

РАЗВИТИЕ РЕАКТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

THE DEVELOPMENT OF SMALL AND MEDIUM REACTORS TAKING INTO ACCOUNT PERSPECTIVE NUCLEAR FUEL CYCLES OF THE ATOMIC ENERGY

*I. Presniakov
A. Guseva*

Annotation

The article describes the analysis of technical characteristics on reactors of the nuclear power plants of low and average power influencing need for natural uranium and fuel expenses is considered. Reference points for definition of a target nuclear fuel cycle nuclear stations of low and average power are revealed. On the example of the fast reactor it is considered influences of the price of natural uranium on expediency of use for nuclear power plants of low and average power the oxide fuel and nitride uranium – plutonium fuel.

Keywords: uranium, nuclear fuel, nuclear fuel cycle, nuclear power plants of low power, plutonium, MOX fuel, spent nuclear fuel, enrichment, burning out depth.

*Пресняков Илья Владимирович
Аспирант, Национальный
исследовательский ядерный
университет "МИФИ", Москва
Гусева Анна Ивановна
Д.т.н., профессор, Национальный
исследовательский ядерный
университет "МИФИ", Москва*

Аннотация

В данной статье проведен анализ технологических характеристик реакторов атомных станций малой и средней мощности, влияющих на потребность в природном уране и топливные затраты. Выявлены ориентиры для определения целевого ядерного топливного цикла атомных станций малой и средней мощности. На примере быстрого реактора рассмотрено влияние цены природного урана на целесообразность использования для атомных станций малой и средней мощности оксидного и нитридного уран-плутониевого топлива.

Ключевые слова:

Уран, ядерное топливо, ядерный топливный цикл, атомные станции малой мощности, плутоний, MOX-топливо, отработавшее ядерное топливо, обогащение, глубина выгорания.

Введение

В настоящее время можно уверенно констатировать, что атомная энергетика заняла настолько твердое место среди технологий выработки электроэнергии, что хорошая освоенность позволяет отнести ее к традиционной электроэнергетике [1]. Тем не менее, одно из ключевых преимуществ атомной энергетики – отсутствие необходимости в непрерывном подводе источника энергии (топлива или рабочего тела (воды)) – остается практически нераскрытым.

Поставка топлива на атомные станции осуществляется дискретно в относительно небольших по объему размерах. Это может позволить размещать атомные станции в регионах с ограниченной транспортной инфраструктурой, удаленных от мест добычи полезных ископаемых и/или не обеспеченных заметными гидроэнергетическими ресурсами. Но в таких местах, с точки зрения функционирования региональных энергосистем, уместно размещать не освоенные в настоящее время атомные станции большой мощности, а атомные станции малой и

средней мощности (далее – АСММ) в компоновке, включающей несколько блоков.

Основной целью стратегии развития атомной энергетики России является формирование атомного комплекса как энергетической базы устойчивого развития страны в стратегической перспективе. Одной из приоритетных задач является создание оптимальной структуры ядерного топливного цикла и его замыкание на основе разработки и внедрения новых технологий переработки отработавшего ядерного топлива (далее – ОЯТ), производства смешенного уран-плутониевого топлива и его широкого применения в энергетических реакторах.

При этом АСММ должны гармонично вписываться в структуру атомной энергетики, в т.ч. в ядерный топливный цикл (далее – ЯТЦ). Последний, в свою очередь, будет в XXI веке претерпевать структурные изменения, связанные, в первую очередь, с уменьшением доступности природного урана, требованиями по сокращению накопления ОЯТ и переходом на использование делящихся материалов из переработанного ядерного топлива. Целью насто-

ящего исследования является определение места АСММ в ЯТЦ и анализ эффективности использования на АСММ различных видов топлива.

Реакторы малой и средней мощности

Ядерное топливо – условно–переменная составляющая эксплуатационных расходов атомных электростанций. Его доля в затратах АЭС большой мощности составляет 30–35% [2]. Для АСММ доля ядерного топлива в расходах должна быть не выше, поскольку в отношении атомных станций большой мощности действует эффект масштаба, который, однако, касается большей частью затрат на обеспечение безопасности и практически не отражается на затратах на ядерное топливо. В случае, если топливная составляющая себестоимости у АСММ выше, чем у АЭС большой мощности, это ограничивает их применение энергосистемами с более высокой ценой электроэнергии.

С точки зрения функционирования активной зоны ядерные реакторы делятся на два типа: реакторы на тепловых и реакторы на быстрых нейтронах. Данное деление полностью применимо и для реакторов, используемых на АСММ. Реакторы на быстрых нейтронах позволяют использовать потенциал изотопов U^{238} , но, ввиду меньшего сечения деления изотопов урана быстрыми нейтронами, требуют большего обогащения по делящемуся изотопу U^{235} . Большого обогащения по изотопу U^{235} требуют и тепловые реакторы в случае увеличения периода между перегрузками ядерного топлива (что оказывается актуальным для АСММ при их размещении в удаленных регионах со слаборазвитой транспортной инфраструктурой).

Расход природного урана (содержание U^{235} с = 0.711%) и затраты на обогащение топлива растут пропорционально росту требуемого содержания изотопа U^{235} в ядерном топливе (рис. 1). Обеспечение экономической эффективности АСММ на быстрых нейтронах и/или с длительными интервалами между перегрузками в сравнении с обычными тепловыми реакторами требует, чтобы рост затрат на обогащенное ядерное топливо окупался (при прочих равных) за счет увеличения глубины выгорания. Однако на практике это требование недостижимо.

Из таблицы 1 видно, что увеличение глубины выгорания не покрывает рост потребности в природном уране из-за увеличения требуемого обогащения по U^{235} . Поэтому с точки зрения эффективности расходования природного урана конкурентоспособность инновационных реакторных установок оказывается под угрозой. Решением данной проблемы может стать полное или частичное участие АСММ в замыкании ядерного топливного цикла атомной энергетики. Замыкание ядерного топливного цикла предполагает выделение из отработавшего ядерного топлива энергетических делящихся материалов (урана и плутония) для возвратного их использования в ядерных реакторах. По химической форме чаще всего рассматривают оксидное уран–плутониевое топливо (т.н. смешанное оксидное топливо, Mixed–Oxide fuel или MOX) и нитридное уран–плутониевое топливо.

Согласно базовому прогнозу, предложенному в [3], потребность в АСММ до 2040 г. оценивается в 15 ГВт установленной электрической мощности. Такая величина в разы меньше суммарной электрической мощности действующих АЭС.

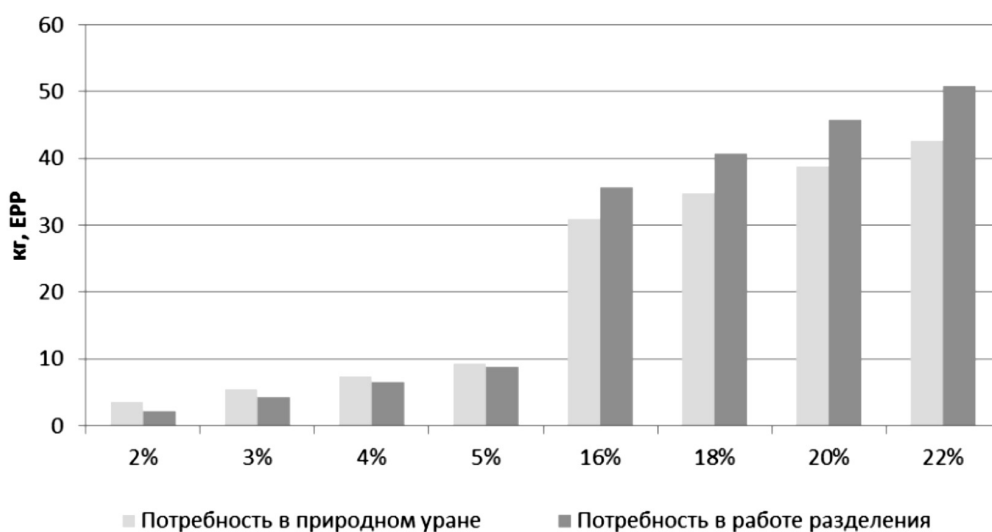


Рисунок 1. Зависимость потребности в природном уране и работе разделения (на 1 кг обогащенного урана, при глубине отвала $\gamma = 0.2\%$).

Таблица 1.

Глубина выгорания и обогащение топлива для различных реакторов [1,3,4].

	ВК-300	КЛТ-40	СВБР-100
Глубина выгорания (средняя), МВт*сут/кг	41,0	46,0	64,1
Обогащение по U235	4%	15,7%	16,3%
Срок службы, лет	60	40	50
Тепловая мощность, МВт	750	150	280
Электрическая мощность (в конденсационном режиме), МВт	250	35	100
Потребность в природном уране за жизненный цикл (КИУМ = 90%), т	2681	1300	2261
Удельная потребность в природном уране за жизненный цикл, т/млн. МВт*ч	22,7	117,8	57,3

Приведенная там же денежная оценка рынка АСММ до 2040 г. составляет около 11 млрд. долл.

При электрической мощности тепловых реакторов в 15 ГВт годовой объем ОЯТ составит 306 т (при расчете принят коэффициент использования установленной мощности (далее – КИУМ) 90%, КПД 35% и глубина выгорания 46 МВт*сут/кг). При стоимости завода по переработке ОЯТ тепловых реакторов 1,5 млн. долл./т*год и завода по производству МОХ-топлива 2,5 млн. долл./т*год на создание мощностей по замыканию ЯТЦ будет необходимо 1,2 млрд. долл., что потребует увеличения инвестиций в программу строительства АСММ на 10%.

Для реакторов на быстрых нейтронах потребуется большой объем инвестиций в создание мощностей по переработке и фабрикации топлива: при стоимости завода по переработке ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах в 2,5 млн. долл./т*год и завода по производству топлива из энергетического плутония в 13,5 млн. долл./т*год на создание мощностей по замыканию ЯТЦ необходимо 3,4 млрд. долл. (при расчете приняты показатели реактора СВБР-100: КИУМ 90%, КПД 36% и глубина выгорания 64 МВт*сут/кг [5]).

С учетом того, что различными участниками глобального рынка АСММ будут продвигаться различные реакторные технологии, и их действия будут, как минимум, не полностью скоординированы, ввиду снижения мощности затраты на создание инфраструктуры замыкания ЯТЦ только возрастут. Кроме того, одной из основных причин замыкания ЯТЦ является необходимость эффективного обращения с отработавшим ядерным топливом (далее – ОЯТ). Вклад же АСММ в накопление ОЯТ в хранилищах будет незначительным.

Таким образом, обеспечение конкурентоспособности АСММ требует их встраивания в существующие и перспективные ядерные топливные циклы атомных станций

большой мощности.

Стоимость природного урана

Ключевым критерием для выбора АСММ и ее ЯТЦ должна служить минимизация затрат на ядерное топливо за весь период его использования (т.е. эксплуатации АСММ). Однако здесь исследователь (особенно с учетом целевых сроков эксплуатации современных АС в 40–60 лет, не считая сроков строительства АС) сталкивается с высокой неопределенностью как в отношении ядерного топливного цикла в отдаленном будущем, так и в отношении цен на исходное сырье (природный уран).

Рынок природного урана рассматривается и прогнозируется исходя из тенденций развития крупномасштабной атомной энергетики [6]. Например, в Китае до 2050 г. планируется ввести около 380 ГВт АЭС [7], что обеспечит стабильный рост спроса на уран. Превышение спроса над предложением урана ожидается уже в 2023–2025 гг. [8]. Пик добычи природного урана с себестоимостью до 130 долл./кг наступит в 2038–2040 гг. [9]. Поскольку преобладающее большинство действующих и строящихся реакторов ориентированы на использование топлива, полученного из природного урана, а срок службы современных реакторов достигает 60 лет (даже для реакторов т.н. третьего поколения с учетом продления сроков эксплуатации), цена природного урана будет возрастать по мере роста себестоимости его добычи, истощения запасов уранового регенерата, оставшегося от оружейного производства и соответствующего увеличения дефицита природного урана. Согласно референтному прогнозу, приведенном в [10], цена природного урана после 2040 г. составит 1000 \$/кг. Другие аналитики дают существенно более сдержанные прогнозы эскалации цен на природный уран, но долгосрочный тренд роста цен, связанный с увеличением себестоимости добычи (при условии дальнейшего развития атомной энергетики), находит поддержку у преобладающего большинства исследователей.

В настоящее время технологии замкнутого ядерного топливного цикла находятся на начальной стадии своего практического внедрения. Но это не означает, что АСММ не должны ориентироваться на перспективы замыкания ЯТЦ. Проанализируем, как цена природного урана влияет на целесообразность перехода АСММ на топливо, полученное из замкнутого ЯТЦ.

В [11] приведена оценка стоимости МОХ-топлива для реакторов на тепловых нейтронах в 6480 долл./кг тяжелого металла (далее – ТМ). Учитывая критическую направленность источника по отношению к атомной энергетике, можно предположить указанную оценку пессимистической, а в качестве оптимистической принять уменьшенную вдвое стоимость.

На рис. 2 показана стоимость ядерного топлива тепловых реакторов (обогащение 4,4%) в зависимости от стоимости урана (при расчете использованы данные [11, 12]). Видно, что МОХ-топливо может рассматриваться как альтернатива топливу из природного урана при цене последнего от 300 долл./кг U, начиная с цены 700 долл./кг U стоимостное преимущество МОХ-топлива становится практически однозначным.

Для реакторов с высоким обогащением ядерного топлива эффективность использования делящихся металлов из отработавшего ядерного топлива наступает быстрее. Рассмотрим это на примере топлива для реактора СВБР-100, зависимость стоимости которого от цены природного урана показана на рис. 3 (при расчете использованы данные [5, 12]). При стоимости нитридного уран-плутониевого топлива, полученного из ОЯТ реакторов типа БРЕСТ, в размере 5558 долл./кг ТМ его использование в СВБР-100 выгодно уже при действующих

ценах на уран. Назначив, для аналогии с предыдущим случаем, указанную оценку стоимости оптимистической, в качестве пессимистической оценки примем стоимость производства нитридного уран-плутониевого топлива на демонстрационной установке – 8031 долл./кг ТМ. В таком случае переход реакторов СВБР-100 на использование нитридного уран-плутониевого топлива выгодно при увеличении текущей стоимости примерно в 1,5 раза.

Особенностью реактора СВБР-100 является возможность использования различных видов топлива (из природного урана, МОХ-топлива, нитридного топлива) без необходимости изменения конструкции. Более того, единовременная перегрузка всей активной зоны позволит, при существенной необходимости, проводить изменение топлива в процессе эксплуатации РУ. АСММ на базе реакторов СВБР-100 смогут гибко реагировать на изменение ценовой конъюнктуры на рынке природного урана и развитие инфраструктуры замыкания ядерного топливного цикла. Планирование сооружения АСММ на базе других реакторов требует большей определенности в стратегии развития ядерного топливного цикла. Наконец, потенциал быстрых реакторов, таких как СВБР-100, может быть гармонично использован для наработки энергетически плутония (хотя выход на полное самовоспроизводство у СВБР-100 не предусмотрен).

Заключение

Затраты на ядерное топливо растут пропорционально его обогащению по изотопу U^{235} , и увеличение глубины выгорания не покрывает роста этих затрат. Замыкание ЯТЦ принесет наибольший эффект для реакторов, требующих высокое обогащение топлива по U^{235} , т.е. для тепловых реакторов с длительными интервалами между

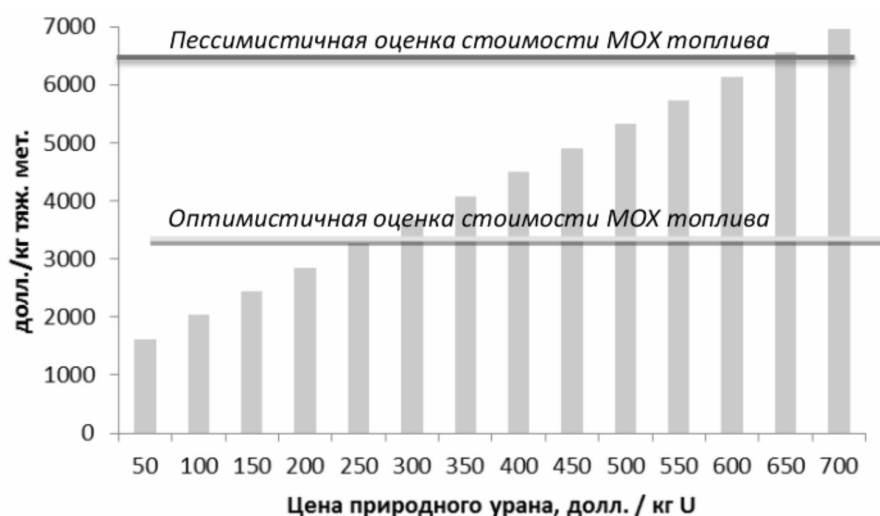


Рисунок 2. Стоимость ядерного топлива тепловых реакторов (обогащение 4,4%) в зависимости от цены природного урана.

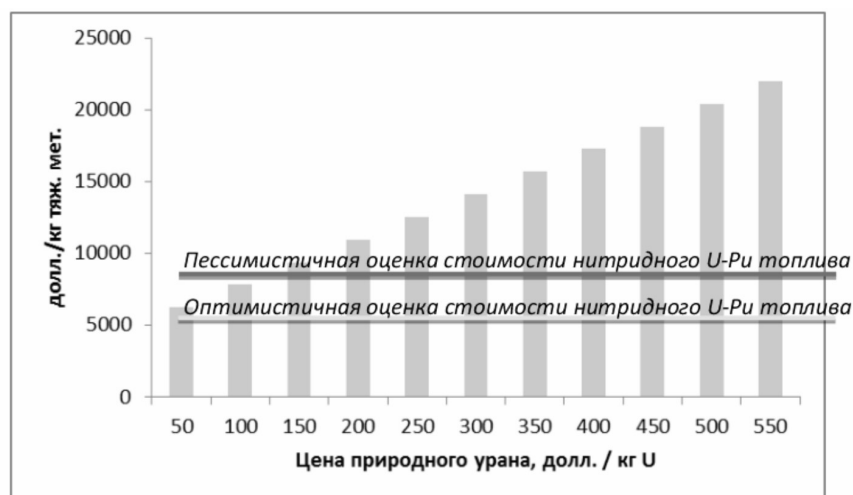


Рисунок 3. Стоимость ядерного топлива реактора СВБР-100 в зависимости от цены природного урана.

перегрузкой топлива и для быстрых реакторов. Такие реакторы, в т.ч. малой и средней мощности, в настоящее время относятся к инновационным, однако высокие топливные затраты создают существенную угрозу их конкурентоспособности.

Низкая доля АСММ в атомной энергетике вкупе с корпоративной и технологической разнородностью участников глобального рынка АСММ затрудняют создание специализированных мощностей для замыкания ЯТЦ. Таким образом, ЯТЦ для АСММ будет в первую очередь определяться ЯТЦ крупномасштабной атомной энергетики. Но исчерпание складских запасов урана и доступных месторождений рано или поздно приведет к значительному росту цены на природный уран, что сделает вы-

годным использование переработанного топлива для реакторов любого типа и мощности. Беспроигрышным вариантом в этой ситуации оказываются реакторы, способные работать как на топливе из природного урана, так и на переработанном ОЯТ.

В заключение следует отметить, что проведенный анализ рассматривает лишь один из аспектов, который должен учитываться при планировании развития АСММ. Однако анализ и оптимизации топливных расходов, наряду с такими ключевыми показателями как капиталовложения, расходы на персонал и ремонты, срок службы, потребление электроэнергии на собственные нужды являются необходимыми условиями достижения конкурентоспособности АСММ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы современной энергетики: учебник для вузов: в 2 т. / под общей редакцией Е.А. Аметистова. Том 1. Современная теплоэнергетика / А.Д. Трухний, М.А. Изюмов, О.А. Поваров, С.П. Малышенко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 472 с.
2. Толстоухов Д.А. Проект "Прорыв" – условия конкурентоспособности при промышленной реализации. // Конференция "Новая технологическая платформа атомной энергетики: проект "Прорыв". 21–22 марта 2014. С. 8.
3. SMR Market Outlook. UxC Annual Report 2013. 445 с.
4. Nuclear Energy Insider's SMR Report 2013. FC Business Intelligence Ltd. 116 с.
5. Сооружение опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем в Ульяновской области. Материалы обоснования лицензии на осуществление деятельности в области использования атомной энергии. Книга 2. Часть 2. 2014 г. 142 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.akmeengineering.com/assets/files/OVOS/MOL_soor_kn2-2.pdf
6. Путилов А.А., Воробьев А.Г., Путилов А.В. Экономические характеристики уранового сырья в дореакторном технологическом переделе ядерных энергоресурсов. // Цветные металлы.–2010.–№4.–С.89–93.
7. F. Fiori; Z. Zhou. A study on the Chinese nuclear energy options & the role of ADS reactor in Chinese nuclear expansion // Progress in Nuclear Energy 91.–2016.
8. Steyn, Julian; Meade, Thomas. Uranium market doldrums continue // Nuclear engineering international. – Volume 59, Issue 722 /сент.2014 – С. 12–14.
9. Харитонов В.В., Крынев А.В., Курельчук У.Н., Дудин Н.Ю. Аналитический прогноз динамики добычи урана //Экономические стратегии.–№3/2013.–С.58–72.
10. Субботин С.А. Российские сценарии для рынка бэк-энд. // Международный форум "АТОМЭКСПО 2014". Москва.– С.16.
11. Ядерные делящиеся материалы. Доклад объединения Bellona. 2012. 154 с.
12. UxC Nuclear Fuel Price Indicators. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.uxc.com/review/UxCPrices.aspx>