



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Доклад на научно-техническую конференцию «Нейтроника-2019»
«К вопросу о цене плутония в двухкомпонентной ЯЭС»

В.М. Декусар , О. С. Гурская

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск

27-29 ноября 2019 г.

г. Обнинск

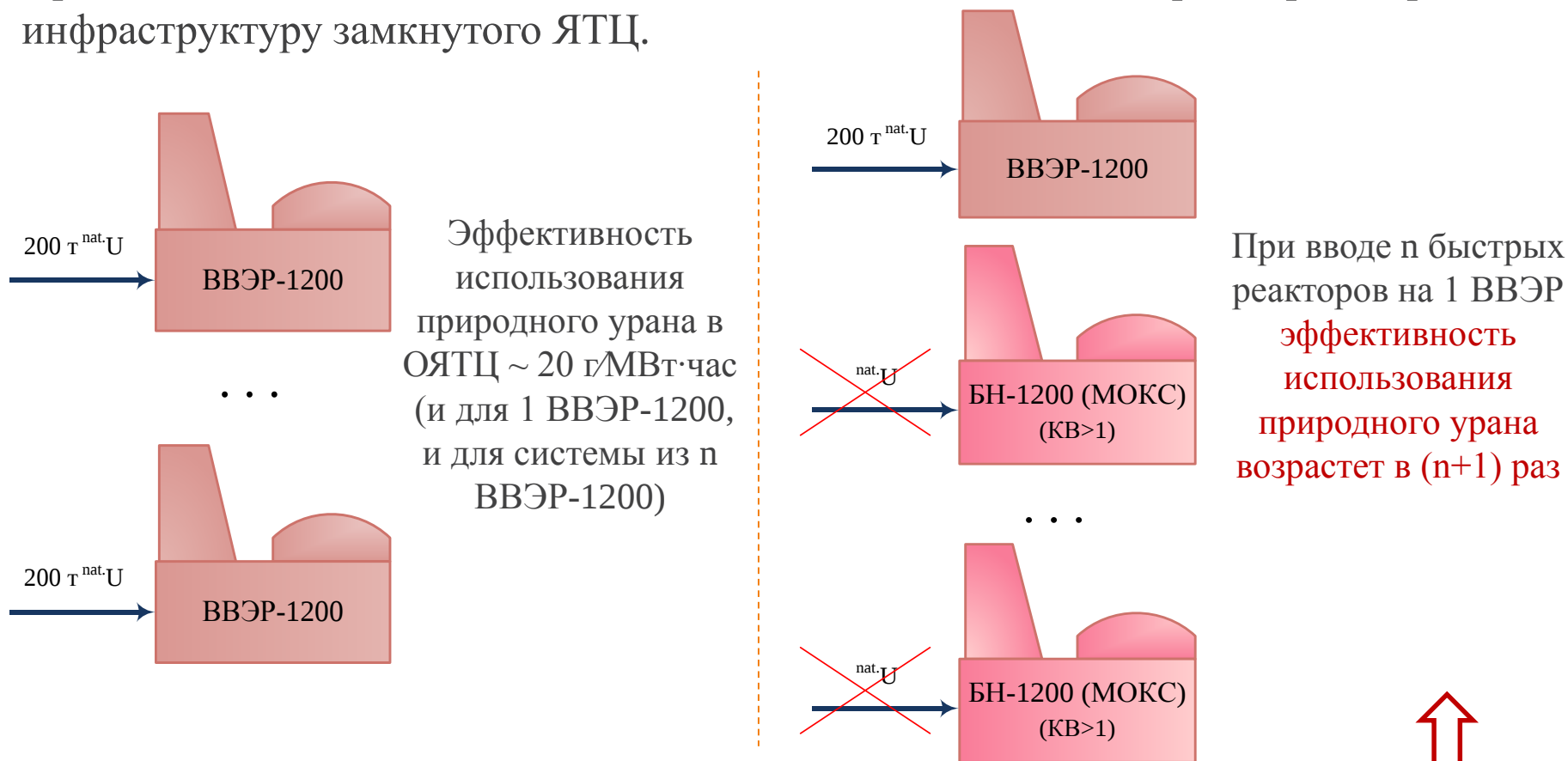
- Замыкание ядерного топливного цикла АЭ приводит к появлению в ЯЭС второго, помимо энергии, продукта – вторичных ядерных материалов, извлекаемых из ОЯТ, в первую очередь плутония.
- Производство плутония в настоящее время никак не учитывается при оценках технико-экономических показателей АЭС. Разделить затраты на производство электроэнергии и производство плутония, которое всегда имеет место при облучении ядерного топлива на основе урана, при этом практически невозможно.

Введение *(продолжение)*

- Для правильной и полной оценки роли быстрых реакторов необходим технико-экономический критерий, характеризующий уникальное качество быстрого реактора – возможность расширенного воспроизводства ядерного горючего.
- В работе излагается возможная расчетная методика для определения стоимости плутония, базирующаяся на системном подходе, при котором учитывается возможный рост доходов в ЯЭС за счет роста продаж вовне природного урана, обусловленного его экономией при замене тепловых реакторов быстрыми реакторами на МОКС-топливе.

Предлагаемый подход

Предполагается, что ЯЭС включает АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и инфраструктуру замкнутого ЯТЦ.



При этом высвобождается $n/(n+1) \text{ T}^{\text{nat.U}}$ от его количества, потребляемого 1 ВВЭР-1200. Высвобождаемый $\text{T}^{\text{nat.U}}$ имеет конкретную рыночную стоимость.

Дополнительный доход

Дополнительный доход может быть определен через рыночную цену высвобождаемого ^{nat}U (или $^{обог.}U$, или ТВС для ВВЭР ...)

*Дисконтированный доход $E_{доп}$,
получаемый за весь проектный
ресурс энергоблока длительностью
 L за счет экономии природного урана*

$$E_{дон.} = \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t_0+L+\Delta t} \frac{C_{дон} \cdot (1 + es_{дон})^{(t-t_0)} \cdot G_{дон}(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}},$$

t_0 – базовая дата (обычно это момент пуска реактора в эксплуатацию);

L – длительность жизненного цикла АЭС;

r – норма дисконтирования;

$C_{доп}$ – удельная стоимость продукции, поступающей на рынок (природный уран, ТВС), за счет которой обеспечивается дополнительный доход, US\$/кг;

$es_{доп}$ – годовая эскалация удельной цены продукции, выставляемой на продажу (может быть как положительной, так и отрицательной);

$G_{доп}$ – масса продукции, которая может ежегодно поставляться на рынок (природный уран) при замене тепловых реакторов на быстрые, кг;

Δt – временной лаг (интервал запаздывания или опережения) между временем получения дохода от продажи высвобождаемого урана (или ТВС) и базовой датой (временем пуска энергоблока в эксплуатации, моментом начала продажи электричества).

Предлагаемая математическая модель

Перейдя в формуле для E от суммирования к интегрированию и выполнив его, получим

$$E = C_{don} \cdot G_{TP} \frac{P_{BP} \cdot KIUM_{BP}}{P_{TP} \cdot KIUM_{TP}} \cdot \frac{\exp(-\lambda \cdot \Delta t) \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot L))}{\lambda} \quad (2)$$

$$\text{где } \lambda = \lambda_d - \lambda_2 - \lambda_{es}; \lambda_d = \ln(1+r); \lambda_2 = \frac{\ln 2}{T_2}; \lambda_{es} = \ln(1 + es_{don})$$

Введем понятие приведенной (постоянной за весь жизненный цикл) удельной стоимости избыточного плутония C_{pu}

$$E = \int_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} \frac{C_{Pu} \cdot M_{Pu}(t)}{\exp((t-t_0) \cdot \lambda_d)} dt, \quad (3)$$

$$\text{где } M_{Pu}(t) = \frac{G_{Pu}^0 \cdot (KH - 1)}{T} \cdot \exp(\lambda_2 \cdot (t - t_0)), \quad (4)$$

Выполнив интегрирование (3) с учетом (4) и приравняв (2) и (3), получим выражение для приведенной удельной стоимости плутония, получим:

Приведенная удельная стоимость плутония

$$C_{Pu} = C_{доп} \cdot G_{ТР} \frac{P_{БР} \cdot КИУМ_{БР}}{P_{ТР} \cdot КИУМ_{ТР}} \cdot \frac{T}{G_{Pu}^0 \cdot (КН - 1)} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_d}{\lambda} \cdot \frac{\exp(-\lambda \Delta t) \cdot (1 - \exp(-\lambda L))}{\exp((\lambda_2 - \lambda_d) \Delta t) \cdot (\exp((\lambda_2 - \lambda_d) L) - 1)},$$

$C_{доп}$ – удельная стоимость продукции, поступающей на рынок (природный уран, ТВС), за счет которой обеспечивается дополнительный доход, US\$/кг;

$G_{ТР}$ – ежегодная потребность в природном уране для теплового реактора, т;

$P_{ТР(БР)}$ – установленная мощность теплового (быстрого) реактора;

$КИУМ_{ТР(БР)}$ – коэффициент установленной мощности теплового (быстрого) реактора;

G_{Pu}^0 – начальная загрузка быстрого реактора плутонием;

T – кампания топлива в реакторе, годы;

$КН$ – коэффициент накопления вторичного плутония;

L – длительность жизненного цикла АЭС;

r – норма дисконтирования;

T_2 – системное время удвоения, годы;

$es_{доп}$ – годовая эскалация удельной цены продукции, выставляемой на продажу;

Δt – временной лаг (интервал запаздывания или опережения) между временем получения дохода от продажи высвобождаемого урана (или ТВС) и базовой датой (временем пуска энергоблока в эксплуатации, моментом начала продажи электричества).

Предлагаемая математическая модель связывает

- установленные мощности быстрых и тепловых реакторов в системе и их КИУМ;
- годовую потребность теплового реактора в природном уране;
- начальную загрузку плутония в быстром реакторе;
- длительность кампании быстрого реактора;
- коэффициент накопления плутония в быстром реакторе;
- период удвоения плутония для быстрого реактора;
- норму дисконтирования, принятую для ЯЭС;
- цену природного урана на рынке в данный момент;
- прогнозируемую (или устанавливаемую экспертно) эскалацию цены на природный уран.

Частный случай

Норма дисконтирования $r=0\%$, отсутствует эскалация цены на природный уран и $\Delta t=0$

$$C_{Pu} = C_{дон} \cdot G_{TP} \frac{P_{БР} \cdot КИУМ_{БР}}{P_{ТР} \cdot КИУМ_{ТР}} \cdot \frac{T}{G_{Pu}^0 \cdot (KH - 1)}$$

При $KH \rightarrow 1$ (имеет место при отсутствии избыточного плутония), стоимость плутония $C_{Pu} \rightarrow \infty$.

Численные примеры расчета удельной приведенной стоимости плутония

$C_{\text{доп}} = 100 \text{ \$}/\text{кг}$; $G_{\text{ТР}}=200 \text{ т}$; $P_{\text{БР}}=1220 \text{ МВт}$; $\text{КИУМ}_{\text{БР}}=0,9034$; $P_{\text{ТР}}=1250 \text{ МВт}$; $\text{КИУМ}_{\text{ТР}}=0,88$; $\text{КН}=1,13$; $G_{\text{Pu}}^0=8,4 \text{ т}$; $T=4,42 \text{ года}$; $L=60 \text{ лет}$. Система ВВЭР-1200+БН-1200.

Таблица 1 – Удельная приведенная стоимость плутония ($\Delta t=0$), $\text{K\$}/\text{кг}$

Эскалация цены на natU , %	Время удвоения								
	$T_2=10 \text{ лет}$			$T_2=25 \text{ лет}$			$T_2=50 \text{ лет}$		
	$M_{\text{Pu}}=15,8 \text{ т}$			$M_{\text{Pu}}=1,3 \text{ т}$			$M_{\text{Pu}}=0,57 \text{ т}$		
	r=0%	r=5%	r=10%	r=0%	r=5%	r=10%	r=0%	r=5%	r=10%
0	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13
3	339,5	262,91	178,63	276,24	186,41	131,75	250,26	165,74	122,61
5	902,76	623,78	342,79	670,61	367,54	200,76	579,93	302,38	175,14
Эскалация цены на natU , %	$T_2=75 \text{ лет}$			$T_2 \rightarrow \infty$					
	$M_{\text{Pu}}=0,43 \text{ т}$			$M_{\text{Pu}}=0,25 \text{ т}$					
	r=0%	r=5%	r=10%	r=0%	r=5%	r=10%			
0	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13			
3	241,40	159,69	120,09	223,77	148,88	115,71			
5	549,56	283,74	168,27	489,96	250,93	156,54			

Численные примеры расчета удельной приведенной стоимости плутония (продолжение)

Таблица 2 – Удельная приведенная стоимость плутония ($\Delta t=5$ лет), К\$/кг

Эскалация цены на natU, %	Время удвоения								
	$T_2=10 \text{ лет}$			$T_2=25 \text{ лет}$			$T_2=50 \text{ лет}$		
	$M_{Pu}=15,8 \text{ т}$			$M_{Pu}=1,3 \text{ т}$			$M_{Pu}=0,57 \text{ т}$		
	r=0%	r=5%	r=10%	r=0%	r=5%	r=10%	r=0%	r=5%	r=10%
0	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13
3	393,58	304,79	207,08	320,24	216,09	152,74	290,12	192,14	142,14
5	1152,17	796,12	437,50	855,89	469,08	256,23	740,15	385,93	223,53
Эскалация цены на natU, %	$T_2=75 \text{ лет}$			$T_2 \rightarrow \infty$					
	$M_{Pu}=0,43 \text{ т}$			$M_{Pu}=0,25 \text{ т}$					
	r=0%	r=5%	r=10%	r=0%	r=5%	r=10%			
0	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13	81,13			
3	279,85	185,13	139,22	259,41	172,59	134,14			
5	701,40	362,13	214,76	625,32	320,26	199,78			

Результаты оценки стоимости плутония

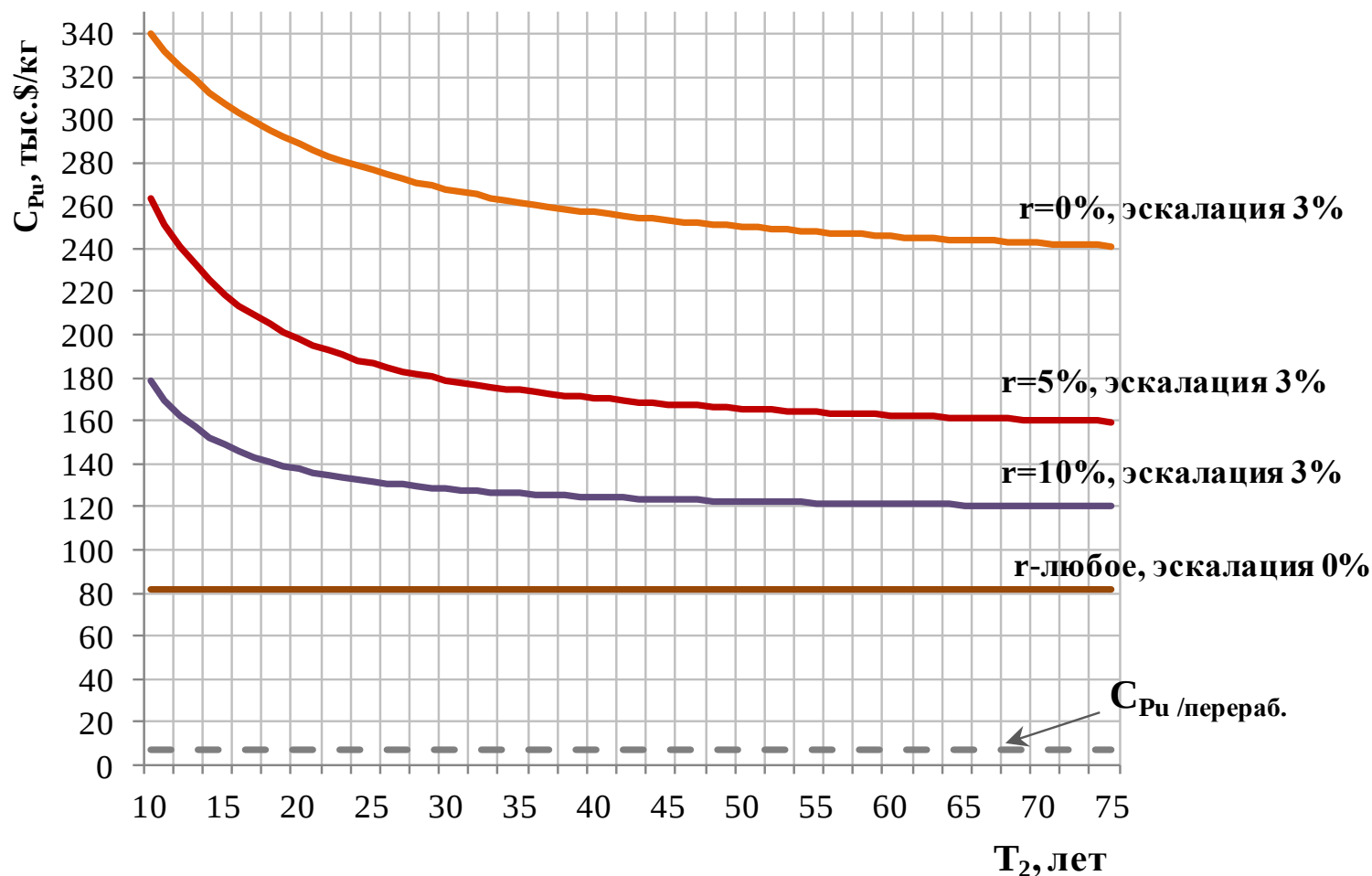


Рисунок 1 – Удельная стоимость плутония в ЯЭС в зависимости от времени удвоения при $\Delta t=0$ и эскалации цены на природный уран в 0% и 3%

Выводы

- В качестве характеристики стоимости плутония введено понятие удельной приведенной стоимости плутония. Построена математическая модель, позволяющая рассчитать удельную цену плутония.
- В рамках этой модели получено соотношение для расчета удельной стоимости плутония, которое связывает основные топливные характеристики рассматриваемых ядерных реакторов и экономические показатели топливного цикла ЯЭС.
- Анализ показал, что стоимость плутония в значительной степени определяется текущей ценой на природный уран и его эскалацией, коэффициентом накопления плутония в быстром реакторе, длительностью внешнего топливного цикла, периодом удвоения плутония в системе и т.д.

ВЫВОДЫ (продолжение)

- Проведено расчетное исследование удельной приведенной стоимости плутония в двухпродуктовой модели ЯЭС с реакторами БН-1200М и ВВЭР-1200. Результаты расчетов во всех рассмотренных случаях показывают на значительную удельную приведенную стоимость плутония. При этом минимальная цена плутония, полученная для такой системы, при текущей и постоянной цене на природный уран (\$100/кг), нулевой ставке дисконтирования и нулевом временном лаге по отношению к базовой дате составляет около K\$80/кг.
- При значениях основных параметров, близких к проектным для системы ВВЭР+БН (цена природного урана \$100/кг, его годовая эскалация 3%, дисконт 5%, период удвоения 50 лет), цена плутония составит около K\$170/кг.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !