

## Оценка стоимости активной зоны на предпроектной стадии

Е. Г. Будылов

На предпроектной стадии получить информацию о стоимости активной зоны от производителей топлива для ядерных энергоблоков, идея сооружения которых родилась вот только что, практически нереально. Да и сделать им такую оценку с хорошей достоверностью вряд ли удастся, т. к., как правило, такие оценки выполняются основе стоимостных характеристик имеющихся в производстве прототипов. А они зависят как от конкретных особенностей продукции, чаще всего не совпадающих с новой продукцией, так и от объёмов производства выпускаемой продукции.

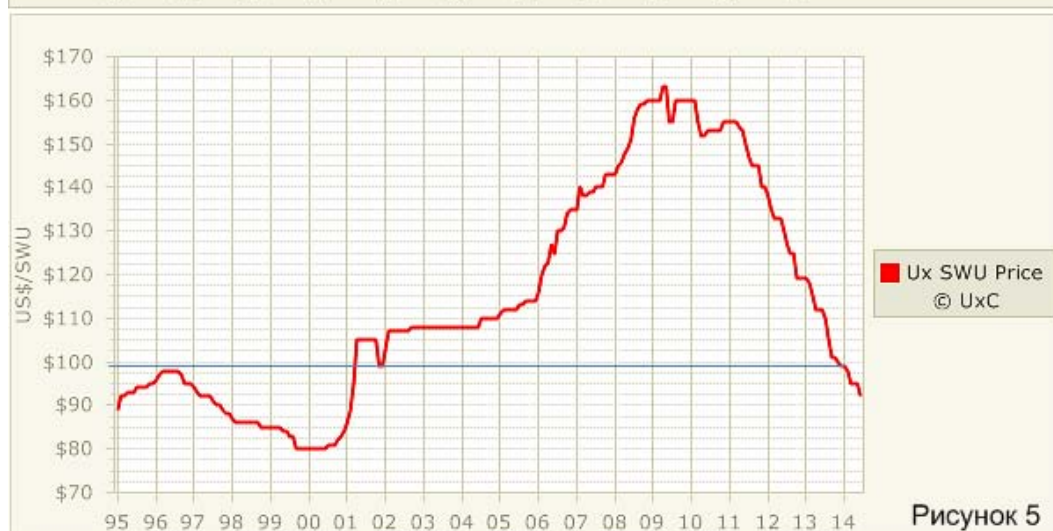
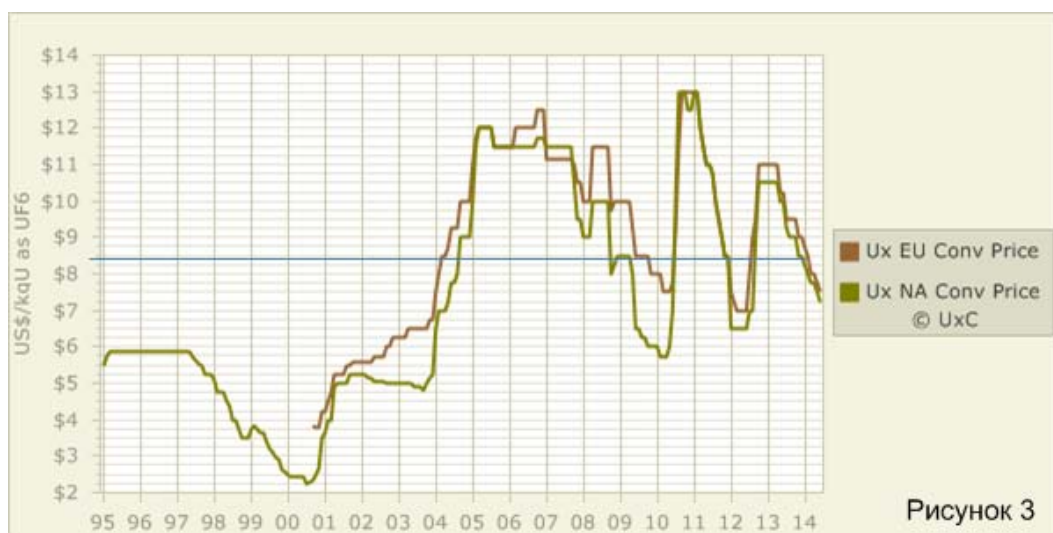
Методически предлагаемая оценка стоимости активной зоны на предпроектной стадии основана на тех же известных сведениях, что использованы в работе [1] для оценки величины топливной составляющей в себестоимости электроэнергетики.

К указанным сведениям следует отнести удельные стоимости – цены на продукты дореакторных стадий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), а именно:

- природного урана ( $C_{U_{\text{п}}}$ ),
- конверсии природного урана до  $UF_6$  ( $C_K$ ),
- обогащения по  $^{235}U$  до требуемых средних значений ( $C_{\text{ЕРР}}$ ),
- изготовления топливного материала ( $UO_2$ ) с заданным обогащением ( $C_{\text{ТМ}}$ ).

Информация по указанным стоимостям, представленная в различных работах [2, 3 и 4], не позволяет сделать выбор какого-либо одного значения, поэтому предпочтительнее обратиться к источнику [5], который даёт удельные стоимости в графическом виде с 1988 или 1995 по 2014 г. (см. рисунки 1 – 5).





Значения стоимостей, снятые с этих графиков представлены во втором столбце таблицы 1.

Значение стоимости природного урана (рис. 1 и 2) в 2014 г. с незначительной погрешностью близко к 35 \$/фунт или 77,2 \$/кг, что соответствует 2 695 руб./кг в переводе по среднему текущему курсу доллара на 23.07.2014 равному 34,9216 руб./\$.

Значение стоимости конверсии представлено на рис. 3, которое применительно к 2014 г. близко к 8,5 \$/кг или 297 руб./кг.

Значение стоимости обогащения или ЕРР представлено на рис. 5, которое применительно к 2014 г. близко к 99,2 \$/ЕРР или 3 464 руб./ЕРР.

К сожалению, в источнике [5] не удалось найти стоимость изготовления исходного топливного материала  $UO_2$  с заданным обогащением.

Полученные значения указанных стоимостей представлены в таблице 1 в сравнении с аналогичными данными из других источников.

Таблица 1 – Удельные стоимости дореакторных стадий (ЯТЦ)

Дореакторные стадии ЯТЦ	[5] цены 2014	[2] цены мая 2013	[3] цены <sup>1</sup> 1990	[4] цены <sup>1</sup> 2011	[4] цены <sup>1</sup> 2011
Природный уран, руб.(\$)/кг	2 695 (77,2)	1 400 (45,5)	(50)	(160)	(143,3)
Конверсия, руб.(\$)/кг	297 (8,5)	336 (10,9)	(8)	(13)	(12,5)
Обогащение, руб.(\$)/ЕРР	3 464 (99,2)	3 750 (121,9)	(110)	(160)	(155)
Изготовление топлива ( $UO_2$ ), руб.(\$)/кг	<sup>2</sup> 7 689 (219,1)	6 740 (219,1)	(275)	(300)	(460)

Для дальнейших расчётов примем стоимость изготовления исходного топливного материала с заданным обогащением по данным источника [2], подкорректировав её по соотношению средних текущих курсов доллара на конец мая 2014 г. – 35,0972 руб./\$ и 2013 г. – 30,7659 руб./\$.

В дополнение к указанной информации необходимо использовать сведения о количестве единиц работы разделения (ЕРР), необходимых для достижения требуемого среднего обогащения в активной зоне и соотношение масс природного урана к обогащённому ( $\frac{U_{\text{П}}}{U_0}$ ). Эти сведения представлены в виде таблиц КАЭ США в [6].

Таблица 2 – Часть таблицы КАЭ США для содержания  $^{235}\text{U}$  в отходах обогащения 0,2 %

Обогащение по $^{235}\text{U}$ , %	$\frac{U_{\text{П}}}{U_0}$	ЕРР
4,5	8,415	7,690
4,6	8,611	7,922
4,8	9,002	8,385
5,0	9,393	8,851
6,0	11,350	11,268
10,0	19,178	20,863
15,0	28,963	33,225
20,0	38,748	45,547
25,0	48,532	58,369

По представленным в таблице 2 значениям (кроме строки 6 % обогащения) построены графики (см. рисунок 6) зависимостей ЕРР и  $\frac{U_{\text{П}}}{U_0}$  от величины требуемого обогащения топливного материала для загрузки активной зоны. На рисунке даны формулы линий трендов, по которым вычислены значения ЕРР и  $\frac{U_{\text{П}}}{U_0}$  для 6 % обогащения, заданного для энергоблока с установленной электрической мощностью 10 МВт, и добавлены в таблицу 2.

<sup>1</sup> - как дата выпуска источника

<sup>2</sup> - пересчётом с источника [2]

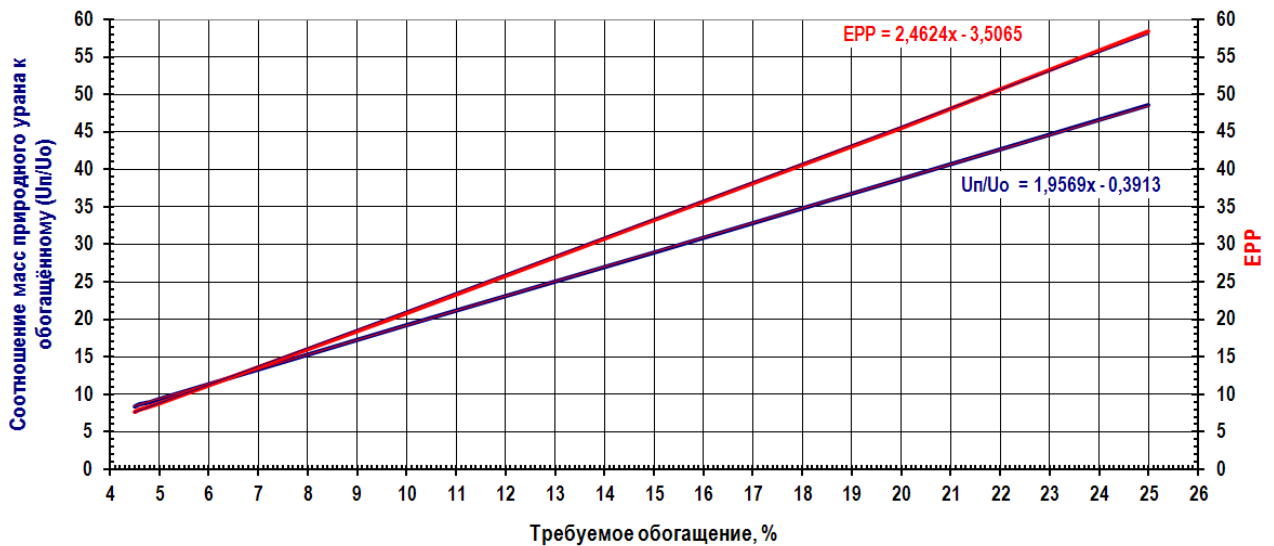


Рисунок 6 Графики зависимостей от требуемого обогащения EPP (верхний) и соотношения масс природного урана к обогащённому (нижний) и их формулы.

Ещё одно необходимое дополнение к указанным выше исходным данным для оценки стоимости активных зон - это технические характеристики разрабатываемых энергоблоков трёх уровней мощности (см. таблицу 3), такие как:

- масса загрузки  $^{235}\text{U}$ ,
- среднее обогащение топлива по  $^{235}\text{U}$ .

Таблица 3 – Некоторые технические характеристики энергоблоков трёх уровней установленной электрической мощности.

Электрическая мощность АСММ ТГГТ, МВт (нетто)	0,15	1,00	10,00
Масса загрузки $^{235}\text{U}$ ( $Z_{235U}$ ), кг	100	120	140
Обогащение по $^{235}\text{U}$ ( $O_{235U}$ ), %	20	10	6
Масса загрузки ураном, заданного обогащения ( $Z_U$ ), кг	500,0	1 200,0	2 333,3
Число твэл в активной зоне, шт.	2 052	3 996	6 588
Масса обогащённой $\text{UO}_2$ в твэле, кг	0,2437	0,3003	0,3542

Представленные в таблице 3 технические характеристики энергоблоков оценены по результатам предварительных физических расчётов, а масса загрузки ураном, заданного обогащения вычислена как:

$$Z_U = \frac{Z_{235U}}{O_{235U}} \quad (1)$$

По значениям требуемого среднего обогащения по  $^{235}\text{U}$  ( $O_{235U}$ ) из таблицы 3, применяя таблицы КАЭ США из [6] для 0,2 % содержания  $^{235}\text{U}$  в обеднённом уране (см. таблицу 2, строки, выделенные цветом), найдём количество EPP и массу природного урана ( $M_{Uп}$ ), необходимую для конверсии и обогащения:

$$M_{Uп} = \frac{Uп}{U_0} \times Z_U \quad (2),$$

Значения EPP и  $M_{Uп}$  для рассматриваемых энергоблоков приведены в таблице 4.

Стоимость производства природного топливного материала в объёмах, необходимых для загрузки активных зон энергоблоков АСММ ТГГТ соответствующих мощностей определится как:

$$C_{Uп} = M_{Uп} \times c_{Uп} \quad (3)$$

Стоимость конверсии указанного объёма этого материала определится как:

$$C_K = M_{U_{II}} \times c_K \quad (4)$$

Стоимость обогащения определится по значению ЕРР для соответствующего обогащения по  $^{235}\text{U}$ :

$$C_{ЕРР} = \text{ЕРР} \times c_{ЕРР} \quad (5)$$

Стоимость получения обогащённого топливного материала в виде  $\text{UO}_2$  в объёмах, необходимых для загрузки активных зон энергоблоков АСММ ТГГТ соответствующих мощностей определится как:

$$C_{TM} = Z_U \times c_{TM} \quad (6)$$

Таблица 4 – Результаты оценки стоимостей активных зон энергоблоков АСММ ТГГТ

Электрическая мощность АСММ ТГГТ, МВт (нетто)	0,15	1,00	10,00
ЕРР	45,5	20,9	11,3
Масса природного U для конверсии и обогащения, кг	19 374,0	23 013,6	26 483,3
Стоимость природного урана, тыс. руб.	52 212,9	62 021,7	71 372,6
Стоимость конверсии, тыс. руб.	5 754,1	6 835,0	7 865,6
Стоимость обогащения, тыс. руб.	157,8	72,3	39,0
Стоимость изготовления топлива ( $\text{UO}_2$ ), тыс. руб.	3 844,5	9 226,8	17 941,0
Стоимость топлива в активной зоне, млн. руб.	62,0	78,2	97,2
Стоимость изготовления твэлов, млн. руб.	1,4	3,4	6,6
Стоимость активной зоны, млн. руб.	63,4	81,5	103,8

Общая стоимость загрузки активной зоны обогащённым топливным материалом будет равна сумме стоимостей этапов ЯТЦ, вычисленных по выражениям (3 – 6):

$$C_{Z_U} = C_{U_{II}} + C_K + C_{ЕРР} + C_{TM} \quad (7)$$

Результаты вычисления по формуле (7) представлены в таблице 4 в 3-й строке снизу.

Для оценки стоимости активной зоны нужно добавить к  $C_{Z_U}$  стоимость фабрикации твэлов и кассет. Информацию об этом удалось найти в работе [7], выборка из которой представлена на рисунке 7 и в таблице 5.

Из рисунка 7 для стальных оболочек твэлов диаметром ~9 мм видно, что диапазон удельных стоимостей изготовления твэлов  $C_{\Phi}$  имеет значения в диапазоне 65-80 \$/кг топливной композиции. Причём практически половину этой стоимости составляет стоимость конструкционных материалов, как показано в таблице 5.

Поскольку вряд ли удастся найти ещё и удельную стоимость фабрикации кассет, примем в качестве оценочного значения удельной стоимости фабрикации твэлов её верхнее значение  $C_{\Phi} = 80$  \$/кг. Затраты на изготовление твэлов в количестве, необходимом для активной зоны, могут быть вычислены по выражению (8):

$$C_{\Phi} = c_{\Phi} \times Z_U \quad (8)$$

Результаты вычисления этих затрат по формуле (8) представлены в таблице 4 во 2-й строке снизу.

Стоимость активной зоны в целом определится из выражения (9):

$$C_{AZ} = C_{3U} + C_{\Phi} \quad (9)$$

Результаты вычисления по формуле (9) представлены в нижней строке таблицы 4.

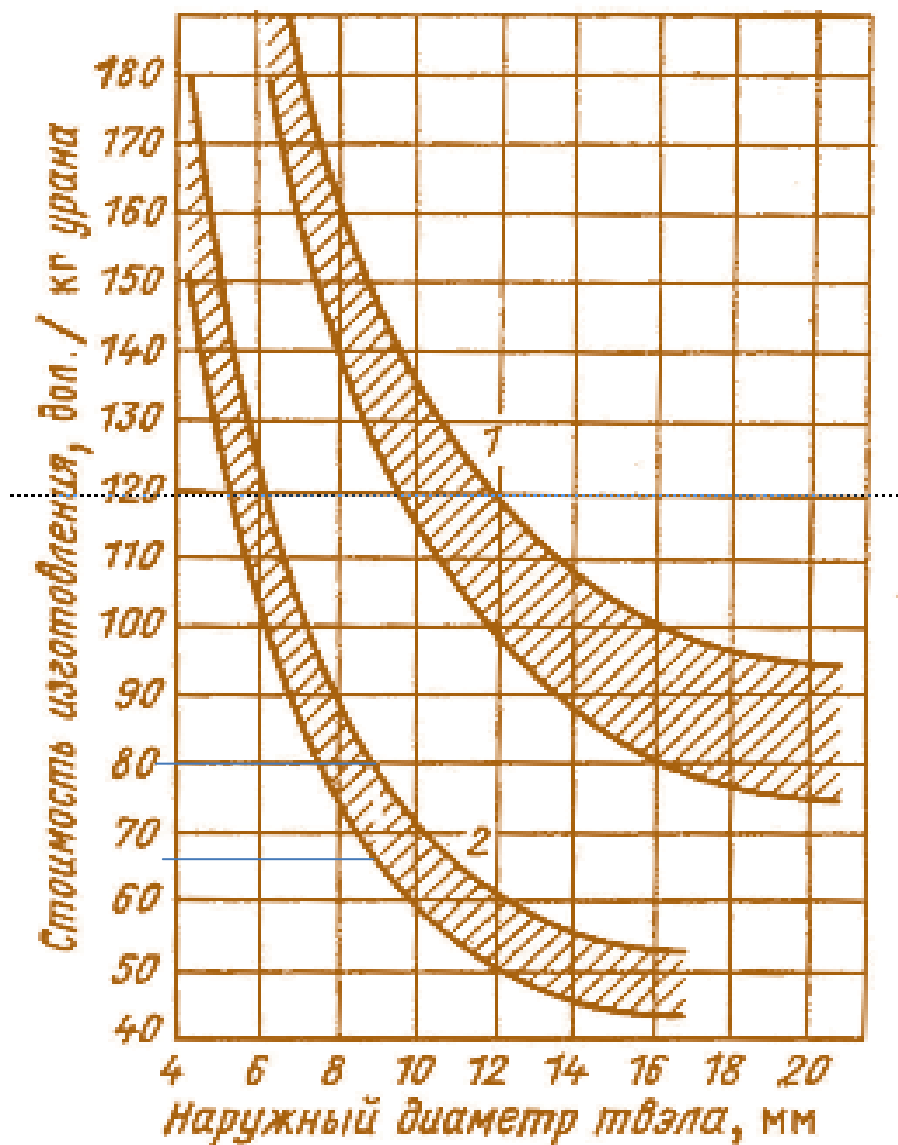


Рисунок 7 - Зависимость затрат на изготовление твэлов из  $UO_2$  в оболочках из циркониевых сплавов (1) и нержавеющей стали (2) от диаметра твэла

Таблица 5 - Структура затрат при изготовлении твэлов из  $UO_2$  в зависимости от производственной мощности завода, %

Компоненты затрат	Производственная мощность, т/год (по обогащенному урану)		
	100	250	500
Подготовка порошка $UO_2$	5,2	4,6	4,5
Производство таблеток	9,1	7,4	6,3
Подготовка стержней (оболочек) твэлов и концевых деталей	10,0	9,8	9,5
Снаряжение твэлов топливными таблетками	3,9	3,7	3,5
Контрольные операции	8,2	7,4	6,6
Анализы	1,2	1,0	1,1



Компоненты затрат	Производственная мощность, т/год (по обогащенному урану)		
	100	250	500
Утилизация отходов	2,4	2,3	2,5
Потери урана (~0,8%)	3,0	3,3	3,5
Амортизация (5,5% в год)	10,6	9,8	8,5
Конструкционные материалы (оболочки, комплектующие сборные детали)	46,4	50,7	54,0
	100,0	100,0	100,0

Таким образом, представленный выше алгоритм оценки стоимости активной зоны ядерного энергоблока на предпроектной стадии позволяет при минимальных проектных оценках физических характеристик энергоблока, относящихся к активной зоне: масса загрузки  $^{235}\text{U}$ , и среднее обогащение топлива по  $^{235}\text{U}$  – получить оценочное значение стоимости активной зоны, которое необходимо для последующих оценок эффективности проекта рассматриваемого энергоблока.

Достоверность такой оценки стоимости активной зоны в значительной степени зависит от достоверности удельных стоимостей продуктов, получаемых на дореакторных стадиях ЯТЦ и удельной стоимости фабрикации твэлов и кассет.

Следует иметь в виду, что стоимости активных зон рассматриваемых энергоблоков, приведенные в таблице 4, оценены на основе мировых стоимостных характеристиках дореакторных стадий ЯТЦ.

Оценка того, как они корреспондируются с внутрироссийскими стоимостными характеристиками дореакторных стадий ЯТЦ, не входило в задачу настоящей работы, но одну точку с 20 % обогащением проверить можно посредством пересчёта данных о стоимости активной зоны БНГТ-250 из отчёта ОАО "ОКБМ им. И. И. Африкантова" [8].

В нём (таблица 7.3) показано, что стоимость активной зоны на кампанию 4,5 эффективных года при КИУМ=0,85 составляет 1 859,7 млн. руб. (внутренние цены 2006 г.). Во внешних ценах её стоимость существенно выше - 5 001,9 млн. руб.

В той же таблице приведена стоимость 1-й сборки – 3 138 тыс. руб. Что при количествеборок – 552 шт., указанное в таблице 7.2 отчёта, даст стоимость активной зоны – 1 732,176млн. руб. (внутренние цены 2006 г.).

В пересчёте к 2014 г. по среднегодовым курсам доллара эти стоимости возросли бы в 1,29 раза до значений соответственно 2 389,88 и 2 226,00 млн. руб.

Число твэлов в сборках БНГТ-250 – 127. Количество твэлов в активной зоне определится как произведение числаборок на число твэлов в них – 70 104 шт.

Масса  $^{235}\text{U}$  в активной зоне БНГТ-250 составляет 3 247 кг, а масса  $^{238}\text{U}$  – 12 989 кг. Суммарный вес топлива составит 16 236 кг.

Таким образом, стоимость каждого килограмма 20 %  $\text{UO}_2$  в активной зоне БНГТ-250 вместе с конструктивными элементами твэлов иборок имеет значения в диапазоне 137,103÷147,196 тыс. руб./кг.

В активной зоне ТГГТ-0,15 масса загрузки обогащённым до 20 % топливом составляет 500 кг, следовательно, стоимость активной зоны в пересчёте с БНГТ-250 составит 68,6÷73,6 млн. руб., что на 8,2÷16,1 % больше, чем было вычислено по предложенному выше алгоритму (см. таблицу 4).

Погрешность в оценках ниже 20 % на предпроектной стадии считается вполне приемлемой, что позволяет признать значения стоимостей активных зон из таблицы 4 применимыми в последующих оценках эффективности проектов рассматриваемых энергоблоков.

## Список литературы

- 1 Л. Н. Решетникова, Л. С. Гостева, О. С. Гурская "Оценка динамики топливной составляющей стоимости электроэнергии в тепловых и быстрых реакторах при прогнозируемых ценах на природный уран", отчёт о НИР ФГУП "ГНЦ РФ-ФЭИ", инв. № 10906, 2001
- 2 [WWW document] [http://ru.wikipedia.org/wiki/Uraniun\\_Enrichment](http://ru.wikipedia.org/wiki/Uraniun_Enrichment) и Uranium Enrichment (<http://www.webcitation.org/6HiwkDo4n>)
- 3 Экономика ядерного топливного цикла, Агентство по ядерной энергии, организация экономического сотрудничества и развития Москва, 1999 [WWW document] <http://sng-atom.com/sites/default/files/books/экономика%20ядерного%20топливного%20цикла.pdf>
- 4 Л. Андреев "Об экономике российской ядерной электроэнергетики", доклад объединения Bellona, 2011 [WWW document] [http://www.bellona.ru/filearchive/fil\\_economy\\_05\\_BW\\_obl.pdf](http://www.bellona.ru/filearchive/fil_economy_05_BW_obl.pdf)
- 5 Сайт The Ux Consulting Company [WWW document] <http://www.uxc.com/>, <http://www.uxc.com/review/UxCPriceChart.aspx?chart=spot-u3o8-full>, <http://www.uxc.com/review/UxCPriceChart.aspx?chart=spot-u3o8-2yr>
- 6 Н. М. Синев "Экономика ядерной энергетики", 3-е издание, М., Энергоатомиздат, 1987 [WWW document] <http://mexalib.com/view/17590>
- 7 К. Б. Денисевич, Ю. А. Ландау, В. А. Нейман и др. "Энергетика. Развитие атомной энергетики и объединенных энергосистем", книга 4 [WWW document] <http://energetika.in.ua/ru/books/book-4/part-1/section-6/6-2/6-2-4>
- 8 Расчётный анализ и конструкторские проработки реакторной установки БНГТ, отчёт о НИР ОАО "ОКБМ им. А. А. Африкантова", 2007