

## ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ К ВОЗМОЖНЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ ВЫБРАННЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

**А.Ф. Егоров\*, В.В. Коробейников\*, Е.В. Поплавская\*, Г.А. Фесенко\*\***

\* ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Оценивается чувствительность сценариев развития ядерной энергетики России к изменениям выбранных экономических индикаторов, влияющих на ее структуру. В модельных сценариях предполагается одинаковым вклад ядерной энергетики в энергетику России. Для исследований стратегий энергоснабжения используется код MESSAGE – программный инструмент МАГАТЭ. В зависимости от изменения экономических параметров исследуется изменение структуры ядерной энергетики.

**Ключевые слова:** моделирование топливного цикла, реактор типа ВВЭР-1000, анализ чувствительности, оптимизация, ядерная энергетика, экономические показатели, реакторы на быстрых нейтронах.

**Key words:** nuclear fuel cycle modelling, VVER-1000 reactor type, sensitivity analysis, optimization, nuclear power, economic parameters, fast reactors.

### ВВЕДЕНИЕ

В России доля ЯЭ в производстве электроэнергии составляет 16,8%. По программе развития энергетики доля атомных станций будет расти, и для того чтобы понять в каком направлении должна двигаться отрасль, необходимо представить как будут 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 работы состояла в попытке оценить как изменения экономических параметров на выбранном отрезке стоимостей, элементов топливного цикла ядерной энергетики смогут повлиять на ее структуру.

Для исследований в области экономики применялся программный комплекс MESSAGE, который широко используется в задачах энергетического планирования. Этот инструмент позволяет определить оптимальную стратегию энергоснабжения с учетом определенных пользователем доступных ресурсов, технологий и ограничений. В рамках данной работы исследовались сценарии развития ядерной энергетики на долгосрочную перспективу, когда значительно обостряются ресурсные

© А.Ф. Егоров, В.В. Коробейников, Е.В. Поплавская, Г.А. Фесенко, 2012

ограничения и возникнет необходимость широкомасштабного ввода реакторов на быстрых нейтронах.

В зависимости от экономических показателей исследовались различные варианты наиболее выгодного сочетания быстрых и тепловых реакторов. Причем возникали ситуации, когда решение оптимизационной задачи линейного программирования математической модели давало вариант, где доля быстрых реакторов под конец модельного периода снижалась при определенных сочетаниях входных экономических параметров. По выбранному ряду индикаторов были проведены оценки и сделаны выводы о необходимом направлении и шагах дальнейших исследований, которые надо предпринять для устойчивого развития ЯЭ.

### **ОБЩАЯ МОДЕЛЬ**

Основными компонентами и элементными составляющими 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 быстрых нейтронах);
- сопутствующая инфраструктура (заводы по производству и переработке топлива, хранилища ОЯТ и радиоактивных отходов). Основными характеристиками (свойствами) элементов системы служили технические и экономические показатели.

Расчетная схема включает в себя основные компоненты ЯТЦ: конверсию, обогащение, изготовление топлива, облучение топлива в реакторе, охлаждение и временное хранение отработавшего топлива, переработку 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 ВВЭР, усовершенствованных ВВЭР (УВВЭР) и быстрых реакторов нескольких типов в зависимости от коэффициента воспроизводства. Остальные выделенные продукты (облученный уран, МА и продукты деления) хранятся и могут быть в дальнейшем использованы или захоронены. Облученное топливо реакторов РБМК не перерабатывается, а находится на временном хранении.

### **Модельные предположения**

Приведенные в работе результаты расчетов получены при следующих модельных предположениях:

- интервал прогнозирования ограничен 2050 г;
- шаг моделирования равен одному году;
- на данном этапе исследования непрерывность ввода мощностей ЯЭ;
- норма дисконтирования – 5%;
- ресурсы урана принимались равными 1 млн. т и были распределены по категориям стоимости.

В базовом сценарии развития ядерной энергетики предполагается выполнение ФЦП [1] до 2020 г. с дальнейшим наращиванием установленной мощности ЯЭ до 100 ГВт к 2050 г.; в высоком сценарии – 170 ГВт (эл) к 2050 г. с учетом экспорта тепловых реакторов. Согласно ФЦП, к 2015 г. установленные мощности внутрироссийских АЭС достигнут величины 34,4 ГВт, к 2020 г. – 42,5 ГВт. В структуре учтена история ввода и вывода реакторов РБМК и ВВЭР. Структура оптимизирована по затратам с 2020 г. В сценарии ввод быстрых реакторов БН-800 осуществляется по одному блоку в 2013, 2018 и 2021 гг. В период 2018–2035 гг. в эксплуатацию

вводятся девять блоков РУ БН-1200. С 2036 г. возможен неограниченный ввод реакторов БН-К-1,2,3 (коммерческая версия реакторов типа БН-1200 с коэффициентами воспроизводства соответственно – 1,2, 1,3, 1,4). В базовом и высоком сценариях доля быстрых реакторов ограничена доступным плутонием, получаемым после переработки отработавшего топлива тепловых реакторов и части оружейного.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УДЕЛЬНЫХ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ РЕАКТОРА БН-1200 НА СТРУКТУРУ ЯЭ

В базовом варианте развития ЯЭ удельные капитальные затраты [2] на строительство реакторов БН-1200 и усовершенствованных реакторов на тепловых нейтронах УВВЭР-1000 были приняты одинаковыми – 1625 долл. США/кВт. Для определения зависимости структуры ЯЭ, т.е. соотношения быстрых и тепловых реакторов, от величины удельных капитальных затрат на строительство реактора БН-1200 были рассмотрены варианты с пошаговым увеличением капитальных затрат на 10% на отрезке 10–50% (табл. 1). Анализ представленных данных показывает, что повышение капитальных затрат реакторов БН на 10% уже приводит к существенному изменению соотношения тепловых и быстрых реакторов в парке ядерной энергетики. К 2050 г. доля быстрых реакторов снизится с 39 до 19%.

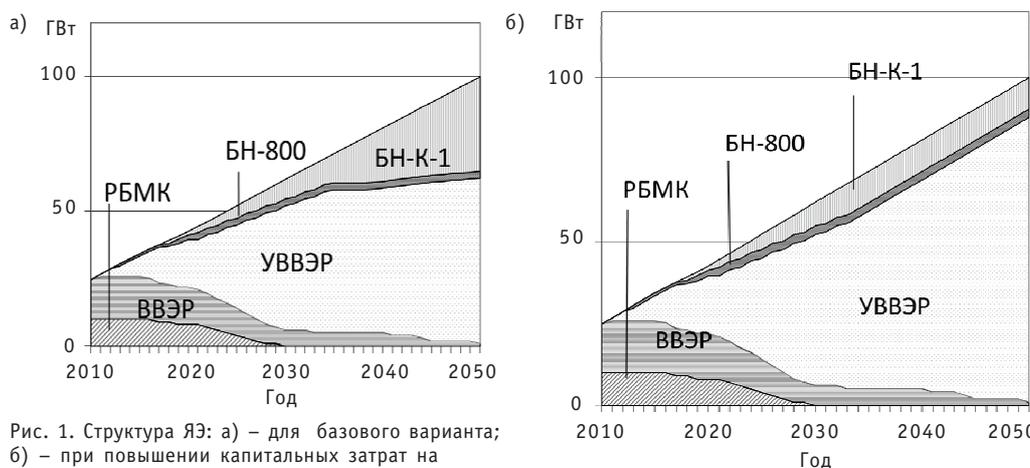
На рисунке 1 показано изменение структуры ЯЭ относительно базового варианта при повышении удельных капитальных затрат на строительство реактора БН-1200 на 50%. Доля перспективных быстрых реакторов остается до 2050 г. на уровне 14–15%.

Таблица 1

#### Оценка влияния увеличения удельных капитальных затрат на строительство реактора БН-1200 на соотношение быстрых и тепловых реакторов в структуре ЯЭ. Базовый сценарий развития

Вариант (рост удельных капитальных затрат, %)	Годы	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Мощность, ГВт(эл)	34,4	42,53	52,27	62	71,5	81	90,5	100
Доля тепловых и быстрых реакторов в парке ЯЭ									
Базовый сценарий	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	0,72	0,61
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	0,28	0,39
10	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,8	<b>0,8</b>	<b>0,81</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,2	<b>0,2</b>	<b>0,19</b>
20	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,82	0,83	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,18	0,17	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>
30	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,83	0,83	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,17	0,17	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>
40	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,83	0,85	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,17	0,15	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>
50	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,83	0,83	<b>0,85</b>	<b>0,87</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,17	0,17	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>

## АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ



Необходимо отметить, что чувствительность к удельным капитальным затратам на строительство блоков быстрых реакторов зависит от масштаба ЯЭ. При рассмотрении высокого сценария (170 ГВт (эл) к 2050 г. с учетом экспорта тепловых реакторов) изменения в структуре ЯЭ в 2050 г. наблюдаются при большем (на 30 – 50%) увеличении удельных капитальных затрат на строительство реакторов БН (табл. 2).

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;

Таблица 2

### Оценка влияния увеличения удельных капитальных затрат на строительство реактора БН-1200 на соотношение быстрых и тепловых реакторов в структуре ЯЭ. Высокий сценарий развития

Вариант (рост удельных капитальных затрат, %)	Годы	2015	2030	2035	2040	2045	2050
		Мощность, ГВт(эл)	34,4	122*	134	146	158
Доля тепловых и быстрых реакторов в парке ЯЭ							
Высокий сценарий	ТР	0,97	0,84	0,81	0,72	0,61	0,54
	БР	0,03	0,16	0,19	0,28	0,39	0,46
10	ТР	0,97	0,84	0,81	0,72	0,61	0,54
	БР	0,03	0,16	0,19	0,28	0,39	0,46
20	ТР	0,97	0,84	0,81	0,79	0,73	0,65
	БР	0,03	0,16	0,19	0,21	0,27	0,35
30	ТР	0,97	0,84	0,82	0,83	0,85	<b>0,84</b>
	БР	0,03	0,16	0,18	0,17	0,15	<b>0,16</b>
50	ТР	0,97	0,84	0,82	0,83	<b>0,85</b>	<b>0,87</b>
	БР	0,03	0,16	0,18	0,17	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>

\*) в предположении объема экспорта на уровне суммарной мощности российских АЭС

- 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.

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ НА СТРОИТЕЛЬСТВО РЕАКТОРОВ УВВЭР НА СТРУКТУРУ ЯЭ**

Для реакторов УВВЭР-1000 было рассмотрено аналогичное увеличение капитальной составляющей в диапазоне от 10 до 50%. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

#### **Оценка влияния увеличения удельных капитальных затрат на строительство УВВЭР-1000 на соотношение быстрых и тепловых реакторов в структуре атомной энергетики. Базовый сценарий развития ЯЭ**

Вариант (рост удельных капитальных затрат, %)	Годы	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Мощность, ГВт(эл)	34,4	42,53	52,27	62	71,5	81	90,5	100
Доля тепловых и быстрых реакторов в парке ЯЭ									
Базовый сценарий	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	0,67	0,61
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	0,38	0,39
10	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	<b>0,61</b>	<b>0,54</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	<b>0,39</b>	<b>0,46</b>
20	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	<b>0,61</b>	<b>0,54</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	<b>0,39</b>	<b>0,46</b>
30	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	<b>0,61</b>	<b>0,54</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	<b>0,39</b>	<b>0,46</b>
40	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	<b>0,61</b>	<b>0,54</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	<b>0,39</b>	<b>0,46</b>
50	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	<b>0,61</b>	<b>0,54</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	<b>0,39</b>	<b>0,46</b>

Расчетные исследования показали, что эффект от увеличения капитальных затрат на строительство перспективных реакторов УВВЭР-1000 начнет проявляться к 2050 г. При этом доля БР в парке ЯЭ увеличивается с 39 до 46%.

На рисунке 2 показано изменение структуры ЯЭ относительно базового варианта при повышении капитальных затрат на строительство реактора УВВЭР-1000 на 50%.

Необходимо отметить, что чувствительность к рассматриваемому параметру также зависит от масштаба развития ЯЭ.

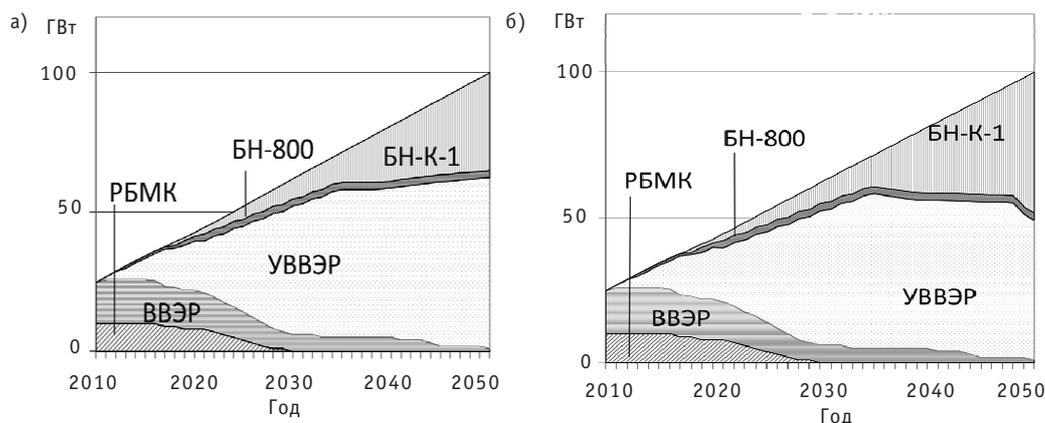


Рис. 2. Структура ЯЭ: а) – для базового варианта; б) – при повышении капитальных затрат на строительство УВВЭР-1000 на 50%

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОПЛИВА НА СТРУКТУРУ ЯЭ

В данном разделе рассматривается влияние переменных затрат на производства МОКС-топлива для реакторов БН-1200 на их конкурентоспособность в сравнении с перспективными тепловыми реакторами. В базовом варианте была принята стоимость изготовления МОКС-топлива, равная 2400\$/кг. Далее было рассмотрено несколько вариантов с увеличенной стоимостью изготовления МОКС-топлива в диапазоне от 30 до 170%. Результаты исследований приведены в табл. 4 и на рис. 3.

Результаты, представленные в табл. 4, показывают, что с повышением стоимости производства МОКС-топлива происходит снижение доли быстрых реакторов в ядерной энергетике. При этом с повышением стоимости на 30% быстрые реакто-

Таблица 4

### Оценка влияния увеличения стоимости МОХ-топлива на соотношение быстрых и тепловых реакторов в структуре ЯЭ

Вариант (рост переменных затрат, %)	Годы	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Мощность, ГВт(эл)	34,4	42,53	52,27	62	71,5	81	90,5	100
Доля тепловых и быстрых реакторов в парке ЯЭ									
Базовый сценарий	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	0,67	0,62
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	0,33	0,38
30	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	<b>0,81</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	<b>0,19</b>	<b>0,2</b>	<b>0,19</b>
40	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	<b>0,82</b>	<b>0,83</b>	<b>0,84</b>	<b>0,86</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	<b>0,18</b>	<b>0,17</b>	<b>0,16</b>	<b>0,14</b>
50	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	<b>0,83</b>	<b>0,83</b>	<b>0,85</b>	<b>0,87</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>
170	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	<b>0,84</b>	<b>0,83</b>	<b>0,85</b>	<b>0,87</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	<b>0,16</b>	<b>0,17</b>	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>

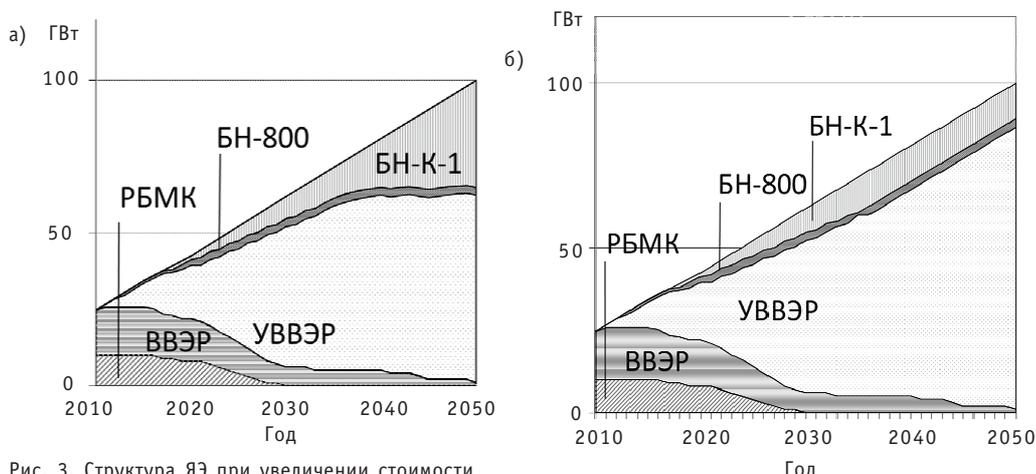


Рис. 3. Структура ЯЭ при увеличении стоимости производства МОКС-топлива: а) – на 30%; б) – в 2,7 раза

ры продолжают играть важную роль, а при дальнейшем повышении стоимости производства МОКС-топлива они вытесняются с рынка, что проиллюстрировано на рис 3.

Следует отметить, что данный параметр также чувствителен к масштабу развития ЯЭ.

При высоком сценарии развития (170 ГВт(э) к 2050 г.) серьезные изменения в структуре ЯЭ наблюдаются только при увеличении стоимости МОКС-топлива в два-три раза.

Полученные результаты исследования показывают, что стоимость производства МОКС-топлива является чувствительным фактором для модели. В настоящее время производство МОКС-топлива обходится дороже, чем производство уранового топлива, что связано, в первую очередь, с большими мировыми запасами дешевого природного урана, относительной дешевизной и доступностью его обогащения. Эти факторы приводят к тому, что стоимость обогащенного урана на фоне МОКС-топлива достаточно низка. Другой причиной является более высокая стоимость производства топливных элементов со смешанным топливом. Минимальная стоимость производства 1 кг топлива составляет 1300 – 1600\$, а на практике оказывается еще выше. Стоимость возрастает при включении в нее стоимости мероприятий 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 особое внимание должно быть уделено этапу изготовления смешанного оксидного уран-плутониевого топлива.

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗАВОДОВ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОЯТ НА СТРУКТУРУ ЯЭ**

В базовом варианте заложены удельные капитальные инвестиции в сооружение завода по переработке ОЯТ – 4700 \$/кг. В таблице 5 приведены результаты исследования по влиянию увеличения удельных капитальных затрат на строительство заводов по переработке ОЯТ на 50% и в 2 раза. Представленные результаты показывают, что к 2050 г. произойдет снижение доли быстрых реакторов с 0,38 до 0,27 и 0,2 соответственно. Результаты проиллюстрированы на рис. 4.

**Оценка влияния увеличения удельных капитальных затрат строительства заводов по переработке ОЯТ на соотношение быстрых и тепловых реакторов в структуре атомной энергетики**

Вариант (рост удельных капитальных затрат, %)	Годы	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Мощность, ГВт(эл)	34,4	42,53	52,27	62	71,5	81	90,5	100
Доля тепловых и быстрых реакторов в парке ЯЭ									
Базовый сценарий	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	0,72	0,67	0,62
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,28	0,33	0,38
50	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	<b>0,79</b>	<b>0,78</b>	<b>0,73</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	<b>0,21</b>	<b>0,22</b>	<b>0,27</b>
100	ТР	0,97	0,93	0,86	0,84	0,81	<b>0,81</b>	<b>0,80</b>	<b>0,80</b>
	БР	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	<b>0,19</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>

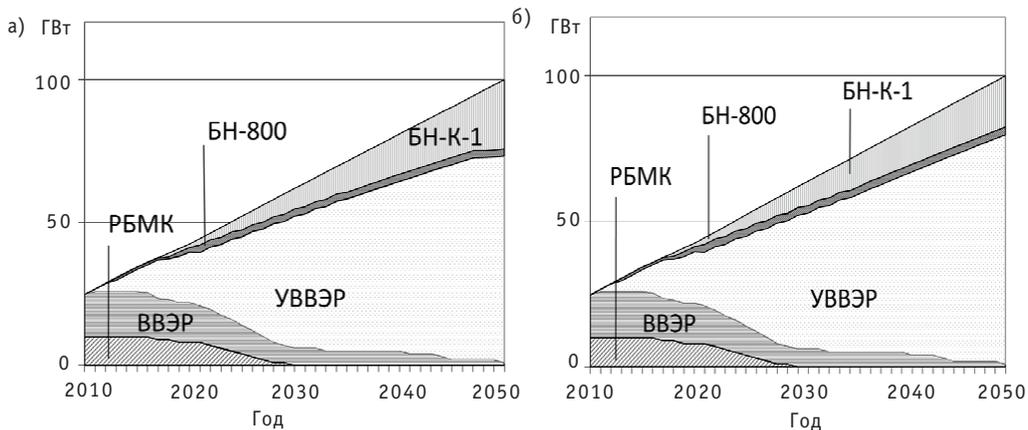


Рис. 4. Структура ЯЭ при увеличении удельных капитальных затрат строительства заводов по переработке ОЯТ: а) – на 50%; б) – на 100%

Немаловажной является проблема влияния эксплуатационных затрат на стоимость переработки ОЯТ. В данной работе этот вопрос не рассматривался, поскольку предполагалось, что эксплуатационные затраты отнесены к затратам на производство МОКС-топлива.

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТОИМОСТИ ХРАНЕНИЯ ОЯТ ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ ЯЭ**

В базовом варианте модели с переработкой ОЯТ заложена стоимость хранения ОЯТ 10\$/кг год. Согласно зарубежным данным стоимость хранения ОЯТ варьируется от 5 до 20\$/кг год. Это экспертные оценки. В то же время согласно данным, опубликованным в отчете AFC Cost Basis report [3], стоимость хранения ОЯТ в сухом хранилище варьируется от 100 до 300\$/кг год. Проведенные исследования показали, что увеличение стоимости хранения ОЯТ в 10 раз приводит к увеличению доли быстрых реакторов в структуре ЯЭ на 20%. Полученные результаты представлены на рис. 5.

Следует отметить, что, остается открытым вопрос о стоимости захоронения ОЯТ в геологических формациях. Согласно оценкам, опубликованным в работе [4],

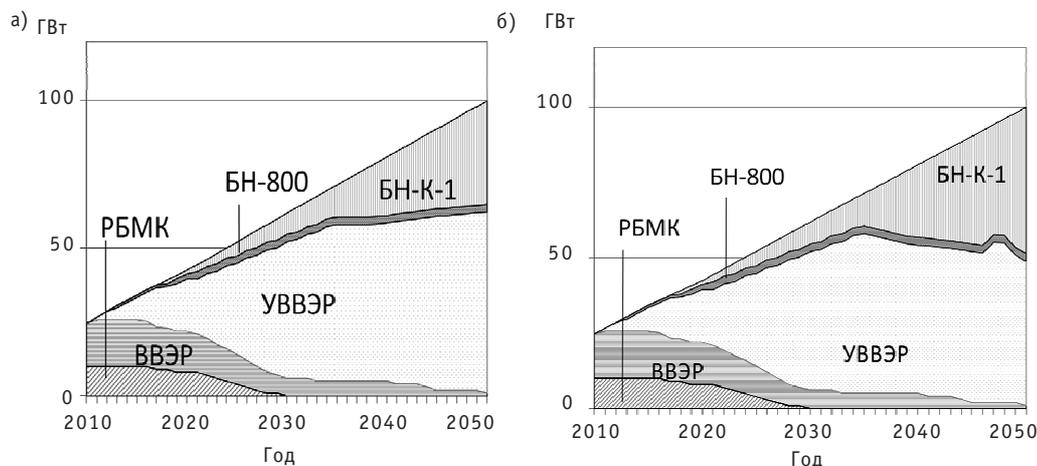


Рис. 5. Структура ЯЭ: а) – для стоимости хранения ОЯТ 10 \$/кг год (базовый вариант); б) при увеличении стоимости хранения ОЯТ до 100 \$/кг год

стоимость захоронений в геологических формациях варьируется от 400 до 1600 \$/кг год. Поэтому в качестве продолжения исследований представляет интерес по проведению моделирования открытого ЯТЦ с тепловыми реакторами с включением в модель геологического захоронения ОЯТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках использованного программного обеспечения MESSAGE и на основании имеющихся в открытой отечественной и зарубежной литературе данных о стоимостях реакторных технологий и этапов ЯТЦ авторы пришли к следующим выводам.

- Повышение удельных капитальных затрат на строительство реакторов на быстрых нейтронах на 10% уже приводит к снижению их доли в базовом сценарии по сравнению с перспективными реакторами на тепловых нейтронах УВВЭР.
- Высокая стоимость производства МОКС-топлива может привести к существенному удорожанию технологии реакторов на быстрых нейтронах и значительному снижению их доли по сравнению с базовым вариантом.
- Уменьшение доли быстрых реакторов происходит при увеличении удельных капитальных затрат на строительство заводов по переработке более чем на 60%.
- Увеличение стоимости хранения ОЯТ в 10 раз не приводит к серьезным изменениям в структуре ЯЭ. Тем не менее, остается открытым вопрос о стоимости захоронения ОЯТ ВВЭР в геологических формациях, поэтому целесообразно провести моделирование с включением геологического захоронения ОЯТ.

## Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Приложение №4. Утверждена распоряжением Правительством РФ от 13.11.2009 г. №1715-р.
2. IAEA-TECDOC-1575 Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems INPRO Manual Economics Volume 2 of the Final Report of Phase 1 of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) 2007.
3. Nuclear Energy Agency (NEA), Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, OECD-Paris, 2006.
4. 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.

Поступила в редакцию 2.03.2012

*(Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.*

Dynamic processes in thermal insulation of power plants pipelines caused by depressurization are the goal of the research. Simulation of various leaks was realized by using adapted computer code «KUPOL-M» developed in SSC RF IPPE.

#### **УДК 621.039.7**

*Assessment and prognosis of radioecological impact of the radioactive wastes storage sites of the «North-West Territorial District» Leningrad branch of FGUP «RosRAO» | I.I. Kryshev, A.Y. Pahomov, S.N. Brykin, V.G. Boulgakov, T.G. Sazykina, I.A. Pahomova, I.S. Serebryakov, N.S. Roznova, A.I. Kryshev, I.Y. Gaziev, K.V. Lunyova, M.A. Dmitrieva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 7 tables, 2 illustrations. – References, 11 titles.*

Analysis of radioecological situation was performed for the territories located near the radioactive waste storage sites of the «North-West Territorial District» Leningrad branch of FGUP «RosRAO». The planned annual dose from the regular releases is estimated to be  $1,1 \cdot 10^{-4}$  mSv/year, which is two orders of magnitude lower than the level of negligible radiation risk. At present, annual doses are considerably lower than the permissible dose limits; they do not exceed 1-2% of the natural radiation background. Hypothetical scenario of radiation accident was developed; it was shown the absence of territories where obligatory measures of radiation protection of population should be applied in the case of such scenario. Outside the working areas dose rates to biota do not exceed the natural background levels.

#### **УДК 621.039.003**

*Assessment of Russia Nuclear Power Development Model Sensitivity Analysis to Possible Changes of Selected Economic Parameters | A.F. Egorov, V.V. Korobeynikov, E.V. Poplavskaya, G.A. Fesenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.*

Different variants of Russia nuclear power development scenarios are compared. The major technical and economic indicators are taken into account. In scenarios at price change for separate components of the system balance between thermal and fast reactors is changing, quantity of plutonium, quantity of demanded natural uranium, spent fuel volumes and a radioactive waste are estimated.

#### **УДК 621.039.534**

*Iron Oxide Reference Electrodes in Solid Electrolyte Sensors Designed to Control the Thermodynamic Activity of Oxygen | P.N. Martynov, R.Sh. Askhadullin, K.D. Ivanov, M.E. Chernov, V.V. Ylyanov, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, R.Yu. Cheporov, S.-A.S. Niyazov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.*

The paper presents results on the use of iron oxide reference electrode in the oxygen activity sensors used to measure the oxygen activity in heavy liquid metal coolants. The specific features of the operation of the sensor with iron oxide reference electrode are established and comparative characteristics with respect to other applicable reference electrodes are presented. Conclusions on the reasonability of its use for measurement of oxygen activity in liquid metal media are drawn.

#### **УДК 621.039.534**

*Peculiarities of Metrological Calibration of Oxygen Activity Sensors in Liquid Metal Coolants | P.N. Martynov, R.Sh. Askhadullin, A.N. Storozhenko, M.E. Chernov, V.V. Ylyanov, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, P.V. Kuzin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 5 titles.*