ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, 2020 №1(34), С. 90–97

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 539.17.01

ВОЗМОЖНОСТИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИРОДНОГО УРАНА В КАЧЕСТВЕ ТОЛПИВА ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

© 2020 А.В. Гончарук

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В данной работе рассматриваются современные тенденции развития мировой энергетики. Отмечается прогресс в развитии возобновляемых источников энергии. Обозначены ключевые преимущества атомной генерации, которые во многом обуславливают значимость и перспективность этого вида энергетики для развития стран с высокими темпами роста энергопотребления. Значительная часть работы посвящена описанию специфики уранового топлива для ядерных реакторов. В частности, приведены основные показатели мировых запасов урановой руды в увязке с экономической составляющей их добычи. Кратко описаны основные нейтронно-физические процессы, протекающие в ядерном реакторе на тепловых нейтронах. В качестве альтернативы рассмотренным технологиям представлены особенности реакторов на тяжелой воде и реакторов на быстрых нейтронах. Делается упор на фундаментальные различия в видах используемого топлива и физической основе процесса протекания ядерной реакции. На основе приведенной информации строится предположение о возможных преимуществах разработки указанного технологического направления для расширения ресурсной базы атомной энергетики.

Ключевые слова: уран, быстрые нейтроны, ядерный реактор, атом, топливо, БН-800.

Поступила в редакцию 24.12.2019
После доработки 08.02.2020
Принята к публикации 12.02.2020

Атомная энергетика еще «в тренде»

Даже несмотря на выход США из парижского соглашения по климату, проблема борьбы с выбросами углекислого газа в атмосферу продолжает оставаться одной из глобальных проблем, которые объединяют все мировое сообщество. Мировое внимание к выступлению шведской активистки Греты Тунберг, крупнейшие пожары, охватившие в течение 2019 г. леса Сибири, леса Калифорнии и почти весь австралийский континент значительно укрепили позиции «зеленых». Сейчас все развитые и даже развивающиеся страны стремятся к более активному использованию экологически безопасных технологий.

Несмотря на то, что к возобновляемым источникам энергии тоже возникает много вопросов, в том числе в части их утилизации, влияния на экосистемы, низкого коэффициента полезного действия и высокой стоимости, их распространение в мире идет достаточно высокими темпами. Так, только за 2018 г. Китай ввел в эксплуатацию 20,59 ГВт мощностей ветряных станций и 44,3 ГВт солнечных [1].

Кроме возобновляемой энергетики, все большее внимание в качестве основного источника энергии уделяется газу. В частности, руководство Республики Корея в лице президента Мун Чжэ Ина, заявив о намерении постепенно отказаться от развития атомной генерации в стране, стремительно наращивает объемы импорта газа. По результатам 2017 г. страна стала 3-м крупнейшим мировым импортером сжиженного природного газа (после Японии и Китая) [2]. Также все чаще звучит и понятие «сланцевой революции». Когда добыча, так называемого, сланцевого газа станет экономически целесообразной, и ресурсная база голубого топлива значительно

увеличится, еще большее количество стран получат возможность строить свою национальную энергосистему на экологически безопасном газе.

Если для развивающихся стран наиболее простой путь повышения энерговыработки – это использование угля, то для развитых, как например Япония, США, Франция, большую роль играет атомная энергетика, которая принадлежит к «зеленым технологиям». В случае же с Китаем, как крупнейшим энергопотребителем в мире, можно наблюдать одновременное продвижение сразу всех возможных видов энергогенерации. Одно из самых значительных преимуществ атомной энергетики перед угольной состоит в удельной энергоемкости топливных ресурсов. Например, энергия деления атомов 1 кг природного урана (содержит 99,3% изотопа урана-238 и 0,7% изотопа урана-235) составляет $5{,}8 \cdot 10^{11}$Дж, что эквивалентно энергии деления 10 т. угля (антрацита) [3].

В настоящее время атомная энергетика продолжает укреплять свои позиции на энергетических рынках многих стран, хотя авария на АЭС «Фукусима» в марте 2011 года поставила ее перспективы под значительные сомнения. Аналогичные сложности возникали и после иных крупных аварий на атомных объектах – авария на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.) и авария на Три-Майл-Айленд (28 марта 1979 г.). Сейчас количество ядерных энергоблоков в мире все же непрерывно увеличивается. На начало 2020 года в мире в эксплуатации находится уже 447 реактор, ещё 52 − на стадии строительства [4].

Основа для топлива – уран и плутоний

Возможность использования того или иного элемента обуславливается целым рядом факторов. Первым критерием, разумеется, является энергетический выход. Исходя из нейтронно-физических свойств атомов, энергетически выгодными являются две реакции – слияние легких ядер (синтез) и деление тяжелых на более легкие. С ростом массового числа элемента энергия связи нуклонов в ядре уменьшается. Это объясняется увеличением кулоновских сил отталкивания между протонами в ядре. Соответствующая зависимость (так называемая, кривая Бете-Вайцзеккера) представлена на рисунке 1.

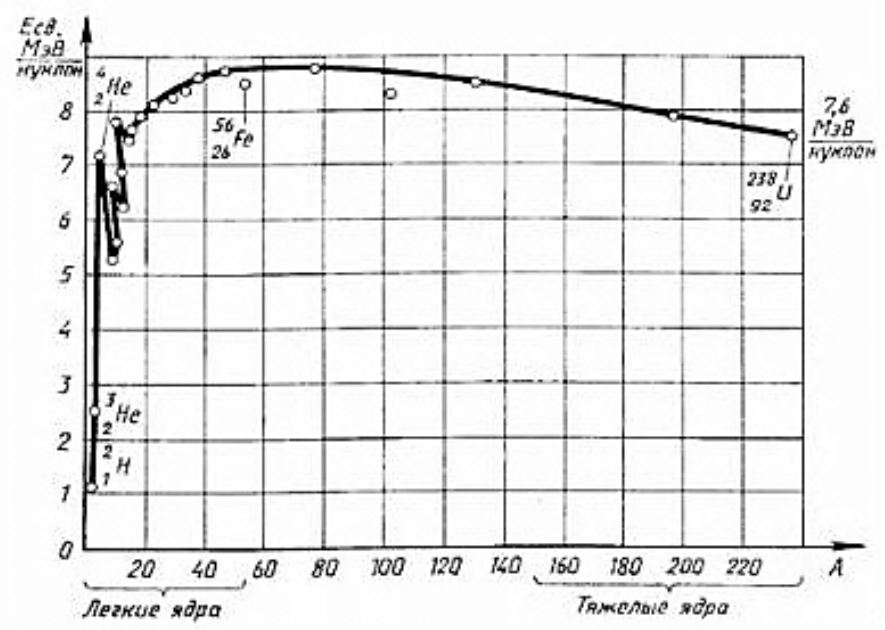

Рисунок 1 – Зависимость удельной энергии связи нуклонов в ядре от массы ядра [The dependence of the specific binding energy of nucleons in the nucleus on the its mass]

Если для слияния легких ядер нужна колоссальная энергия (термоядерный синтез), что на нынешней ступени технологического развития является слишком сложно управляемым процессом, то распад тяжелых ядер изучается с 40-х годов прошлого века и к настоящему моменту является хорошо освоенным механизмом получения энергии. Для определения способности различных элементов к поддержанию цепной ядерной реакции за счет вторичных нейтронов деления необходимо изучить целый ряд их характеристик, например период полураспада, энергию потенциального барьера, удельную энергию связи, количество вторичных нейтронов деления, сечение захвата и сечение деления на нейтронах средней и низкой энергий. По итогам анализа этих параметров для различных элементов удалось определить, что элементов, пригодных для использования в качестве топлива для ядерных реакторов не так много. В частности, под вышеназванные критерии попадают несколько изотопов урана, некоторые изотопы плутония (хоть он и не существует в природе) и изотоп тория-232. Основным топливом для всех реакторов в мире является уран.

Разведанные мировые запасы урана оцениваются в 5,5 млн. т, в том числе 1,77 млн. т со стоимостью извлечения до 40 долл./кг и 1,57 млн. т со стоимостью извлечения 40-130 долл./кг. Около 23% разведанных запасов приходится на страны СНГ (Казахстан, Узбекистан, Россию и Украину), по 22% – на страны Африки (прежде всего на Южно-Африканскую Республику, Нигер и Намибию) и Австралию (в том числе 40% запасов со стоимостью извлечения менее 40 долл./кг), 21% – на Северную Америку [5].

Более того, не вся добываемая руда пригодна для производства топлива. Для протекания ядерной реакции в реакторе на тепловых нейтронах, которыми являются почти все энергетические реакторы в мире, используется изотоп урана-235. А его содержание в природном уране достаточно невелико – всего около 0,7%. Для использования урана в качестве топлива в реакторе на тепловых нейтронах его необходимо сначала обогатить по изотопу-235 до процентного содержания в загружаемом топливе 2,5 – 5%. На примере строящейся Белорусской АЭС поясним, какое количество урана необходимо для загрузки реактора. Планируется, что начальная загрузка реактора Белорусской АЭС будет содержать 163 тепловыделяющие сборки (ТВС) со средним обогащением 2,68% по урану-235. Вес топлива в одной ТВС – 571 килограмм. Вес топливной загрузки в реактор составит около 93 тонн. Длительность работы полной топливной загрузки примерно один год. В первую перегрузку в активную зону одного реактора загружается 42 свежих ТВС. В процессе перегрузки извлекается примерно 1/4 часть топлива и загружается такое же количество свежего топлива [6].

В связи с небольшим содержанием изотопа урана-235 в урановой руде и наличии крупных резервов в настоящее время практически неиспользуемого изотопа урана-238 (содержание в руде – 99,3%) ученых всего мира долгое время озадачивал вопрос о возможности активного вовлечения всего ресурса урана в ядерно-топливный цикл. В настоящее время уже существует несколько моделей реакторов, которые достаточно успешно решают обозначенную задачу – это реакторы на тяжелой воде и реакторы на быстрых нейтронах. Но стоит отметить, что если тяжеловодные реакторы более-менее распространены и в настоящее время входя в реакторный парк таких стран, как Канада, Индия, Китай, то реакторы на быстрых нейтронах, в том числе в промышленном ключе, эксплуатируются только в России.

Физические основы реакторных технологий

И реактор на тяжелой воде, и реактор на быстрых нейтронах позволяют вовлечь в ядерно-топливный цикл природный уран, содержащий большое количество изотопа урана-238, но принцип его вовлечения, физика процесса и итоговые продукты реакции кардинально отличаются.

В ядерной реакции лишь небольшое количество нейтронов обладают низкой энергией или высокой энергией. Большинство нейтронов деления обладают средней энергий – распределение энергии вторичных нейтронов представлено на рисунке 2. Так как физически не имеется возможности нейтрон ускорить (потому что нейтрон не имеет заряда), мы можем манипулировать процессами в ядерной реакции только через замедление нейтронов путем их соударения с другими частицами.

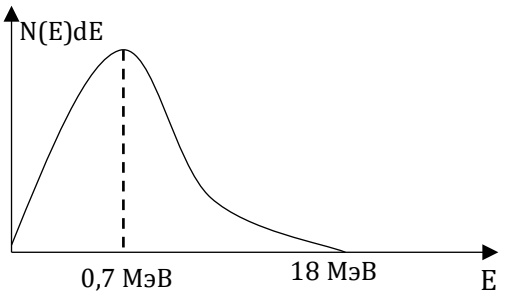

Рисунок 2 – Энергия вторичных нейтронов деления [Energy of secondary fission neutrons]

Для описания принципа работы реактора необходимо рассмотреть взаимодействие двух интересующих нас изотопов урана (235 и 238) с нейтронами различных энергий. Так, уран-238 практически не делится нейтронами низких энергий, но при этом способен делиться нейтронами с высокой энергией. В то же время уран-235 может делиться нейтронами любой энергии, но при этом значительно лучше он делится нейтронами невысокой энергии – соответствующая зависимость представлена на рисунке 3. Рассмотрим, как эти процессы протекают в реакторе на тяжелой воде и реакторе на быстрых нейтронах.

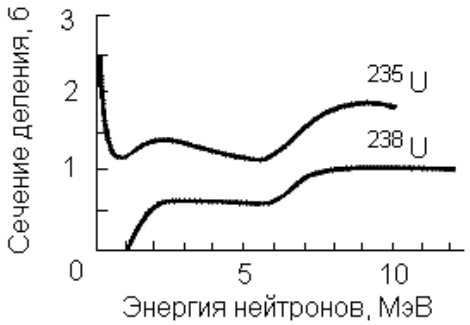

Рисунок 3 – Зависимость деления ядер урана от энергии вторичного нейтрона [The dependence of uranium nuclei fission on the secondary neutron energy]

Тяжеловодный реактор

В качестве топлива такой реактор использует природный уран с составом 99,3% по изотопу 238, 0,7% по изотопу 235. Тяжелая вода является наилучшим из известных замедлителей нейтронов (ее коэффициент замедления равен 5700, тогда как у графита – 205, у обычной воды – 61 [7]). В таком реакторе замедление нейтронов будет достаточным, чтобы уран-235 все равно поддерживал цепную ядерную реакцию. Также какая-то часть урана-238 будет делиться нейтронами высоких энергий, не успевших замедлиться, но основная реакция пойдет в уране-235.

Продуктом работы такого реактора станет, так называемый реакторный плутоний – облученное ядерное топливо с большим содержанием изотопа плутония-239. Основная часть урана-238 при захвате замедленных нейтронов вместо деления и испускания нейтронов будет превращаться в плутоний-239 [8]. Однако в связи с длительным периодом облучения топлива в энергетическом реакторе итоговый продукт

не будет являться плутонием оружейного качества. В продуктах распада будут нарабатываться также и «загрязняющие» изотопы плутоний – 238, 240, 241, которые получаются в результате захвата нейтронов ураном-235, а также последовательным захватом нейтронов уже плутониеем-239 без деления (изотопный состав плутония из различных видов реакторов представлен в таблице 1). В случае если тяжеловодный реактор перевести на режим коротких облучений (примерно 14 дней и 8 дней «долеживанье»), использовать в канальном режиме с возможностью перегрузки на ходу, то это путь к созданию реактора – наработчика оружейного плутония [9].

Таблица 1 – Изотопный состав плутония в облучённом ядерном топливе [Isotopic composition of plutonium in irradiated nuclear fuel]

Тип реактора	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
Тяжеловодный на естественном уране (3 года облучение)	0,1	67,6	25,6	5,3	1,4
Реактор с водой под давлением, обогащение около 4,4%	1,7	58	22,3	12,3	4,7
Тяжеловодный для наработки плутония	Доли %	~95	~5	Доли %	-

Вместе с тем, радиохимическая отработка облученного ядерного топлива из тяжеловодного реактора крайне сложна и не позволяет в необходимых масштабах выделять изотоп плутония-239 для его дальнейшего использования в реакторах на замедленных нейтронах (но позволяет в быстрых) или для создания ядерных взрывных устройств.

Наличие «загрязняющих» изотопов плутония создает очень высокий радиационный фон, и характеризуется высоким уровнем спонтанного деления ядер, делая ядерное взрывное устройство мало контролируемым.

В 1962 г. США провели экспериментальный подрыв устройства на основе топлива из тяжеловодного реактора, но ввиду высокой технологической сложности конструкции это направление не получило развития.

Таким образом, изотоп урана 235, содержащийся в естественной смеси урана при очень эффективном замедлении нейтронов способен поддерживать ядерную цепную реакцию, делая природный уран топливом для тяжеловодного реактора. Уран-238 также вносит ограниченный вклад в протекание реакции и получение энергии.

Реактор на быстрых нейтронах

Так как вероятность деления нейтронами высоких энергий для урана-235 невелика, то для поддержания цепной ядерной реакции за счет нейтронов высоких энергий необходимо значительно увеличить содержание урана-235 в топливе реактора. Например, в российском реакторе на быстрых нейтронах БН-800 в качестве топлива используются ТВС с обогащением по урану-235 от 18% до 24%, также частично задействованы сборки на основе МОКС-топлива [10]. Реакция в активной зоне реактора проходит без какого-либо замедления нейтронов и в основном реакция полагается на энергетический поток нейтронов высокой энергии, доля которых, как описано выше, не велика. Для отвода тепла используется жидкость, не влекущая потерю нейтронами энергии, в частности на БН-800 используется натрий.

Реактор на быстрых нейтронах позволяет осуществлять две вещи: замкнуть ядерный топливный цикл и вовлечь в цикл уран-238. Замыкание цикла происходит путем дожигания, в активной зоне быстрого реактора отработавшего ядерного топлива других реакторов, в частности ВВЭРов. В связи с тем, что процессы в зоне протекают за счет нейтронов высоких энергий, эти же самые нейтроны способны делить и

реакторный плутоний, и продукты отработавшего ядерного топлива (изотопы плутония 240, 241, урана 236, нептуния 237, америция 243, стронция 244…). Таким образом, вместо складирования в пристанционных хранилищах, остекловывания и захоронения отработавшего топлива его можно дожигать в быстрых реакторах. Разумеется, в одном цикле одного реактора возможность по сжиганию такого топлива не очень велика, поэтому для полноценного замыкания цикла необходимо создания большого количества мощностей.

Уран-238 при захвате нейтрона без деления превращается в плутоний 239, который в свою очередь благодаря высоким нейтронно-физическим свойствам (лучше, чем у урана-235) может в дальнейшем служить основной для топлива любого реактора, как напрямую, так и в смеси с оксидом урана (мокс-топливо), потому что подобно урану-235 способен делиться нейтронами любых энергий, более того, количество вторичных нейтронов деления у плутония-239 выше, чем у урана-235 (чем больше, тем лучше для протекания реакции) [11].

Конструкция быстрого реактора предусматривает, так называемую, сферу воспроизводства вокруг ядра реактора. Сфера воспроизводства предназначена для захвата вылетающих нейтронов и непосредственного участия в протекании ядерной реакции не принимает. Эта сфера состоит из ТВС с обедненным ураном, то есть ураном-238, без изотопа урана 235 [12]. По итогам протекания реакции в этих ТВС при соответствующем кратком периоде облучения уран-238 превращается в плутоний-239, расширяя топливную базу атомной энергетики.

По результатам эксплуатации быстрого реактора не создается большого количества отработавшего ядерного топлива, все топливо в значительной мере просто выгорает за счет деления нейтронами высоких энергий.

Таким образом, изотоп урана-238 используется в быстром реакторе для расширения топливно-ресурсной базы атомной энергетики и помогает нарабатывать плутоний-239 свободный от «загрязняющих» изотопов и при этом пригодный для дальнейшего использования, как в качестве топлива быстрого реактора, так и в топливе реакторов на замедленных нейтронах.

Заключение

Хотя атомная энергетика периодически сталкивается с новыми вызовами и даже вызывает значительное недоверие у широких слоев населения (как, например, в 2019 году после просмотра сериала Чернобыль), но она все же способна сыграть ключевую роль в стремлении человечества к снижению выброса углекислого газа в атмосферу и сокращении антропогенного влияния на изменения климата. Возможно, одним из крупных «трендов» 21 века является всеобщая озабоченность ресурсами планеты и поэтапным переходом на ресайклинг, то есть повторное использование материалов. Атомная энергетика с определенной точки зрения тоже способна к снижению отходов при производстве топлива и к ресайклингу – не только в рамках переработки ОЯТ, но и в процессе эксплуатации реакторов. При существующей схеме эксплуатации реакторов на тепловых нейтронах в качестве топлива в основном задействуется изотоп урана-235, тогда как основная часть добываемой руды в виде изотопа урана-238 становится своеобразным отходом производства. Однако благодаря своим нейтронно-физическим характеристикам этот изотоп также пригоден к использованию в качестве топлива для ядерных реакторов. Более того, в случае его активного вовлечения в ядерно-топливный цикл вся атомная отрасль в долгосрочной перспективе решит вопрос с ограниченной топливной базой.

Уже существующие реакторы на тяжелой воде и еще не до конца освоенные реакторы на быстрых нейтронах могут оказать всему человечеству значительную услугу в деле борьбы с экологически чистый долгосрочный источник производства

энергии. При этом если тяжеловодный реактор просто способен производить электроэнергию из топлива на основе природного урана без дополнительного процесса обогащения, то реактор на быстрых нейтронах имеет и дополнительные функциональные возможности. Он способен как нарабатывать новое топливо из изотопа урана-238, так и сжигать различные долгоживущие минорные актиниды и высокоактивные отходы. Единственный в мире промышленный реактор на быстрых нейтронах в настоящее время эксплуатируется на четвертом энергоблоке Белоярской АЭС – это уже упоминавшийся реактор БН-800 (введен в промышленную эксплуатацию 1 ноября 2016 г.). В настоящее время в России также рассматривается возможность сооружения аналогичного реактора повышенной мощности – БН-1200. Кроме того, непрерывно идут процессы по исследованию и новых видов топлива как с точки зрения устойчивости к аварийным ситуациям, повышения глубины выгорания, так и с точки зрения активного вовлечения изотопов урана-238 (например, МОКС-топливо). Вероятно, активное использование изотопа урана-238, имеющегося в природе в больших количествах, вместе с активным продвижением технологий реакторов на быстрых нейтронах 4-го поколения может стать одним из перспективных направлений развития будущей атомной энергетики, ориентированной на максимальное вовлечение урановых ресурсов в ядерный-топливный цикл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewable Energy Policy Network for the 21st century. Global status report. – URL : https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Full-Report-2018.pdf. (дата обращения: 06.02.2020).
2. *Ирина, М. Ю.* Газовые рынки стран восточной Азии / М. Ю. Ирина. – Санкт-Петербург, 2016. – 25 с.
3. *Аль-Бермани, А. Г.* Атомные электростанции / А. Г. Аль-Бермани // Молодой ученый. – 2015. – № 7. – С. 82-85.
4. *Алан, М.* Ядерная Энергетика: положение дел в мире. – URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/49204734548_ru.pdf (дата обращения: 06.02.2020).
5. *Никулин, А. А.* Перспективы мирового рынка урана в контексте новых тенденций развития ядерной энергетики / А. А. Никулин. – Москва, 2013. – 19 с.
6. Начальная загрузка реактора Белорусской АЭС составит 93 тонны урана. – Сайт экологического центра «Беллона». 2012. – URL : https://bellona.ru/2012/08/29/nachalnaya-zagruzka-reaktora-belorus/ (дата обращения: 06.02.2020)
7. *Hinds, D.* Next Generation Nuclear Energy: The ESBWR / D. Hinds, C. Maslak // Nuclear News. – 2006. – № 49. – P. 35-40.
8. *Mark, J.K.* Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium / J.K. Mark // Science and Global Security. – 2010. – № 2-3. – P. 170.
9. *Шмелев, А. Н.* Физические факторы и свойства ядерных материалов, влияющие на их защищенность / А. Н. Шмелев, Г. Г. Куликов, В. А. Апсэ. – Москва, 2001. – 56 с.
10. *Фридман, В.* Долгий путь быстрой энергетики / В. Фридман // В мире науки. – 2014. – № 4. – с. 15-18.
11. *Милюкова, М. С.* Аналитическая химия плутония / М. С. Милюкова, Н. И. Гусев, И. Г. Сентюрин, И. С. Скляренко. – Москва, 1965. – 454 с.
12. *Левин, В. Е.* Ядерная физика и ядерные реакторы / В. Е. Левин. – Москва, 1979. – 284 с.

REFERENCES

[1] Renewable Energy Policy Network for the 21st century. Global Status Report. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Full-Report-2018.pdf.
[2] Irina M.Y. Gazovy`e ry`nki stran vostochnoj Azii [East Asia Gas Markets]. Sankt-Peterburg [Sankt-Peterburg]. 2016. 25 p. (in Russian).
[3] Al-Bermani A.G. Atomny`e e`lektrostancii [Nuclear Power Plants]. Molodoj ucheny`j [Young scientist]. 2015. № 7. P. 82-85 (in Russian).
[4] Alan M. Yadernaya E`nergetika: polozhenie del v mire [Nuclear Energy: It's Current State in the World]. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/49204734548_ru.pdf (in Russian).

[5] Nikulin A.A. Perspektivy` mirovogo ry`nka urana v kontekste novy`x tendencij razvitiya yadernoj e`nergetiki [Prospects of the World Uranium Market in the Context of New Trends in the Development of Nuclear Energy]. Moskva [Moscow]. 2013. 19 p. (in Russian).
[6] Nachalnaya zagruzka reaktora Belorusskoi AES sostavit 93 tonni urana [The Initial Loading of the Reactor of the Belorussian NPP Will Amount to 93 Tons of Uranium]. Sait ekologicheskogo centra Bellona [Website of the Ecological center Bellona]. 2012. URL: https://bellona.ru/2012/08/29/nachalnaya-zagruzka-reaktora-belorus/ (in Russian).
[7] Hinds D. Maslak C. Next Generation Nuclear Energy: The ESBWR. Nuclear News. 2006. № 49. P. 35-40.
[8] Mark J.K. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. Science and Global Security. 2010. № 2-3. P. 170.
[9] Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A. Fizicheskie faktory i svoistva yadernih materialov, vliyayuschie na ih zaschischennonst [Physical Factors and Properties of Nuclear Materials that Affect Their Security]. Moskva [Moscow]. 2001. 56 p. (in Russian).
[10] Freedman V. Dolgyi put bistroi energetiki [Long Way of Fast Energy]. V mire nauki [In the World of Science]. 2014. № 4. P. 15-18 (in Russian).
[11] Milukov M.C., Gusev N.I., Senturin I.G., Sklyarenko I.C. Analiticheskaya khimiya plutoniya [Analytical Chemistry of Plutonium]. Moskva [Moscow]. 1965. 454 p. (in Russian).
[12] Levin V.E. Yadernaya fizika I yadernie reatori [Nuclear Physics and Nuclear Reactors]. Moskva [Moscow]. 1979. 284 p. (in Russian).

Usage of Natural Uranium in Nuclear Reactors

A.V. Goncharuk

Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409
ORCID iD: 0000-0001-9159-4243
WOS Researcher ID: O-6356-2018
e-mail: del17@yandex.ru

Abstract – The paper reviews the modern tendencies in the development of the world nuclear energy sector and progress in research of renewable energy technologies. Due to the unique advantages of the nuclear energy generation it proves to be very prospective source of power for the countries with a very intensive pace of development and huge energy demands. The main part of the article goes through the physical and economic backgrounds of the uranium fuel usage. The basics of the into-core processes and nuclear reactions substance are described. The comparative assessment of some aspects of thermal neutron and fast neutron technologies is listed. The physical background behind the two different reactor types builds up the conclusion on the potential advantages for the fuel basis of the atomic energy due to high involvement of the fast neutron specter into the nuclear energy generation processes.

Keywords: uranium, fast neutrons, nuclear reactor, atom, fuel, BN-800.