

Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»  
Национального научного центра «Харьковский физико-технический  
институт»

# О вариантах ЯТЦ Украины

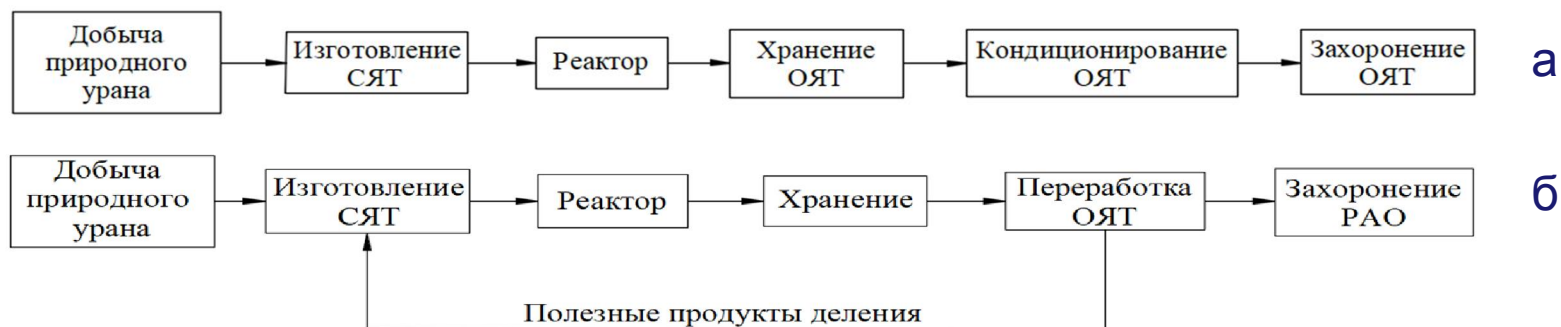
VI Международная научно-практическая  
конференция «Безопасность и эффективность  
атомной энергетики» 4-6 сентября 2018





# Введение

- ❖ **Ядерное топливо** – основа экономики и безопасности атомной энергетики. Ядерный топливный цикл показывает как реализуются этапы работ с ядерным топливом на пути его жизненного цикла



**а-открытый ЯТЦ, б-замкнутый ЯТЦ**



# Безопасность



Контейнер для перевозки СЯТ



Контейнер для перевозки и хранения ОЯТ



СХОЯТ



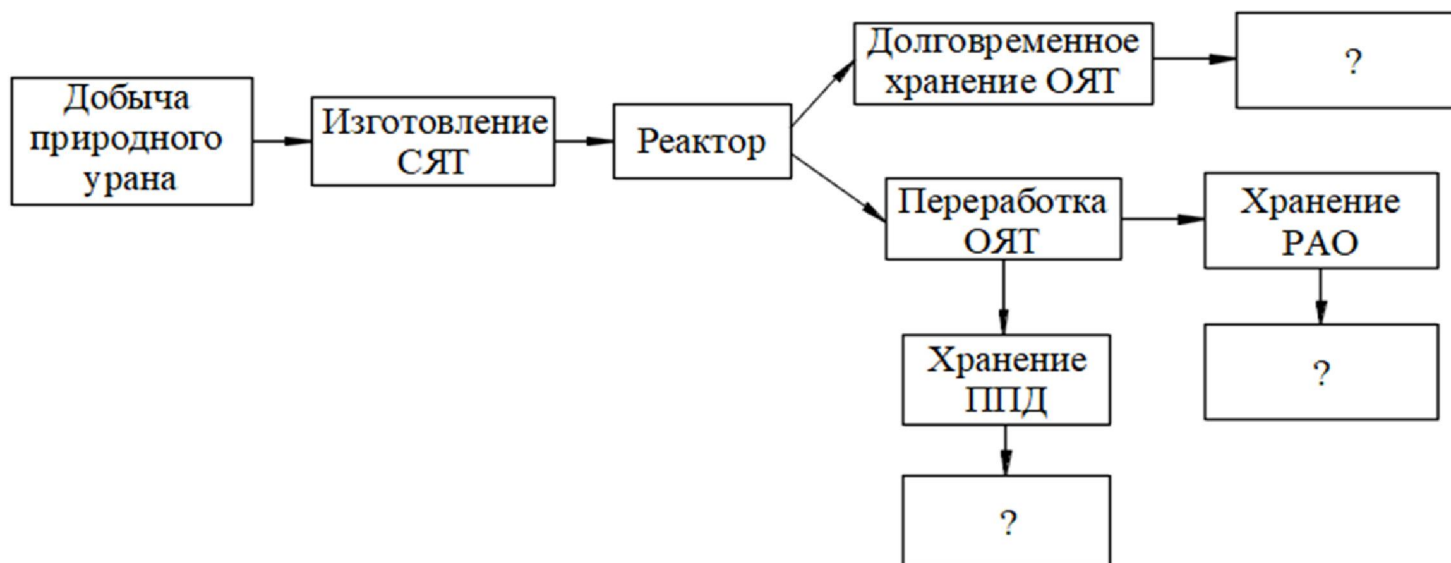
Пенал для кондиционирования



Хранилище



# Особенности ЯТЦ Украины



## Схема ЯТЦ Украины с реакторами ВВЭР-1000

### Особенности:

- Часть ОЯТ реакторов ВВЭР будет переработана и продукты переработки ППД и ВАО поступят в Украину
- Другая часть ОЯТ будет храниться в Украине до принятия решений.



## Особенности ЯТЦ Украины

### Основные тактические и стратегические вопросы по ЯТЦ Украины:

- Что делать с возвращаемыми ППД:
  - Использовать их при изготовлении топлива ?
  - Хранить неопределенно долго до принятия решения ?
- Какие ЯТЦ реализовывать ?



## Использование ППД

До 2050 г. при современном уровне мощности реакторов в Украине, может быть наработано **14906 т** ОЯТ, из них **3710 т** будет переработано в РФ.

Из ОЯТ может быть получено ППД:

- **13100 т** рециклированного урана
- **114 т** плутония

Стоимость ППД, возвращаемых из РФ, в эквиваленте стоимости естественного урана оценочно составляет **1050 млн \$.**



## Варианты ЯТЦ с использованием ППД

Использование ППД в реакторах ВВЭР:

- Рециклированный уран идет на обогащение, известными методами, например, центрифугированием. Плутоний хранится для дальнейшего использования (ReU);
- Рециклированный уран дообогащается  $^{235}\text{U}$  из внешнего источника, плутоний хранится для дальнейшего использования (ReU+ $^{235}\text{U}$ );
- Из рециклированного урана и плутония изготавливается MOX-топливо.

ЯТЦ с введением в структуру АЭ Украины реакторов CANDU





## Использование ППД

Использование для изготовления ядерного топлива только рециклированного урана позволяет изготовить

- **5080** ТВС для реакторов ВВЭР- 1000,

в том числе:

- **1085** ТВС из ППД возвращаемых из РФ;
- **3995** ТВС из ППД получаемых из ОЯТ находящихся на хранении.





## Использование ППД

При использовании ППД для изготовления МОХ топлива может быть изготовлено:

- **7213** ТВС из ППД всего переработанного ОЯТ,

в том числе:

- **1540** ТВС из ППД возвращаемых из РФ
- **5673** ТВС из ППД получаемых из ОЯТ находящегося на хранении.



## Использование ППД

Технологии изготовления ядерного топлива с применением рециклированного урана отработаны в мире.

Применительно к конструкции твэлов и ТВС реакторов ВВЭР необходимо решать вопросы выбора изготовителя (партнера)



## Экономические показатели этапов ЯТЦ

Затраты на этапы ЯТЦ	Значение
Стоимость природного урана, \$/кг т.м	100
Конверсия, \$/кг т.м	10
Обогащение, \$/кг ЕРР	115
Изготовление топлива из природного урана, ВВЭР, \$/кг т.м	275
Изготовление МОХ топлива, ВВЭР, \$/кг т.м	1200
Транспортировка ТВС, \$/кг т.м	5
Транспортировка ОЯТ, \$/кг т.м	69
Долговременное хранение ОЯТ, \$/кг т.м.	230
Переработка ОЯТ, \$/кг т.м.	800
Кондиционирование ОЯТ, \$/кг т.м.	510
Захоронение ОЯТ, \$/кг т.м.	100



## Экономические оценки

Экономические оценки топливной составляющей стоимости электроэнергии при нулевой стоимости ППД и стоимости по мировым ценам в случае одноциклового применения.  $10^{-3}\$/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$

Стадии, этапы	Вариант ЯТЦ		
	ReU	ReU+ <sup>235</sup> U	MOX
Хранение ОЯТ до переработки	2,79	0,44	1,85
Переработка ОЯТ	0 (7,29)*	0 (1,16)*	0 (5,03)*
Затраты на получение урана необходимого обогащения	2,10	4,80	0,00
Изготовление СЯТ из рециклированного урана	0,79	0,79	3,13
Транспортировка свежего топлива	0,01	0,01	0,01
Транспортировка ОЯТ	0,18	0,18	0,18
Хранение ОЯТ	0,60	0,60	0,60
Кондиционирование ОЯТ	1,33	1,33	1,33
Захоронение ОЯТ	0,26	0,26	0,26
<b>Итого</b>	<b>5,27</b> (15,35)*	<b>7,97</b> (9,57)*	<b>5,51</b> (12,38)*

12



## Результат оценок при нулевой стоимости ППД

При использовании рециклированного урана, для изготовления свежего ядерного топлива, топливная составляющая стоимости электроэнергии ( $5,27 \cdot 10^{-3} \$ / \text{кВт}\cdot\text{ч}$ ) может быть на – **33%** ниже по сравнению с открытым ЯТЦ ( $7,84 \cdot 10^{-3} \$ / \text{кВт}\cdot\text{ч}$ )

Общая экономия по затратам – **467** млн \$.

При изготовлении и использовании МОХ топлива:

- топливная составляющая - на **30%** ниже, чем для открытого ЯТЦ
- общий экономический эффект – **600** млн.\$.



## Результат оценок при мировой стоимости ППД

В случае переработки в будущем ОЯТ по мировым ценам и использовании ППД топливная составляющая цены электроэнергии при всех вариантах ЯТЦ примерно на 18- 49 % выше чем для открытого ЯТЦ.



## Реакторы CANDU

Реакторы CANDU:

- на естественном уране количество ОЯТ ~ в 5,8 раз больше, чем для ВВЭР
- на слабообогащенном уране количество ОЯТ ~ в 3,4 раз больше, чем для ВВЭР

При экономических оценках приняты два варианта:

- затраты на этапах обращения с ОЯТ одинаковые для всех вариантов ЯТЦ.
- затраты по этапам ЯТЦ с реакторами CANDU приняты как прогнозируемые.





## Реакторы CANDU

### Экономические характеристики этапов ЯТЦ с реакторами CANDU

Затраты на этапы ЯТЦ	Значение
Стоимость природного урана, \$/кг т.м	100
Конверсия, \$/кг т.м	10
Обогащение, \$/кг ЕРР	115
Изготовление топлива из природного урана, \$/кг т.м	65
Изготовление МОХ-топлива, \$/кг т.м	558
Транспортировка ТВС, \$/кг т.м	5
Транспортировка ОЯТ, \$/кг т.м	5
Долговременное хранение ОЯТ, \$/кг т.м.	47
Кондиционирование ОЯТ, \$/кг т.м.	202
Захоронение ОЯТ, \$/кг т.м.	90



## Реакторы CANDU

### Варианты ЯТЦ с реакторами CANDU

- Топливо изготавливается из естественного урана ( $0,71\%^{235}\text{U}$ ).
- Топливо изготавливается из слабообогащенного урана ( $1,2\%^{235}\text{U}$ ).
- Переработка ОЯТ реакторов ВВЭР, рециклированный уран используется для изготовления топлива для реакторов CANDU ( $1,2\% \text{Re}^{235}\text{U}$ ).
- Переработка ОЯТ реакторов ВВЭР, рециклированный уран и плутоний используются для изготовления МОХ-топлива ( $1,5\% (\text{U}+\text{Pu})$ ).



## Результаты оценок топливной составляющей

Топливная составляющая стоимости электроэнергии ЯТЦ с реакторами CANDU,  $10^{-3}$  \$./(\text{кВт}\cdot\text{ч})

(Стоимость этапов такая же как для ВВЭР)

Этапы ЯТЦ	Вариант ЯТЦ			
	0,71% <sup>235</sup> U	1,2% <sup>235</sup> U	1,2%Re <sup>235</sup> U	1,5% (U+Pu)
Хранение ОЯТ до переработки	-	-	2,11	1,12
Изготовление СЯТ из природного урана	2,53	3,31	-	-
Переработка ОЯТ	-	-	4,28	5,29
Дообогащение	-	-	0,31	0,00
Изготовление СЯТ с применением ППД	-	-	0,64	4,12
Транспортировка ТВС	0,08	0,04	0,04	0,04
Транспортировка ОЯТ	1,05	0,62	0,62	0,51
Хранение ОЯТ	3,48	2,06	2,06	1,70
Кондиционирование ОЯТ	7,73	4,57	4,57	3,76
Захоронение ОЯТ	1,52	0,90	0,9	0,74
<b>Итого</b>	<b>16,38</b>	<b>11,50</b>	<b>15,54</b>	<b>17,28</b>

18



## Результаты оценок топливной составляющей

Топливная составляющая стоимости электроэнергии ЯТЦ с реакторами CANDU,  $10^{-3}$  \$./(\text{kВт}\cdot\text{ч})

(Прогнозируемая стоимость этапов)

Этапы ЯТЦ	Вариант ЯТЦ			
	0,71% <sup>235</sup> U	1,2% <sup>235</sup> U	1,2%Re <sup>235</sup> U	1,5% (U+Pu)
Хранение ОЯТ до переработки			2,11	1,12
Изготовление СЯТ из природного урана	2,53	3,31	-	-
Переработка ОЯТ	-	-	4,28	5,54
Дообогащение	-	-	0,31	0,00
Изготовление СЯТ с применением ППД	-	-	0,64	4,12
Транспортировка ТВС	0,08	0,04	0,04	0,04
Транспортировка ОЯТ	0,08	0,05	0,05	0,04
Хранение ОЯТ	0,71	0,42	0,42	0,35
Кондиционирование ОЯТ	3,06	1,88	1,81	1,49
Захоронение ОЯТ	1,36	0,81	0,81	0,66
<b>Итого</b>	<b>7,82</b>	<b>6,44</b>	<b>10,48</b>	<b>13,35</b>



## Реакторы CANDU

В случае когда затраты по этапам обращения с ОЯТ такие же как и для ВВЭР топливная составляющая для ЯТЦ с реакторами CANDU в **1,5 – 2,0** раза выше чем для открытого ЯТЦ с реакторами ВВЭР. Если затраты будут как прогнозируемые, то топливная составляющая ЯТЦ с реакторами CANDU сопоставимы с открытым ЯТЦ с реакторами ВВЭР

Реализация тандем цикла реакторы ВВЭР- CANDU приводит для всех вариантов к более высокой топливной составляющей производства электроэнергии по сравнению с открытым ЯТЦ с реакторами ВВЭР на 45% - 120%



## Заключение

- Экономически целесообразно в ближайшей перспективе использовать возвращаемые ППД для изготовления свежего ядерного топлива для реакторов ВВЭР.

Реальная экономия может составить ~ 467 млн.\$.

- Для использования ППД необходимо:
  - разработать конкретные ЯТЦ с применением рециклированного урана и плутония;
  - разработать соответствующие нормативные документы по всем этапам ЯТЦ;
  - определить партнеров по изготовлению свежего ядерного топлива с применением ППД.
- В целом по ЯТЦ Украины необходимо:
  - прорабатывать вопросы кондиционирования ОЯТ как ВАО;
  - осуществлять поиск и обоснование геологических формаций для удаления ВАО.

Спасибо за  
внимание!

[crcd@kipt.kharkov.ua](mailto:crcd@kipt.kharkov.ua)







## Долгоживущие изотопы

Массовый состав и период полураспада в ОЯТ ВВЭР-1000

Нуклиды	Кг/т ОЯТ	Период полураспада, лет
<b>U-232</b>	$1,1 \cdot 10^{-6}$	<b>68,9</b>
<b>U-235</b>	8,5	<b><math>7,1 \cdot 10^8</math></b>
<b>U-236</b>	6,0	<b><math>2,342 \cdot 10^7</math></b>
<b>U-238</b>	810	<b><math>4,5 \cdot 10^9</math></b>
<b>Pu-236</b>	$2,3 \cdot 10^{-7}$	<b>2,858</b>
<b>Pu-238</b>	$2,9 \cdot 10^{-1}$	<b>87,7</b>
<b>Pu-239</b>	6,1	<b><math>24,1 \cdot 10^3</math></b>
<b>Pu-240</b>	2,6	<b><math>6,561 \cdot 10^3</math></b>
<b>Pu-241</b>	1,3	<b>14,290</b>
<b>Pu-242</b>	$8,0 \cdot 10^{-1}$	<b><math>3,75 \cdot 10^5</math></b>
<b>Np-237</b>	$6,4 \cdot 10^{-1}$	<b><math>2,144 \cdot 10^6</math></b>
<b>Am-241</b>	$5,3 \cdot 10^{-1}$	<b>432,8</b>
<b>Am-243</b>	$2,1 \cdot 10^{-1}$	<b><math>7,37 \cdot 10^3</math></b>
<b>Cm-243</b>	$5,1 \cdot 10^{-4}$	<b>29,1</b>
<b>Cm-244</b>	$7,2 \cdot 10^{-2}$	<b>18,1</b>
<b>Cm-245</b>	$5,1 \cdot 10^{-3}$	<b><math>8,5 \cdot 10^3</math></b>



## АЭ в мире

Страна	Стоимость, $10^{-3}$ \$/(кВт·ч)
Ukraine	19
USA	34
France	50,6
Germany	34,5
Belgium	41,8
Canada	51,7

<http://www.world-nuclear.org>



## Основные цифры

Наработано ОЯТ до 2050 г.	14906 т т.м.	
Будет переработано ОЯТ в РФ, из него в Украину будет передано:	3710 т т.м.	
	Рециклированного U	2800 т т.м.
	Плутония	24,8 т
Стоимость ПДД, возвращаемого из РФ, в эквиваленте естественного U	1050 млн \$	
Может быть изготовлено из рециклированного U	1085 ТВС	
Экономия по ЯТЦ	467 млн \$	
С использованием МОХ-топлива может быть изготовлено	1540 ТВС	
Экономия по ЯТЦ	600 млн \$	



## Основные цифры

Топливная составляющая стоимости электроэнергии при различных вариантах ЯТЦ,  $10^{-3}$  \$/(кВт·ч)

Открытый ЯТЦ с реакторами ВВЭР	7,84
Замкнутый ЯТЦ с реакторами ВВЭР	12,38
ЯТЦ с использованием ППД нулевой стоимости:	
рециклированный U	5,27
МОХ	5,51
ЯТЦ с реакторами CANDU:	
Естественный уран	16,38 / 7,82
Слабообогащенный уран	11,5 / 6,44
Тандем цикл ВВЭР-CANDU	17,28 / 13,35