

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского

ФЭИ – 3269

А.Ф. Егоров, В.В. Коробейников

**Оценка чувствительности сценариев развития
ядерной энергетики России к возможным изменениям
выбранных экономических параметров**

Обнинск– 2017

УДК: 621.039:338.45

А. Ф. Егоров, В. В. Коробейников

**Оценка чувствительности сценариев развития ядерной энергетики России
к возможным изменениям выбранных экономических параметров**

Препринт ФЭИ-3269. – Обнинск, 2017. – 16 с.

Sensitivity study of Russia's nuclear energy development scenarios to possible changes of selected economic parameters

В препринте представлено исследование по сравнению российских сценариев развития системы ядерной энергетики. Исследование показывает, как различные изменения входных экономических параметров системы развития атомной энергетики влияют на соотношение тепловых и быстрых реакторов в сценариях. В заключительной части представлены результаты. Эти исследования проводились в рамках совместного проекта ИНПРО.

The paper presents a study on comparison of Russian nuclear energy system scenarios. It shows how the various changes of input economic parameters of nuclear energy system manipulates on the thermal and fast reactors ratio. In the conclusion part of the paper the results are presented. These studies are carried out within the framework of the joint project INPRO.

Содержание

Введение.....	4
Общая модель	5
Модельные предположения по топливному циклу и параметрам реакторов.....	5
Сценарии и граничные условия	7
Оценка влияния выбранных удельных затрат на долю быстрых реакторов в структуре ЯЭ.....	11
Выводы	14
Список источников	15

Введение

Известно, что значения различных экономических величин, используемых в технико-экономическом анализе ядерных систем известны с низкой или неопределённой точностью. Связано это в первую очередь с малой, или вообще отсутствующей серийностью в ядерной отрасли. Поэтому исследования чувствительности структуры АЭ к изменениям интегральных экономических параметров являются нужной и актуальной задачей.

В рамках данной работы исследовались сценарии развития ядерной энергетики на долгосрочную перспективу, когда значительно обостряются ресурсные ограничения и возникает необходимость широкомасштабного ввода реакторов на быстрых нейтронах.

Исследования чувствительности помогут определить требования к точности выбранных экономических параметров, используемых в расчётном обосновании конкурентоспособности различных ядерно-энергетических систем друг с другом.

Расчёты чувствительности проводились для упрощённых сценариев регионального взаимодействия по поставкам свежего и отработавшего топлива и развития ядерной энергетики России. Для исследований стратегий энергоснабжения использовался инструмент энергетического планирования MESSAGE, а сценарии разработаны в рамках совместного проекта ИНПИО «SYNERGIES» [1]. Такие сценарии были подготовлены участниками из России, Армении и Украины для методических целей названного совместного проекта. Взаимодействие стран в рамках рассматриваемой модели представлено на рисунке 1.

С учетом перспектив строительства АЭС российской конструкции за рубежом, доля атомных станций для международного центра по переработке ОЯТ будет расти. Для того чтобы понять в каком направлении должна двигаться отрасль,

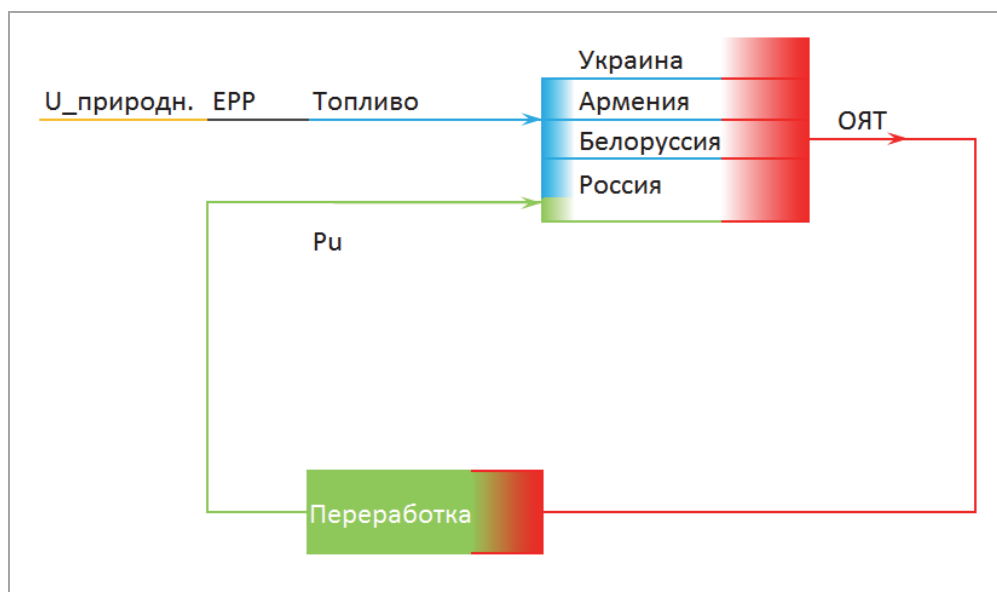


Рисунок 1 – Упрощенная схема движения материальных потоков регионального взаимодействия стран

необходимо представить, как будет работать комплекс атомных станций и сопутствующая инфраструктура через 30–50 лет. Такая система должна учитывать огромное количество факторов как экономического, так и технического (ресурсы, технологии) плана.

Цель данной оценки состояла в попытке оценить, как изменения экономических параметров сценариев топливного цикла ядерной энергетики на выбранном отрезке стоимостей и времени смогут повлиять на её структуру.

Общая модель

Основными компонентами рассматриваемой энергетической системы в выбранном масштабе времени являются:

- ресурсы (уран, плутоний, нарабатываемый в реакторах, и «оружейный» плутоний, который можно использовать в мирных целях);
- технологии (реакторы, работающие на тепловых и на быстрых нейтронах);
- сопутствующая инфраструктура: заводы по производству, переработке топлива, хранилища ОЯТ и радиоактивных отходов.

Основными характеристиками (свойствами) элементов системы служили технические и экономические показатели.

Расчётная схема включает все основные компоненты энергетической цепочки ЯТЦ: конверсию, обогащение, изготовление топлива, облучение топлива в реакторе, охлаждение и временное хранение отработавшего топлива, переработка отработавшего топлива, хранение выделенных после переработки продуктов.

Модель позволяет анализировать потоки ядерных материалов и производить экономический анализ и оптимизацию структуру ЯЭ. В модели предполагается многократное использование плутония, выделенного из топлива тепловых реакторов.

Модельные предположения по топливному циклу и параметрам реакторов

В сценариях рассмотрены следующие типы реакторов российской конструкции:

- РБМК;
- ВВЭР-440, ВВЭР-1000;
- УВВЭР – улучшенный ВВЭР;
- БН – быстрый натриевый реактор с КВ 1,14.

Тепловые реакторы (РБМК, ВВЭР-440, ВВЭР-1000, УВВЭР) потребляют УОХ-топливо, а быстрые реакторы потребляют МОХ-топливо. Содержание U-235 в природном уране составляет 0,007114. Плутоний, извлеченный из ОЯТ ВВЭР-440, ВВЭР-1000, УВВЭР и БН, многократно используется для изготовления МОХ-топлива. ОЯТ РБМК не перерабатывается и хранится во временном хранилище.

Технические реакторные и данные соответствующих топливных циклов для моделирования сценариев были взяты из [2–4] и представлены в таблице 1.

Экономические данные по реакторам и данные соответствующих топливных циклов для моделирования основаны на [3, 5] и представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Технические параметры реакторов РБМК, ВВЭР-440, ВВЭР-1000, УВВЭР, БН и характеристики соответствующих топливных циклов

Параметр	Единица измерения	РБМК	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	УВВЭР	БН
Электрическая мощность	МВт(эл.)	1000	440	1000	1000	1200
КИУМ*	-	0,69	0,7	0,68	0,87	0,9
КПД	-	0,31	0,32	0,33	0,33	0,44
Ежегодная загрузка топлива	тТМ	30,9	12,0	18,7	24,0	16,3**
Первоначальная загрузка топлива	тТМ	155,9	41,0	65,4	65,4	106,2**
Глубина выгорания	ГВт·д/тТМ	26,3	29,3	40,3	40,1	55,0**
Содержание Pu в ОЯТ	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,11
Кампания	день	1270	874	869	866	1798
Обогащение свежего топлива	-	0,03	0,04	0,04	0,04	-
Содержание U-5 в отвалах	-	0,002	0,002	0,002	0,002	-
Выдержка ОЯТ в бассейнах выдержки	год	3	3	3	3	4
Срок строительства	год	-	-	-	5	5
Срок эксплуатации	год	45	45	45	60	60

* КВ для РБМК, ВВЭР-440, ВВЭР-1000 средний для всех существующих блоков; для УВВЭР, БН используются проектные данные

** в т. ч. АЗ, торцевые и боковые экраны

Таблица 2 – Экономические характеристики реакторов и соответствующих топливных циклов

Затраты	Единица измерения	РБМК	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	УВВЭР	БН
Капитальные	\$/кВт (эл.)	-	-	-	3500	3500
Постоянные	\$/кВт г	50	50	50	50	50
Переменные	\$/ кВт г	4	4	4	4	4
Конверсия	\$/кг U	17	17	17	17	-
Обогащение	\$/кг ЕРР	100	100	100	100	-
Производство топлива	\$/кг ТМ	510	510	510	510	1790*
Переработка	\$/кг ТМ	-	400	400	400	770
Хранение ОЯТ	\$/кг ТМ /г	10	10	10	10	10
Хранение Pu	\$/кг ТМ /г	-	-	-	-	2000

* в т. ч. АЗ, торцевые и боковые экраны в соответствующих пропорциях.

Сценарии и граничные условия

Приведенные в работе результаты расчетов получены при следующих модельных предположениях:

- базовый год 2010 г.;
- для упрощения все производственные потери равны нулю;
- интервал прогнозирования ограничен 2011–2080 гг., однако модельный интервал составляет 2011–2130 гг. для устранения краевых эффектов линейной интерполяции общей установленной мощности;
- шаг моделирования равен 1 году;
- непрерывность ввода мощностей ЯЭ;
- норма дисконтирования – 5 %;
- математическая модель учитывает ввод мощностей реакторов и загрузку хранилищ ОЯТ РБМК, ВВЭР-440, ВВЭР до 2011 года (табл. 3);
- ОЯТ РБМК не перерабатывается;
- РБМК, ВВЭР-440, ВВЭР не вводятся с 2011 года из-за устаревшей конструкции (вводятся только технологии УВВЭР и БН).
- ресурсы урана принимались равными 1,5 млн тонн и были распределены по категориям стоимости.

Таблица 3 – Начальные значения реакторных хранилищ ОЯТ

Тип реактора	РБМК	ВВЭР-440	ВВЭР	УВВЭР	БН
ОЯТ, начальные значения, тТМ	9379,77	235	3293,34	0	0

Основные особенности рассматриваемых стран:

- в России сосредоточены основные мощности до-реакторной и после-реакторной части ЯТЦ (в т. ч. производства по переработке UOX- и MOX-топлива);
- в России эксплуатируются все типы рассматриваемых в модели реакторов;
- Россия обеспечивает свежим топливом и перерабатывает ОЯТ Армении и Белоруссии;
- Украина поставляет ОЯТ в Россию на переработку;
- Армения и Белоруссия эксплуатируют УВВЭР.

Данные особенности моделирования были представлены на рисунке 1.

В математической модели предполагается два временных периода по вводу блоков АЭ: *плановый*, предполагает выполнение энергетической стратегии [6] и *экспертной оценки* по развитию АЭ в России с дальнейшим наращиванием установленной мощности ЯЭ (табл. 4, рис. 2). Ежегодные мощности наращиваются по следующей схеме: в 2011–2050 году примерно по 2 ГВт в год, с 2051 по 2070 по 2,5 ГВт в год, а с 2071 по 1 ГВт в год.

Таблица 4 – Потребности в мощностях АЭ в России до 2100 года

Год	2011	2030	2050	2070	2090	2100
Мощность ЯЭС, ГВт (эл.)	24	58	100	152	173	192

Стратегия 2011–2030, частично отраженная в таблице 4, относится к периоду роста экономики России. На сегодняшний день стратегия будет пересматриваться с учетом спада потребности АЭ. В соответствии с планами по вводу/выводу мощностей АЭ в стране [3], ввод БН-1200 перенесен на 2025 год, а серия из пяти блоков на 2035 год. Тем не менее, ввод реакторов остался прежним, т. к. работа показывает основное исследование проекта ИНПРО SYNERGY.

Структура оптимизирована по затратам с 2030 г. Ввод мощностей до 2030 является плановым, поэтому оптимизация структуры энергетики здесь не осуществляется. После 2030 года модель получает больше возможностей по изменению баланса тепловых и быстрых реакторов в системе. На рисунке 2 показаны основные временные отрезки при моделировании сценариев.

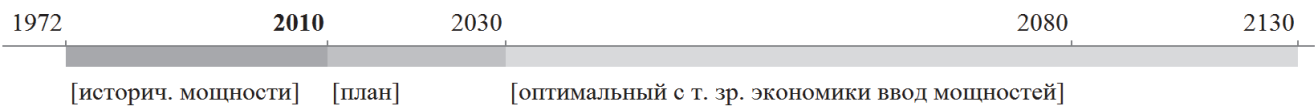


Рисунок 2 – Временные интервалы математической модели

Урановые ресурсы [7] распределены по категориям <USD 80/кг, <USD 130/кг, <USD 260/кг, <USD 300/кг и значениям (табл. 5).

Таблица 5 – Категории ресурса природного урана и его значения в России

	Единица измерения	Категория			
		a	b	c	d
Цена	\$/кг	80	130	260	300
Значение	т U	172 900	314 300	191 800	772 000

Категория «а» относится к разведанным ресурсам природного урана на территории России с ценой менее 80 \$/кг, категория «б» – это предполагаемые ресурсы природного урана с ценой менее 130 \$/кг. По состоянию на 1 января 2011 года, прогнозные ресурсы составляют 191 800 т (категория «с»), а теоретически, с ценой менее 300 \$/кг, категория «d», в России 772 000 т природного урана.

В данном исследовании плутоний является топливным ресурсом для быстрых реакторов. На первый год модельного сценария в хранилище содержится 13 т плутония.

На рисунке 3 показаны мощности заводов по переработке UOX-топлива тепловых реакторов. Завод РТ1 работает с 1970 года, срок эксплуатации каждого завода составляет 60 лет.

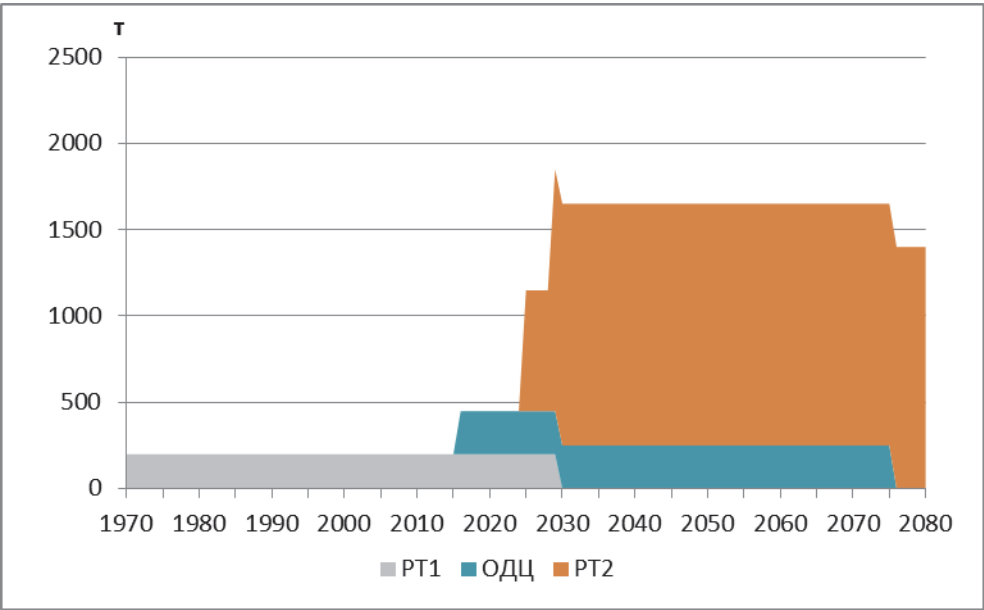


Рисунок 3 – Мощности перерабатывающих предприятий UOX-топлива в России

Мощность завода по переработке MOX-топлива быстрых реакторов не ограничена. Все MOX-топливо, поступающее на линии завода, перерабатывается. На рисунке 4 представлен график поставок украинского ОЯТ.

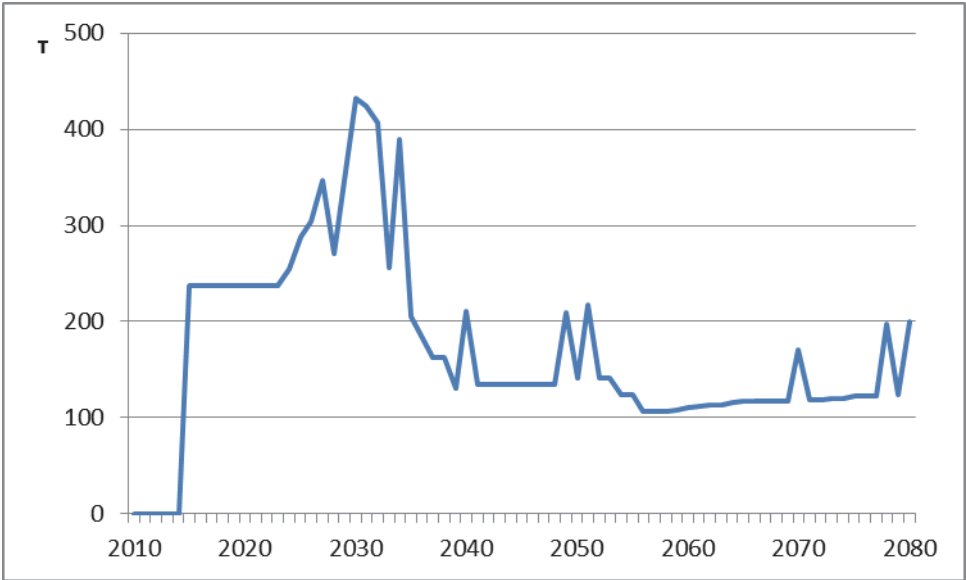


Рисунок 4 – Ежегодные поставки ОЯТ тепловых реакторов Украины на переработку в России

На рисунке 5 показана концептуальная схема ядерно-энергетической системы России. На схеме показаны четыре основные части: ресурсы; предреакторная (включая производства по изготовлению топлива и обогащению природного урана для тепловых реакторов); реакторная, с тепловыми реакторами в верхней части схемы и быстрым реактором в нижней. Кроме того, справа на схеме показана после-реакторная часть, в которой сосредоточены предприятия по переработке и хранению ОЯТ.



Рисунок 5 – Концептуальная схема ЯЭС России

Математическая модель позволяет вычислять следующие ключевые показатели сценария:

- структура генерирующих мощностей АЭ;
- суммарное потребление природного урана;
- разделительные работы;
- производство топлива;
- переработка топлива;
- накопление и потребление плутония;
- отработавшее топливо в хранилищах (с учетом охлаждаемого топлива).

В базовом варианте, структура АЭ России представлена на рисунке 6.

Из рисунка видно, что в модели учтена история ввода реакторов РБМК, ВВЭР-440, ВВЭР. Кроме того, при заданных исходных экономических данных модель показывает, что в среднесрочной и долгосрочной перспективе быстрые реакторы начинают доминировать в данной системе.

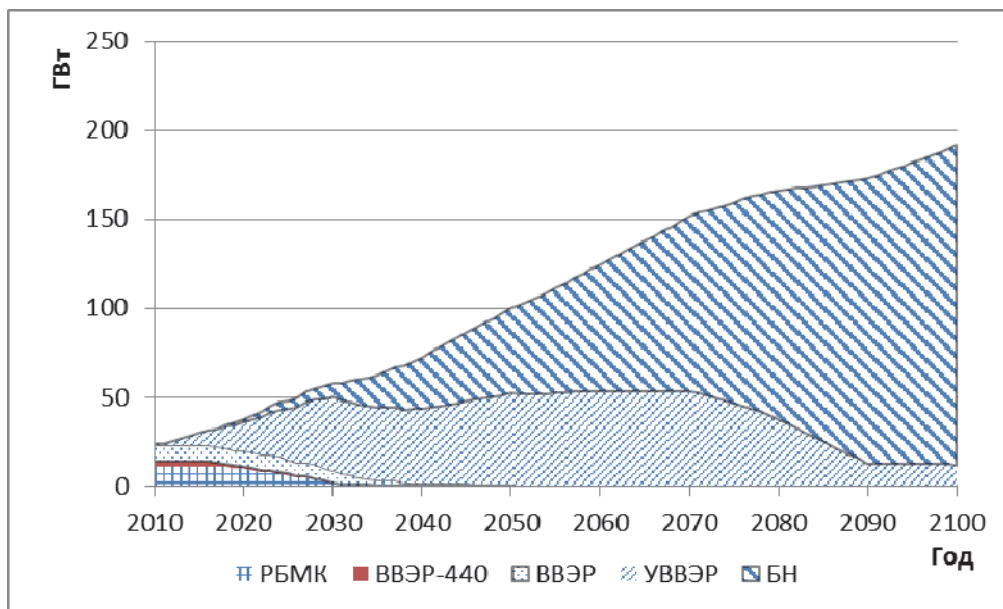


Рисунок 6 – Структура АЭ России в базовом варианте

Оценка влияния выбранных удельных затрат на долю быстрых реакторов в структуре ЯЭ

В базовом варианте развития ЯЭ удельные капитальные затраты [3] на строительство реакторов БН-1200 и усовершенствованных реакторов на тепловых нейтронах УВВЭР-1000 были приняты одинаковыми. Для определения зависимости структуры ЯЭ, т. е. соотношения быстрых и тепловых реакторов, от величины капитальных, топливных затрат, стоимости переработки, хранения ОЯТ и Pu , были выполнены расчеты дополнительных сценариев с итерационной корректировкой исходных данных базового сценария. Корректировка была проведена следующим образом: в базовом сценарии для каждого измененного экономического параметра рассчитывался дополнительный сценарий со всеми соответствующими ключевыми показателями (рис. 7).

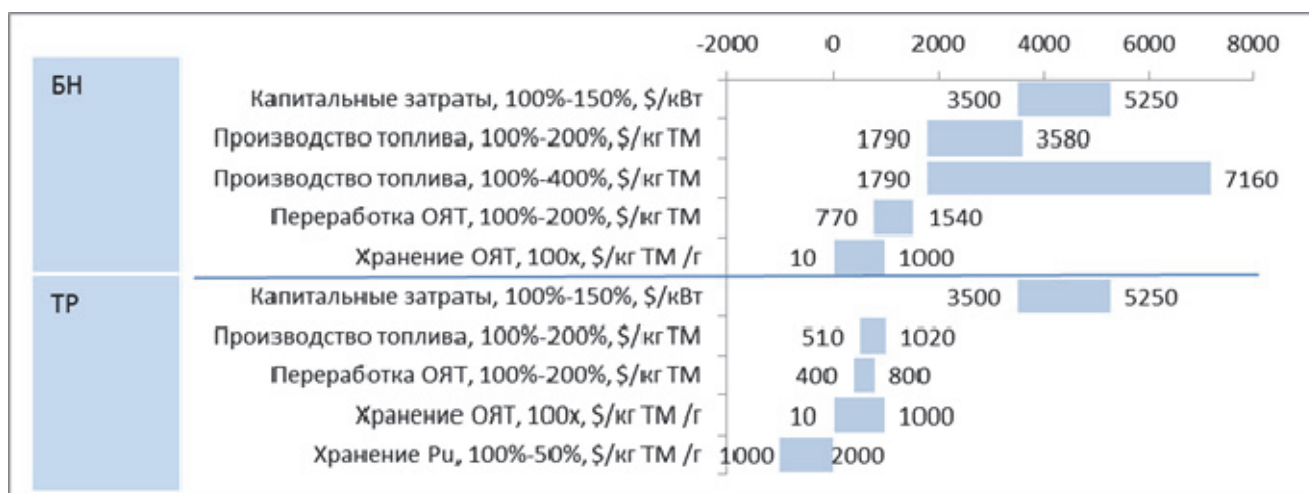


Рисунок 7 – Принятая неопределенность экономических характеристик реакторов и соответствующих топливных циклов

Каждая строка соответствует одному дополнительному сценарию, используемому для моделирования сценариев.

В каждом из дополнительных к базовому сценарию изменялся только один из экономических параметров. Например, в первом дополнительном сценарии капитальная составляющая быстрого реактора была изменена на 50 % с 3500 \$/кВт на 5250 \$/кВт; во втором дополнительном сценарии стоимость производства МОХ-топлива было увеличено до 3580 \$/кг ТМ и т. д. (см. рис. 7).

Анализ расчетов показал, что существенное изменение структуры ЯЭ при изменении стоимостей происходит при корректировке:

- капитальных затрат (с 3500 \$/кВт до 5250 \$/кВт),
- стоимости производства МОХ-топлива (с 1790 \$/кг ТМ до 3580 \$/кг ТМ и до 7160 \$/кг ТМ).

Под существенным изменением понимается ежегодное изменение доли быстрых реакторов в структуре базового сценария по отношению к дополнительным более чем на 5 %.

На рисунке 8 представлен график доли быстрых реакторов в обозначенных четырех сценариях:

- базовом, на рисунке обозначен как «Base»;
- дополнительном 1, с увеличенными на 50 % капитальными затратами на быстрый реактор, на рисунке обозначен как «Cap(БН)=5250 \$/кВт»;
- дополнительном 2, с увеличенными на 100 % топливными затратами на быстрый реактор, на рисунке обозначен как «МОХ=3580 \$/кг ТМ»;
- дополнительном 3, с увеличенными в 4 раза топливными затратами на быстрый реактор, на рисунке обозначен как «МОХ=7160 \$/кг ТМ»;

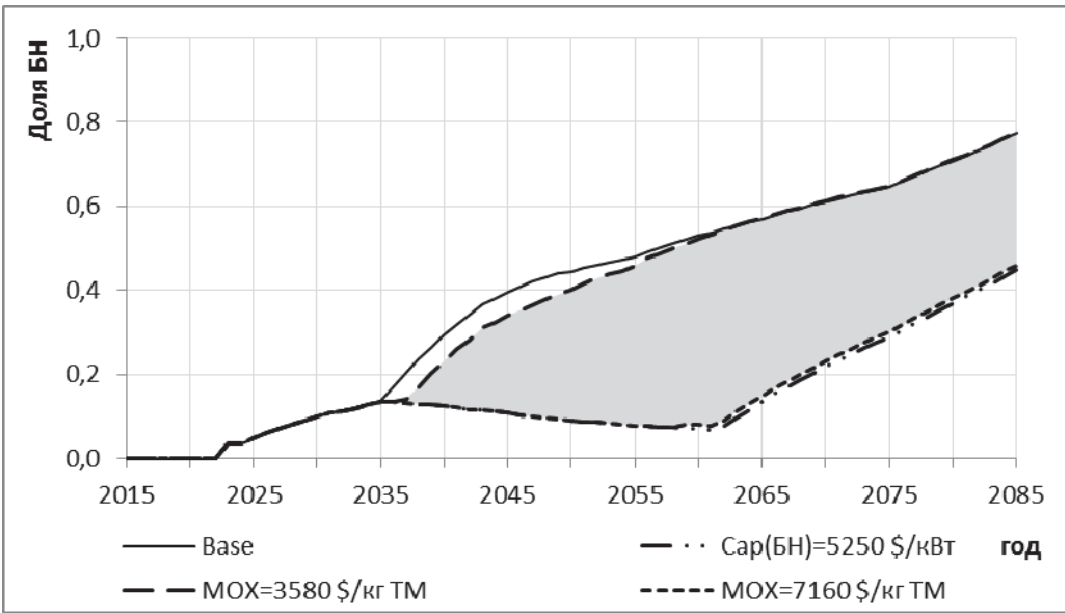


Рисунок 8 – Доля реакторов БН в основном и трех дополнительных сценария ЯЭ России

Серой областью обозначен диапазон доли БН для отрезка удельной стоимости МОХ-топлива 3580–7160 \$/кг ТМ. Это соответствует дополнительному сценарию 2 и 3.

Анализ представленных данных показывает, что повышение капитальных затрат реакторов БН на 50 % приводит к существенному изменению соотношения тепловых и быстрых реакторов в парке ядерной энергетики. К 2050 году доля быстрых реакторов снижается с 48 до 8 %.

Необходимо отметить, что чувствительность к удельным капитальным затратам на строительство блоков быстрых реакторов зависит от масштаба ЯЭ. Кроме того, уязвимым местом данной модели является неограниченная мощность предприятия, перерабатывающего ОЯТ быстрых реакторов. Ограничение ежегодного количества ОЯТ, перерабатываемого на таком предприятии, может существенно изменить соотношение быстрых и тепловых реакторов в системе при заданных технико-экономических исходных данных.

Таким образом, анализ чувствительности, проведенный с помощью программы MESSAGE, показывает, что удельные капитальные затраты на строительство реакторов БН-1200 являются чувствительным фактором в обеспечении конкурентоспособности реактора.

Для успешного функционирования двухкомпонентной системы на основе тепловых и быстрых реакторов в ЗЯТЦ с демонстрацией всех присущих ей преимуществ, превышение удельных капитальных затрат на строительство реакторов БН-1200 по сравнению с усовершенствованным тепловым реактором ВВЭР-1000 должно быть не более 10 % для базового сценария.

Необходимо продолжать НИОКР, направленные на поиск оптимальных путей снижения капитальных затрат реакторов типа БН.

Результаты, представленные на рисунке 8, показывают, что с повышением стоимости производства МОХ-топлива происходит снижение доли быстрых реакторов в ядерной энергетике. Следует отметить, что данный параметр также чувствителен к масштабу развития ЯЭ.

При рассмотренном сценарии развития (100 ГВт(э) к 2050 г.) серьезные изменения в структуре ЯЭ наблюдаются только при увеличении стоимости МОХ-топлива в 2–4 раза.

Полученные результаты исследования показывают, что стоимость производства МОХ-топлива является чувствительным фактором для модели. В настоящее время производство МОХ-топлива обходится дороже, чем производство уранового топлива, что связано, в первую очередь, с большими мировыми запасами дешёвого природного урана, относительной дешевизной и доступностью его обогащения. Эти два фактора приводят к тому, что стоимость обогащенного урана на фоне МОХ-топлива достаточно низка. Другой причиной является более высокая стоимость производства топливных элементов со смешанным топливом.

Стоимость производства 1 кг ТМ топлива АЗ БН-1200 составляет 1000–6000\$ [3], а на практике может оказаться еще выше. Стоимость возрастает при включении в ее структуру накладных расходов по обеспечению безопасности хранения и транспортировки плутония, которая заметно выше аналогичной стоимости для уранового топлива.

Для обеспечения конкурентоспособности реактора БН-1200 необходимо более детальное обоснование себестоимости всех этапов ЯТЦ, и особенное внимание должно быть уделено этапу изготовления смешанного оксидного уран-плутониевого топлива.

Следует отметить, что остается открытым вопрос о стоимости захоронения ОЯТ в геологических формациях. Согласно оценкам, опубликованным в работе [8], стоимость захоронений в геологических формациях варьируется от 400 до 1600 \$/кг. Поэтому в качестве продолжения исследований представляет интерес проведение моделирования открытого ЯТЦ с тепловыми реакторами с включением в модель геологического захоронения ОЯТ.

Выводы

В программе MESSAGE проведено исследование чувствительности сценария развития атомной энергетики России к основным экономическим параметрам с учетом фактора многоизотопности Pu . На основании рассчитанных вариантов структур АЭ России выставлены требования к точности определяющих экономических параметров, используемых в расчётном обосновании конкурентоспособности ядерных технологий. Моделирование экономической эффективности быстрых реакторов показало:

- 1) Повышение базовых удельных капитальных затрат на строительство реакторов на быстрых нейтронах на 50 % приводит к существенному снижению их доли по сравнению с перспективными реакторами на тепловых нейтронах УВВЭР. В этом случае к 2050 году доля быстрых реакторов снижается с 48 до 8 %.
- 2) Увеличение стоимости производства МОХ-топлива на 100 % может привести к существенному удорожанию электроэнергии реакторов на быстрых нейтронах и снижению их доли в общей структуре атомной энергетики России на 6 % уже в 2040 году.
- 3) Удорожание удельных капитальных затрат на строительство заводов по переработке требует дальнейших исследований по определению оптимальной мощности завода по переработке ОЯТ быстрых реакторов.

Список источников

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Web page of the INPRO Section, <http://www.iaea.org/INPRO/CPs/SYNERGIES/index.html>
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability, Final Report of the INPRO Collaborative Project on Global Architectures of Innovative Nuclear Energy Systems with Thermal and Fast Reactors and a Closed Nuclear Fuel Cycle (GAINS), IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.14, Vienna (2013), http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1598_web.pdf
3. Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле. / Под ред. акад. Пономарева-Степного Н.Н. – Техносфера, Москва, 2016.
4. NFCSS Reactor Model (CAIN) <https://infcis.iaea.org/NFCSS/NFCSSMain.asp?EPage=3&RightP=Modeling>
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2, Vienna (2016) <http://www.iaea.org/books>
6. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Приложение № 4. Утверждена распоряжением Правительством РФ от 13.11.2009 г. №1715-р.
7. Uranium 2011: Resources, Production and Demand, ISBN 978-92-64-17803-8, © OECD 2012.
8. Kent Williams David Shropshire. Economic Analysis of “Symbiotic” Light Water Reactor/Fast Burner Reactor Fuel Cycles Proposed as Part of the U.S. Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI) Proceedings of Global 2009 6–11 September, 2009, Paris, France, pp. 2972-2981.

Подписано к печати 10.09.2017 г. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,6.
Тираж 32 экз. Заказ № 281.

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского.