

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВВЕДЕНИЯ ^{232}U В ВЫСОКООБОГАЩЕННЫЙ УРАН С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЗАЩИЩЕННОСТИ ОТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Фурсова Е.А.¹, Куликов Е.Г.²

¹Фурсова Елена Анатольевна – магистрант,
факультет бизнес-информатики и управления комплексными системами»
кафедра управления бизнес-проектами;

²Куликов Евгений Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент,
кафедра теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов,
институт ядерной физики и технологий,

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва

Аннотация: в статье сравниваются два способа повышения защищенности высокообогащенного топлива исследовательских реакторов: перевод реакторов на низкообогащенное топливо и введение в топливо изотопа ^{232}U . Ввиду отсутствия данного изотопа в природе оценивается стоимость наработки ^{232}U в ториевом топливе, облучаемом в легководном реакторе типа ВВЭР. Делается вывод об экономической целесообразности введения ^{232}U в высокообогащенное топливо исследовательских реакторов с целью повышения его защищенности от распространения.

Ключевые слова: исследовательские реакторы, ядерное взрывное устройство ствольного типа, высокообогащенный уран, низкообогащенный уран, изотоп ^{232}U , экономический анализ.

УДК .621.039

Как известно, исследовательские реакторы (ИР) работают на высокообогащенном уране (ВОУ). Это обусловлено необходимостью иметь высокие потоки нейтронов для проведения экспериментов. В то же время, высокообогащенный уран является материалом прямого использования, то есть может применяться для создания ядерного взрывного устройства (ЯВУ). В этой связи есть инициативы перевода ИР на низкообогащенное топлива (обогащение не более 20%).

В 2010 году между российской корпорацией «Росатом» и США было заключено соглашение о проведении исследований по конверсии ИР с ВОУ на низкообогащенный уран (НОУ) первых шести российских реакторов [1]. В 2016 году в связи с возникшими разногласиями в отношениях стран это соглашение было приостановлено.

В настоящей статье проводится экономическое обоснование альтернативного варианта обеспечения защищенности топлива исследовательских реакторов, а, именно, введения в его состав изотопа ^{232}U , которого исходя из оценок авторов необходимо около 0,02% для снижения энергетического выхода ЯВУ ствольного типа в 100 раз с вероятностью 90%. Следует отметить, что вопрос по оценке требуется содержания ^{232}U для снижения энергетического выход подробно рассматривается в предыдущей статье [2].

Изотоп ^{232}U отсутствует в природе, но может быть наработан в реакторе при облучении ториевого топлива (рис. 1).

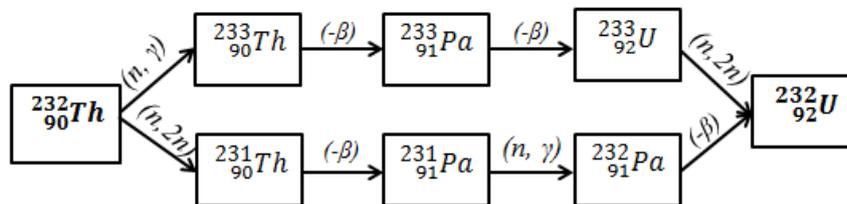


Рис. 1. Схема образования изотопа ^{232}U

Изотопный состав ториевого топлива, в котором нарабатывается ^{232}U , подберем таким образом, чтобы его глубина выгорания соответствовала таковой для традиционного уранового топлива легководного реактора типа ВВЭР-1000 (4,4% ^{235}U + 95,6% ^{238}U). Нейтронно-физические расчеты выполнены с помощью расчетных комплексов GETERA и SCALE [3, 4].

Результаты нейтронно-физического расчета элементарной ячейки показывают, что ториевое топливо состава 8% ^{235}U + 92% ^{232}Th характеризуется тем же выгоранием, что и традиционное урановое топливо, то есть около 40000 МВт/сут.т.

Кроме того, выполнен расчет изменения изотопного состава топлива и установлено, что за год работы реактора типа ВВЭР-1000 на ториевом топливе (8% ^{235}U + 92% ^{232}Th) в нем накапливается около 0,001% изотопа ^{232}U .

Стоимость обогащенного урана рассчитывается по следующей формуле

$$C_x = \frac{x-y}{c-y} C_F + [\Phi(x) + \frac{x-y}{c-y} \Phi(y) + \frac{x-y}{c-y} \Phi(c)] C_R + \frac{x-y}{c-y} C_D$$

где C_x – цена обогащенного уранового продукта

x - обогащение (%)

y - концентрация отвала (%)

c – содержание ^{235}U в природном уране (%)

C_F - цена природного урана (\$/кг)

C_R - цена единицы работы разделения (\$/EPP)

$\Phi(x)$ – работа разделения, определяется по следующей формуле:

$$\Phi(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1-x}$$

Цена природного урана по данным сайта «Индикаторы цен на ядерное топливо UxC», на 2 апреля 2018 года составляет 21,10 \$ / фунт = 47 \$ / кг. Цена EPP составляет 36 \$ / кг, по данным того же сайта. Расчет представлен в таблице 1.

Таблица 1. Расчет стоимости обогащенного урана

Параметр	Значение
Обогащение x (%)	8
Концентрация отвала y (%)	0,25
Массовая концентрация c (%)	0,71
Цена природного урана C_F (\$/кг)	47
Цена единицы работы разделения C_R (\$/EPP)	36
Расчет цены обогащенного уранового продукта C_x	1362

Добавив к полученному результату стоимость тория, которая составляет по данным на 2016 год 65 \$ / кг [5], а также стоимость фабрикации, которая оценивается на уровне 300 \$ / кг [6] и стоимость переработки 2000 \$ / кг [6], получится, что итоговая стоимость топлива 8% ^{235}U + 92% ^{232}Th , составит 3721 \$ / кг. Поскольку содержание ^{232}U составляет 0,001%, то его цена наработки оценивается в 372 100 \$ / грамм.

Проведем сравнительный анализ полученного результата с конверсией первых шести российских ИР на НОУ. По предварительным данным стоимость перевода оценивается в 12 млн. \$ без учета стоимости загрузки нового топлива [7].

К ним относятся следующие реакторы: Аргус, ОР и ИР-8 в НИЦ «Курчатовский институт», ИРТ в НИЯУ МИФИ, МИР-М1 в НИИАР и ИРТ в Томском политехническом университете. Определим общую массу топлива этих исследовательских реакторов. Для этого нам понадобится масса ^{235}U и его обогащение (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики шести исследовательских реакторов

Реактор	Масса ^{235}U , кг	Обогащение, %	Масса топлива, кг
Аргус	1,71	90	1,900
ОР	3,8	36	10,555
ИР-8	4,8	90	5,333
ИРТ (МИФИ)	5,15	90	5,722
МИР-М1	17,95	90	19,944
ИРТ (ТПУ)	8,8	90	9,778
Сумма			53,232

Из таблицы видно, что итоговая масса топлива шести исследовательских реакторов равна 53,232 кг. Для защищенности такого количества высокообогащенного урана необходимо наличие 53,232 кг · 0,02% = 13,31 грамма ^{232}U , стоимость которого составляет 5,0 млн. \$. Это существенно меньше 12 млн. \$, которые требуются на перевод реакторов на низкообогащенное топливо. Данный факт свидетельствует об экономической целесообразности защищенности топлива исследовательских реакторов путем введения в него небольших количеств ^{232}U .

Список литературы

1. Соглашение о переводе научных реакторов РФ и США на низкообогащенный уран. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/spravka/20161005/1478593857.html/> (дата обращения: 16.04.2018).
2. Фурсова Е.А., Куликов Е.Г. Количественная оценка содержания изотопа ^{232}U для обеспечения защищенности высокообогащенного урана // Наука и образование сегодня. № 6 929), 2018.
3. Belousov N., Bychkov S., Marchuk Y. et al. GETERA Code for Cell and Poly-Cell Calculations and Capabilities. Proceedings of the 1992 Topical Meeting on Advances in Reactor Physics. // Charleston Sheraton, Charleston. SC. USA. March 8-11, 1992. Vol. 2. P. 516-523.
4. SCALE. [Электронный ресурс], 2018. Режим доступа: <https://www.ornl.gov/scale/> (дата обращения: 17.03.2018).
5. Mineral Commodity Summaries 2017 - USGS Mineral Resources. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/thorium/mcs-2017-thori.pdf/> (дата обращения: 27.04.2018).
6. Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems издание МАГАТЭ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www-pub.iaea.org/books/iaeabooks/8703/Role-of-Thorium-to-Supplement-Fuel-Cycles-of-Future-Nuclear-Energy-Systems/> (дата обращения: 28.04.2018).
7. Кириенко С. Стоимость перевода шести реакторов на НОУ может достичь US\$12,5 млн. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nuclear.ru/news/77908/> (дата обращения: 30.04.2018).