсы ископаемых видов топлива с приемлемыми ценами извлечения удовлетворяют прогнозируемым потребностям, но возрастающий масштаб потребления углеводородов требует расширения географии добычи и освоения нетрадиционных источников нефти и газа, что экономически неэффективно в существующих условиях.

Как следует из прогноза Международного энергетического агентства (рисунок 1), топливный баланс к 2050 г. будет содержать область «неудовлетворенного спроса», который будет являться постоянным источником международной напряженности.

Современный масштаб ядерной энергетики и ее технологический ресурс позволяют сделать вывод, что ядерная энергия станет основным вариантом, способным внести существенный вклад в удовлетворение будущих глобальных потребностей в энергии. Потребление энергии на душу населения для достижения состояния умеренно высокого уровня развития человеческого потенциала должно быть не менее 5000 кВт·ч/год. Выравнивание удельного энергопотребления в развитых и развивающихся странах потребует увеличения спроса на энергоресурсы к 2050 г. в три раза. В настоящее время в 31 стране мира эксплуатируется 190 атомных электростанций с 443 энергоблоками общей электрической мощностью около 390497 МВт. В ожидании того, что, по крайней мере, половину от неудовлетворенного спроса в энергии, необходимо будет удовлетворить с помощью атомной энергии, миру в конечном итоге может понадобиться от 3000 до 4000 ядерных энергетических реакторов различной мощности. Также стоит отметить, что большое количество этих реакторов, возможно, потребуется разместить в регионах с высокой плотностью населения. В связи с этим, на первый план выходят вопросы по обеспечению ядерной и радиационной безопасности. Кроме того, экономически приемлемые запасы урана уже сопоставимы с потребностями ядерной энергетики при прогнозируемых темпах ее развития. Поэтому особую актуальность приобретает вопрос широкого вовлечения ресурсов тория в ядерную энергетику и замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР [2]. В этой связи особый интерес вызывает опыт Индии по развитию своего ядерно-энергетического комплекса [3].

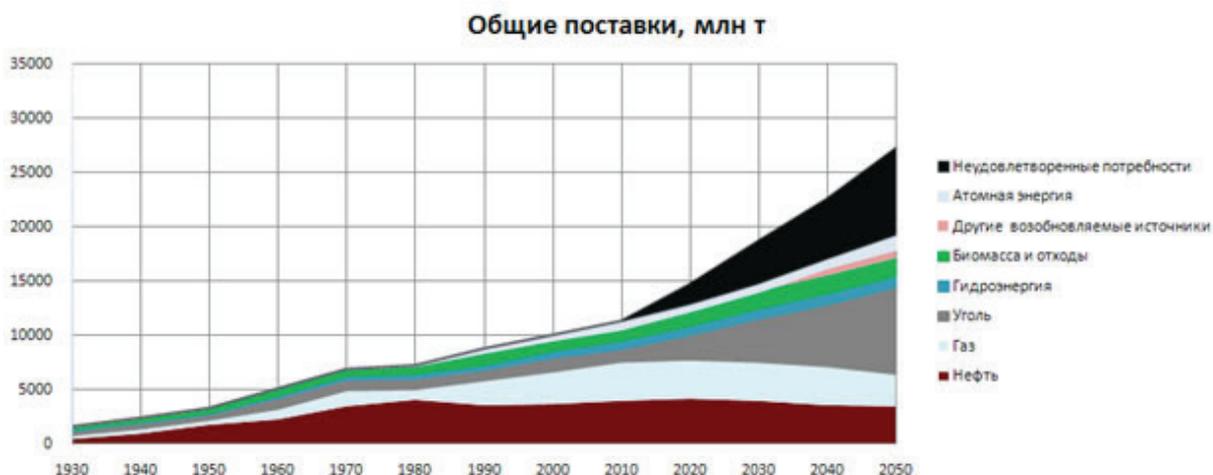


Рисунок 1 – Прогнозируемые поставки первичной энергии в млн т нефтяного эквивалента

Для Индии вовлечение тория в ядерный топливный цикл – жизненно важная задача. Эта страна практически не имеет собственных запасов урана, но при этом входит в число мировых лидеров по запасам тория. Индийская ядерно-энергетическая программа предусматривает использование замкнутого ядерного топливного цикла. Текущие уровни развертывания ядерной энергии в Индии нужно увеличить почти в сто раз, чтобы достичь таких уровней производства электроэнергии, которые обеспечат стране достижение энергетической независимости. Индийские системы ядерной энергии на основе тория разрабатывались с целью достижения устойчивости в обеспечении топливом наряду с повышенной безопасностью и уменьшением образования отходов.

Для достижения этих целей был разработан усовершенствованный реактор на тяжелой воде АНWR и его варианты.

АНWR300-LEU представляет собой тяжёловодный ториевый реактор, теплоносителем которого является кипящая лёгкая вода, замедлителем – тяжёлая вода. В реакторе используется низкообогащенный уран (LEU) в ториевой матрице. Реактор работает на топливе, состоящем из смеси урана, обогащенного до 20 %, и оксидов тория [4].

АНWR300-LEU обладает рядом особенностей, в том числе:

- использование тяжелой воды при низком давлении, что снижает вероятность утечек и позволяет убрать систему восстановления качества тяжелой воды;
- восстановление тепла, вырабатываемого в модераторе, для подогрева питательной воды;
- устранение ряда основных компонентов и оборудования, таких как насосы первичной охлаждающей жидкости и приводные двигатели;
- оборудование управления и электропитания, обеспечивающее экономию электроэнергии;
- использование кипящей воды под высоким давлением в качестве охлаждающей жидкости;
- замена парогенераторов на более простые в исполнении паровые коллекторы;
- использование пара высокого давления;
- столетний расчетный срок службы реактора.

Сравнение характеристик АНWR300-LEU с реактором на легкой воде LWR и ядерным реактором с тяжёловодным замедлителем и водным теплоносителем кипящего типа PHWR, нашедшими применение в индийской атомной энергетике, позволяет сделать следующие выводы.

1. Улучшенное использование ресурсов. АНWR300-LEU требует примерно на 5,7 % меньше добытого природного урана для того же количества произведенной энергии, по сравнению с современными легководными (LWR) ядерными реакторами. Он сконструирован для получения значительной части энергии путем деления  $^{233}\text{U}$ , полученного в результате конверсии из  $^{232}\text{Th}$ . Таким образом, в среднем около 39 % энергии получается из тория.

2. Повышенный уровень безопасности к распространению ядерного оружия, а также возможности серьезной ядерной аварии.

Плутоний из отработанного топлива АНWR300-LEU содержит ~56 % делящихся изотопов, а плутоний из отработанного топлива LWR содержит ~65 % делящихся изотопов. Доля  $^{239}\text{Pu}$  в общем плутонии составляет ~10 %, что значительно меньше, чем в современных LWR, что делает плутоний из отработанного топлива АНWR300-LEU гораздо менее привлекательным для распространения.

Реально освободиться от угрозы распространения плутония можно лишь в случае развития атомной энергетике без наработки плутония. Это возможно при переходе от уран-плутониевой к торий-урановой энергетике, при которой делящийся материал  $^{233}\text{U}$  нарабатывается из тория по схеме, показанной на рисунке 2.

Наряду с синтезом  $^{233}\text{U}$  в уран-ториевом реакторе сразу по нескольким каналам идет синтез малых количеств  $^{232}\text{U}$ . Этот изотоп характеризуется интенсивным жестким гамма-излучением дочерних продуктов радиоактивного распада, что исключает возможность проведения какие-либо операций с  $^{232}\text{U}$  в лабораторных боксах, подобно работам с  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$  [5]. Это гарантирует невозможность



использования  $^{233}\text{U}$ , нарабатываемого в реакторе для создания ядерных зарядов без предварительного отделения изотопа  $^{232}\text{U}$ , что практически невозможно. Таким образом, синтезированный в торий-урановом цикле делящийся материал  $^{233}\text{U}$  с примесью  $^{232}\text{U}$  не может стать реальным компонентом ядерного оружия террористов, но усложняет радиационную защиту производства.

При использовании ториевого топлива не может произойти неконтролируемая цепная реакция, т. к. для этого нужен значительный запас реактивности, которого у тория нет. Следовательно, ни ошибки операторов, ни разрушение аппаратуры не могут привести к серьезным авариям.

3. Снижение нагрузки на окружающую среду благодаря уменьшению образования отходов. При работе реактора на урановом топливе образуются такие радиоактивные элементы как  $^{237}\text{Np}$ , изотопы америция  $^{241}\text{Am}$  и изотопы кюрия  $^{242}\text{Cm}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ , называемые минорными актиноидами (МА) (рисунки 3) [6].

Данные элементы являются мощными гамма-излучателями. Период полураспада минорных актиноидов, который составляет тысячи лет, является основной проблемой в атомной энергетике, поскольку при работе реакторов на урановом топливе через несколько десятков лет образуется огромное количество отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Проблемы хранения ОЯТ возникают уже сейчас.

По сравнению с современным LWR, для того же количества произведенной энергии, АНWR300-LEU дает на 37 % меньше второстепенных актиноидов. Это, очевидно, приведет к снижению нагрузки на требования по удалению отходов, особенно с учетом того факта, что большая часть будущих ядерных реакторов может быть развернута в странах с большим населением.

Кроме того, в реакторах LWR перезагрузка топлива происходит каждые полтора года. Торий, в отличие от урана, имеет высокий период полураспада (от 10 лет и выше), тем самым не требует частой перезагрузки и имеет большую степень выгорания, что также уменьшает проблемы с утилизацией отходов.

4. Эффективность топливного цикла. Как показано на схеме рисунка 3, при захвате теплового нейтрона изотопом  $^{233}\text{Th}$ , происходит реакция захвата и преобразования в  $^{233}\text{U}$ , который имеет превосходящие свойства при делении тепловыми нейтронами по сравнению с  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . В таблице 1 приведено сравнение ядерных свойств трех делящихся нуклидов в тепловом и быстром нейтронном спектрах [7]. Эффективное воспроизводство топлива в ториевом цикле достигается за счет минимизации паразитных нейтронов в замедлителе и в конструкционных материалах активной зоны.

Результаты анализа указывают на значительное увеличение спроса на источники энергии во всем мире, поэтому многократное увеличение роста ядерной энергетике является неизбежным. Это требует удовлетворительного технологического ответа на вызовы очень высокого уровня безопасности и надежности, высокой степени эффективности использования топлива, надежных вариантов удаления отходов и нераспространения ядерного оружия.

Результаты анализа показывают, что реактор АНWR300-LEU с топливом на основе тория решает многие из упомянутых выше проблем, и в долгосрочной перспективе ядерная энергетика с использованием замкнутого топливного уран-ториевого цикла станет единственным удовлетворительным вариантом для решения большей части энергетических проблем. Торий широко рассматривается как «топливо будущего».

#### Литература

1. Велихов Е.П. Энергетика вчера, сегодня, завтра / Е.П. Велихов, А.Ю. Гагаринский, С.А. Субботин, В.Ф. Цибульский // Бюллетень по атомной энергии. 2008. № 5/6. С. 6–9.
2. Алексеев П.Н. Место и роль тория в ядерной энергетике / П.Н. Алексеев // Инноватика и экспертиза. 2016. № 3. С. 164–174.
3. Чернова Н.М. Станет ли Индия ведущей ядерной державой мира? / Н.М. Чернова, В.Э. Белостропова // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сб. трудов межд. научн.-практ. конф. Т. 2. М.: НИЯУ МИФИ; Балаково: БИТИ НИЯУ МИФИ, 2020. С. 265–271.

4. AHWR300-LEU Advanced Heavy Water Reactor with LEU-Th MOX Fuel // Bhabha Atomic Research Centre Department of Atomic Energy Mumbai, INDIA. URL:<http://www.barc.gov.in/reactor/ahwr.pdf> (дата обращения: 10.03.2020).
5. Суглобов Д.Н. Торий-урановый топливный цикл для тепло- и электроэнергетики / Д.Н. Суглобов, Р.М. Яковлев, Б.Ф. Мясоедов // Радиохимия. 2007. Т. 49. № 5.
6. Бекман И.Н. Ядерные технологии: учебник для бакалавриата и магистратуры / И.Н. Бекман. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2018. 404 с.
7. Бекман И.Н. Плутоний / И.Н. Бекман. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 165 с.