

*Макаров Василий Михайлович*¹,
д-р экон. наук, профессор, профессор;
*Плоткина Ульяна Ивановна*²,
канд. экон. наук, доцент, доцент;
*Полончук Александр Евгеньевич*³,
магистрант

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТКРЫТОГО И ЗАМКНУТОГО ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ

^{1,2,3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, ² uplotkina@spbstu.ru

Аннотация. Цель работы: провести анализ и сравнение эффективности разомкнутого (открытого) ядерного топливного цикла и замкнутого топливного цикла в характерных для Российской Федерации условиях. Методы, использованные в исследовании: моделирование процессов, системный анализ и синтез, экспертная оценка.

В настоящее время перед страной стоит вопрос выбора между двумя направлениями развития ядерной энергетики: продолжение широкого использования разомкнутого (открытого) ядерного топливного цикла (ЯТЦ) или выполнение НИОКР и внедрение замкнутого топливного цикла.

Основными реакторами на атомных электростанциях России являются РБМК и ВВЭР-1000; их отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) на данный момент не перерабатывается вследствие экономической нецелесообразности, хотя такая технологическая возможность существует. Разработка и строительство предприятия по производству нового топлива из уже отработавшего, то есть начало опытной эксплуатации замкнутого топливного цикла, возможно, покажет перспективность осуществления в России замкнутого ЯТЦ.

Ключевые слова: открытый ядерный топливный цикл, замкнутый ядерный топливный цикл, отработавшее ядерное топливо, переработка отработавшего ядерного топлива, рециклирование.

*Vasily M. Makarov*¹,
Doctor of Economics, Professor;
*Ulyana I. Plotkina*²,
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor;
*Alexandr E. Polonchuk*³,
Master Student

THE COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF OPEN AND CLOSED NUCLEAR FUEL CYCLES

^{1,2,3} Peter The Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, ² uplotkina@spbstu.ru

Abstract. Purpose of work: to analyze and compare the efficiency of open nuclear fuel cycle (NFC) and closed fuel cycle in the typical conditions for the Russian Federation. Methods used in the research: process modeling, analysis and synthesis, expert evaluation.

Currently, the country faces with the question of choosing between two directions of nuclear energy development: continuing the widespread use of the open (open) nuclear fuel cycle (NFC), or performing R&D and implementing the closed fuel cycle.

The main nuclear power reactors in Russia are RBMK and VVER-1000 (WWER-1000), and their spent nuclear fuel (SNF) is not currently being processed, because of economic impracticability, although there is a technological possibility. The development and construction of the enterprises for the production of new fuel from already spent, i.e. the start of pilot operation of the closed fuel cycle, may present the prospects for implementation of the closed NFC in Russia.

Keywords: open nuclear fuel cycle, closed nuclear fuel cycle, spent nuclear fuel, reprocessing of spent nuclear fuel, recycling.

Одно из направлений энергетической стратегии РФ на период до 2030 года предусматривает реализацию замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) [3]. При открытом ЯТЦ природный уран обогащается и используется для изготовления топлива, а отработавшее ядерное топливо захоранивается как радиоактивные отходы. Преимущество такого топливного цикла состоит в исключении сложного этапа переработки отработавшего топлива.

При реализации *открытого* ЯТЦ развитие ядерной энергетики ограничивается разведанными запасами природного урана (по оценкам специалистов его хватит на 80-100 лет), в то же время природный делящийся материал U^{235} используется далеко не полностью. Технология окончательной изоляции ОЯТ в подземные геологические формации в настоящее время ещё требует дополнительного изучения и обоснования ее радиационной безопасности. *Замкнутый* ЯТЦ представляет собой новое направление развития ядерной энергетики РФ, основанное на использовании инновационных технологий, главное преимущество которых – возможность использования энергии не только U^{235} , но и плутония, образующегося при облучении урана.

Ядерный топливный цикл – это путь, по которому топливо попадает в ядерный реактор, и по которому ОЯТ его покидает. Начальные этапы замкнутого и разомкнутого ЯТЦ: добыча урана, конверсия, аффинаж, обогащение – одинаковы, различия имеют место на заключительном этапе. Завершающая часть ядерного топливного цикла предполагает транспортировку, хранение, переработку ОЯТ, обращение с радиоактивными отходами, включая их захоронение.

Открытый ЯТЦ, реализуемый, например, в парке легководных реакторов, таких как водо-водяной энергетический реактор ВВЭР-1000, с длительной выдержкой ОЯТ и захоронением его в геологические формации, состоит из следующих укрупненных этапов (рис. 1) [4]:

- добыча природного урана;
- конверсия и обогащение природного урана;
- изготовление таблеток и формирование тепловыделяющих сборок (ТВС);
- облучение в ВВЭР-1000 (генерация энергии);
- пристанционное «мокрое» хранение;
- транспортировка и длительное «сухое» хранение;
- помещение ОЯТ в специальные контейнеры для захоронения и транспортировка в специальных железнодорожных составах к месту захоронения;
- захоронение ОЯТ под землей в специально отобранные для этого геологические формации.

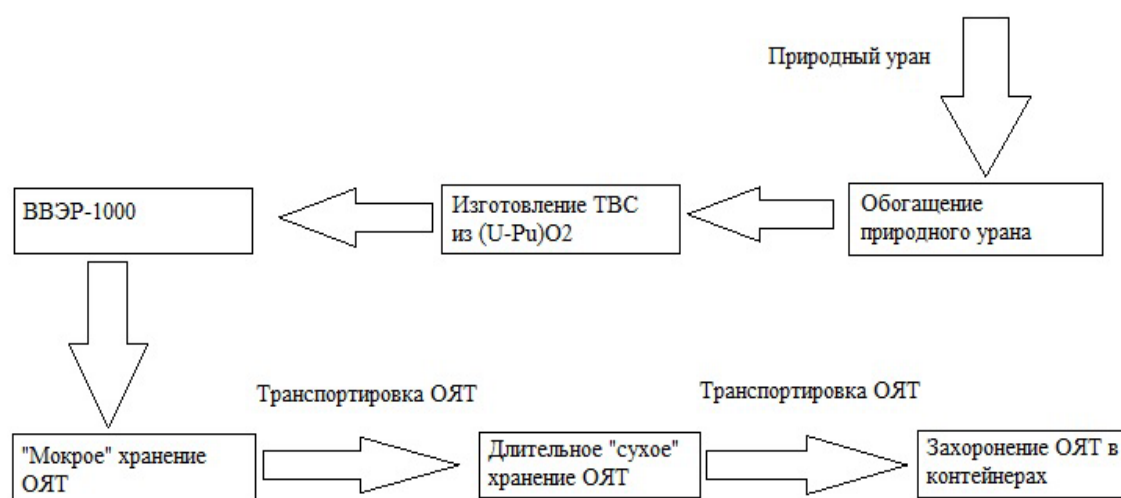


Рис. 1. Открытый ЯТЦ реакторов ВВЭР-1000 с прямым захоронением ОЯТ без рециклирования урана и плутония

Схема разомкнутого (открытого) ЯТЦ значительно короче и проще, чем замкнутого. Исключается основной источник загрязнения окружающей среды радионуклидами – радиохимический завод, то есть отсутствует радиационно-опасное производство. С другой стороны, в открытом ЯТЦ отработавшее ядерное топливо считается высокоактивными радиоактивными отходами, по причине неподходящих для переработки параметров ОЯТ, и вместе с остаточными делящимися изотопами исключается из дальнейшего использования – поступает на хранение или захоронение. Поэтому разомкнутый ЯТЦ характеризуется низкой эффективностью использования природного урана, до 1 %.

В отработанном ядерном топливе содержится примерно 1 % плутония, который после смешивания с обедненным ураном может быть использован для фабрикации свежих топливных сборок для загрузки в реакторы [2].

Таким образом, переработка отработанного ядерного топлива позволяет получить определенные экономические выгоды за счет более полного вовлечения в ЯТЦ урана и использования наработанного плутония. При этом уменьшается объем высокорadioактивных отходов, которые необходимо надлежащим образом хранить, что также имеет существенный экономический смысл.

Топливный цикл с многократным *рециклированием* регенерированных урана и плутония, представленный на рисунке 2, состоит из следующих укрупненных этапов [4]:

- добыча природного урана;
- конверсия и обогащение природного урана;
- изготовление таблеток и формирование тепловыделяющих сборок (ТВС);
- облучение ТВС на АЭС с ВВЭР-1000 (генерация энергии);
- хранение ОЯТ в пристанционном «мокром» хранилище;
- помещение ОЯТ в контейнеры и транспортировка в специальных железнодорожных составах на радиохимический завод;
- переработка ОЯТ с выделением смеси урана и плутония, подпитка их обогащенным природным ураном (рециклирование), одновременно с производством блоков остеклованных высокоактивных отходов (ВАО) для захоронения их в геологические формации;
- изготовление таблеток и формирование ТВС из рециклированных урана и плутония, подпитанных обогащенным природным ураном; транспортировка и захоронение ВАО в геологические формации.

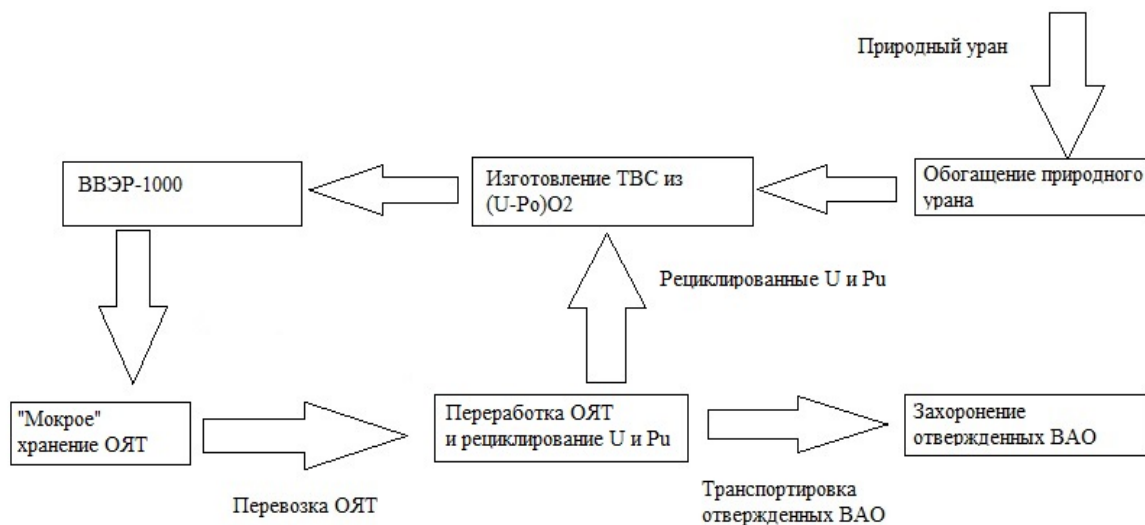


Рис. 2. Замкнутый ЯТЦ реакторов ВВЭР-1000 с рециклированием урана и плутония, выделенных из ОЯТ

Если выполнить сравнительный анализ замкнутого топливного цикла реакторов на тепловых нейтронах с рециклированием ОЯТ и разомкнутого ЯТЦ с прямым захоронением ОЯТ, то можно определить следующие преимущества и недостатки рассматриваемых вариантов [1].

Преимущества замкнутого ЯТЦ:

- в топливный цикл возвращается около 95 % исходного состава топлива, не претерпевшего превращения в процессе его использования (облучения). В результате уменьшается потребность в добыче и переработке урановой руды, экономится энергетическое сырье для будущих поколений (экономия природного урана составит 26 %);

- нарабатывается плутоний, который может использоваться в качестве топлива и является ценным энергетическим сырьем;

- реакторные установки ВВЭР, широко используемые сегодня, не требуют модернизации при переходе на осуществление многократного рециклирования урана и плутония;

- из продуктов деления и трансурановых элементов, накопившихся в топливе, выделяют ценные изотопы, которые могут использоваться в медицине, научных исследованиях, промышленности и других сферах;

- минимизируется накопление радиоактивных отходов (РАО); объем захораниваемых в глубокие формации РАО, не содержащих ядерноопасные материалы, значительно меньше, чем объем опасного ОЯТ, образующегося в разомкнутом топливном цикле. Упрощается соблюдение требований нераспространения делящихся материалов;

- нет необходимости изменения проекта существующих РУ в плане повышения безопасности при использовании топлива, полученного из ОЯТ, кроме радиационной защиты при обращении со свежим топливом;

- решение проблемы захоронения кондиционированных РАО в замкнутом ЯТЦ осуществляется в рамках программы «Создание единой государственной системы обращения с РАО» (ЕГСРАО). В ближайшей перспективе в РФ предусматривается создание различных типов пунктов захоронения: пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО), строительство и содержание которых обходится значительно дешевле, и пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО);

- в отличие от открытого ЯТЦ не требуется создание и постоянная эксплуатация дорогостоящих долговременных хранилищ ОЯТ: «мокрого» и «сухого», для подготовки к захоронению в глубине геологических формаций. Также не требуется дополнительно решать проблему обеспе-

чения долговременной изоляции тепловыделяющих сборок (ТВС) от биосферы, ввиду существования реальной опасности освобождения радионуклидов в случае разрушения ТВЭЛ-ов при их хранении, путем создания пункта глубинного захоронения ОЯТ (ПГЗРО).

Недостатки замкнутого ЯТЦ:

- наличие экологически опасного радиохимического производства с образованием значительных количеств РАО, требующих создания производств по их кондиционированию и последующему захоронению. Также существует возможность несанкционированного распространения Pu^{239} и других делящихся материалов;
- требуется проведение дорогостоящего комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в части оптимизации структуры и отдельных переделов ЯТЦ с целью обеспечения эффективного рециклирования урана и плутония.

Выявленные преимущества замкнутого ЯТЦ с учетом требования устойчивого развития отечественной энергетики на наш взгляд существенно превышают его недостатки. Экономическая эффективность инновационной технологии требует дальнейших исследований и обоснования.

Список литературы

1. Зильберман Б.Я., Федоров Ю.С., Римский-Корсаков А.А. и др. Возможность использования топлива из смеси обогащенного регенерированного урана и регенерированного плутония для 100%-ной загрузки активной зоны ВВЭР-1000 // Атомная энергия том 113. 2012. № 6. С. 307–313.
2. Павловичев А.М., Павлов В.И., Семченков Ю.М., Федоров Ю.С. и др. Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из смеси регенерированного урана, плутония и обогащенного урана // Атомная энергия том 104. 2008. № 4. С. 195–198.
3. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года: утвержден указами Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 года N 596-606.
4. Федоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б.Я. и др. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах // Атомная энергия том 99. 2005. № 2. С. 136–141.