|  |  |
| --- | --- |
| Курс: | «Вывод из эксплуатации объектов атомной энергетики» |
| Модуль 2: | Ядерно-топливный цикл на современном этапе |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Автор | Софронов Владимир Леонидович, профессор кафедры «Химическая технология материалов современной энергетики». | |
|  |  | |
| Рецензенты |  | |
|  |  | |
|  |  | |
| Длительность  (рекомендуемая) | | 4 часа |
|  | |  |
| Главная цель | | По окончании изучения темы обучаемый должен знать принципиальные отличия нового конверсионного производства (НКП) в системе замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) в России от ранее существующих, знать преимущества и особенности НКП, созданной на АО «Сибирский химический комбинат».  Знать и понимать жизненные циклы как всего ядерного производства, так и вывода из эксплуатации ядерных и радиационно-опасных объектов (ЯиРОО). |
|  | |  |
| Промежуточные цели | | * Изучить преимущества и недостатки основных стадий ЯТЦ:   добычи из недр урановой руды и её переработки; производства гексафторида урана и разделения изотопов урана; изготовления тепловыделяющих элементов и получения ядерной энергии на АЭС.   * Подробно изучить жизненный цикл вывода из эксплуатации   ЯиРОО: разработки концепции и программы ВЭ; остановки и перевода в ядерно-безопасное состояние; проведения КИРО и получения лицензии. |

**1.** **Ядерный топливный цикл**

Ядерный топливный цикл представляет собой совокупность переделов ядерного топлива, включающая предприятия разного профиля, но связанных единой технологической целью.

Ядерно-топливные циклы могут отличаться в деталях, но общая их принципиальная схема сохраняется.

**2. Стадии ядерно-топливного цикла**

Рассмотрим более подробно стадии ядерно-топливного цикла крупными блоками:

* добыча из недр урановой руды и её переработка;
* производство гексафторида урана и разделение изотопов урана;
* изготовление тепловыделяющих элементов;
* получение ядерной энергии на АЭС;
* радиохимическая переработка отработанного ядерного топлива;
* переработка, обезвреживание и захоронение РО.

**3.** **Длительность различных стадий ЯТЦ**

В таблице 1 приведены средние длительности основных стадий ЯТЦ.

Таблица 1 – Длительность основных стадий ЯТЦ

|  |  |
| --- | --- |
| **Стадия технологического цикла** | **Длительность стадии, мес.** |
| Добыча урановой руды, производство UF6 | 4 – 6 |
| Разделение изотопов (обогащение) урана | 4 – 6 |
| Производство топлива, ТВЭЛ и ТВС | 12 |
| Эксплуатация АЭС 1000 МВт | 36 |
| Выдержка облученного топлива | 6 |
| Переработка облученного топлива и его захоронение | 6 |
| **Средняя продолжительность ЯТЦ** | **72 (6 лет)** |

Из таблицы 1 следует, что:

* производство UF6 - 6 месяцев;
* обогащение U235F6 - 6 месяцев;
* производство ТВС - 12 месяцев;
* эксплуатация АЭС - 36 месяцев;
* выдержка и переработка ОЯТ - 12 месяцев.
* Итого – 6 лет.

**4.** **Схема ЯТЦ с реактором на быстрых нейтронах**

На рисунке 1 приведена схема ЯТЦ с реактором на быстрых нейтронах.

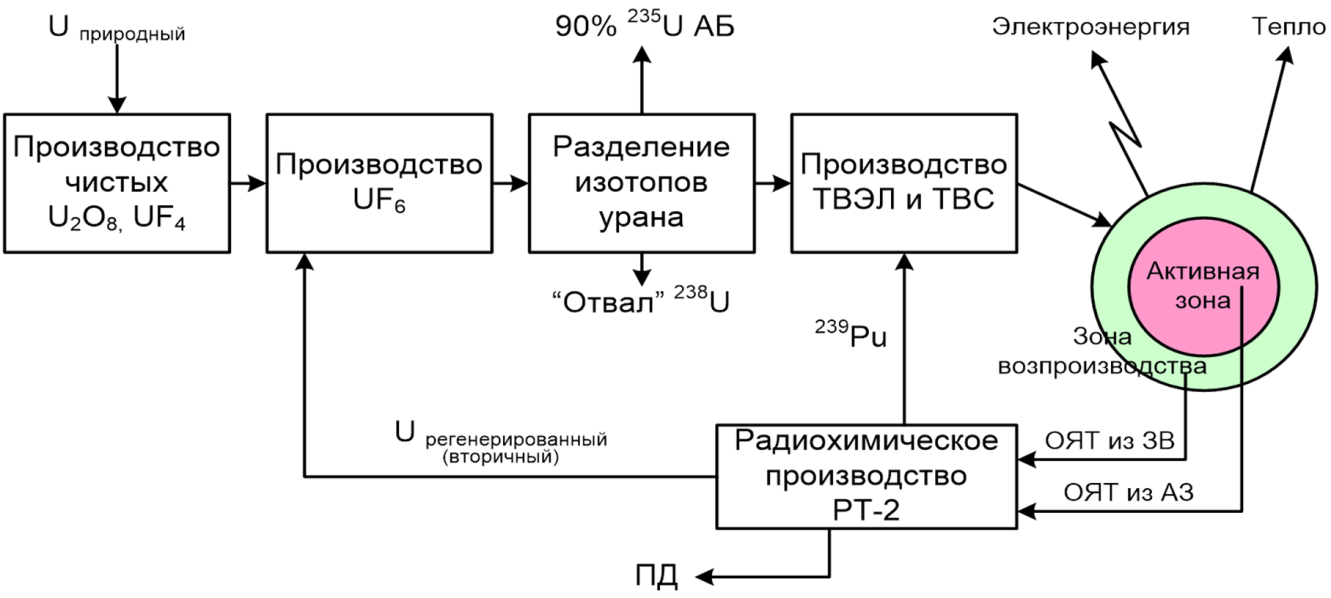
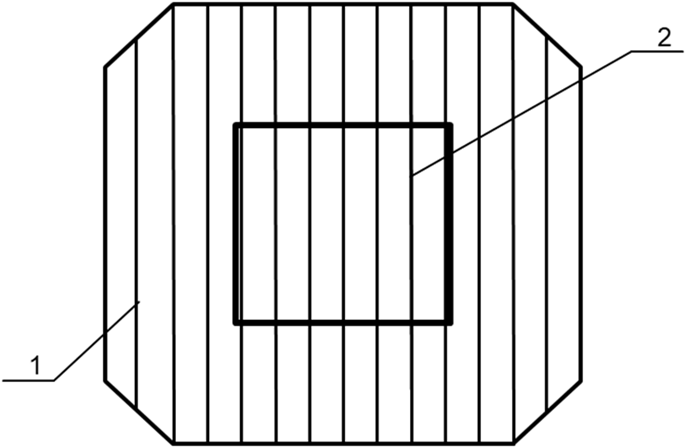


Рисунок 1 – Схема ЯТЦ с реактором на БН

Она включает стадии получения: оксидов тетра- и гексафторида урана, разделения изотопов урана, ТВЭЛ и ТВС, реактор на быстрых нейтронах и радиохимическую переработку ОЯТ с возвратом Pu-239 и U-238 в ЯТЦ.

Сечение реактора показано в цвете.



1 – периферийная зона; 2 – активная зона

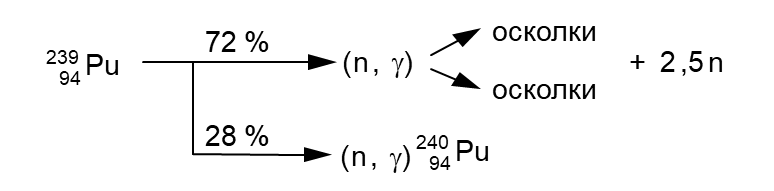
Рисунок 2 – Сечение реактора

Центр – активная зона (2), в которой происходит распад ядер Pu-239 с выделением (2-3) 0n.

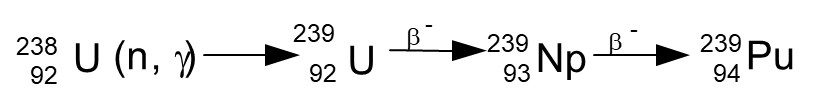
В периферийной зоне (1) происходит воспроизводство Pu-239 из 238U (UO2).

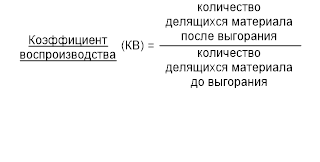
Ниже приведены ядерные реакции распада Pu-239 и синтеза Pu-239 из 238U (UO2).

Активная зона ‒ UO2-PuO2 или PuO2 (239Pu – 10-20 %):



Зона воспроизводства ‒ 238U (UO2):



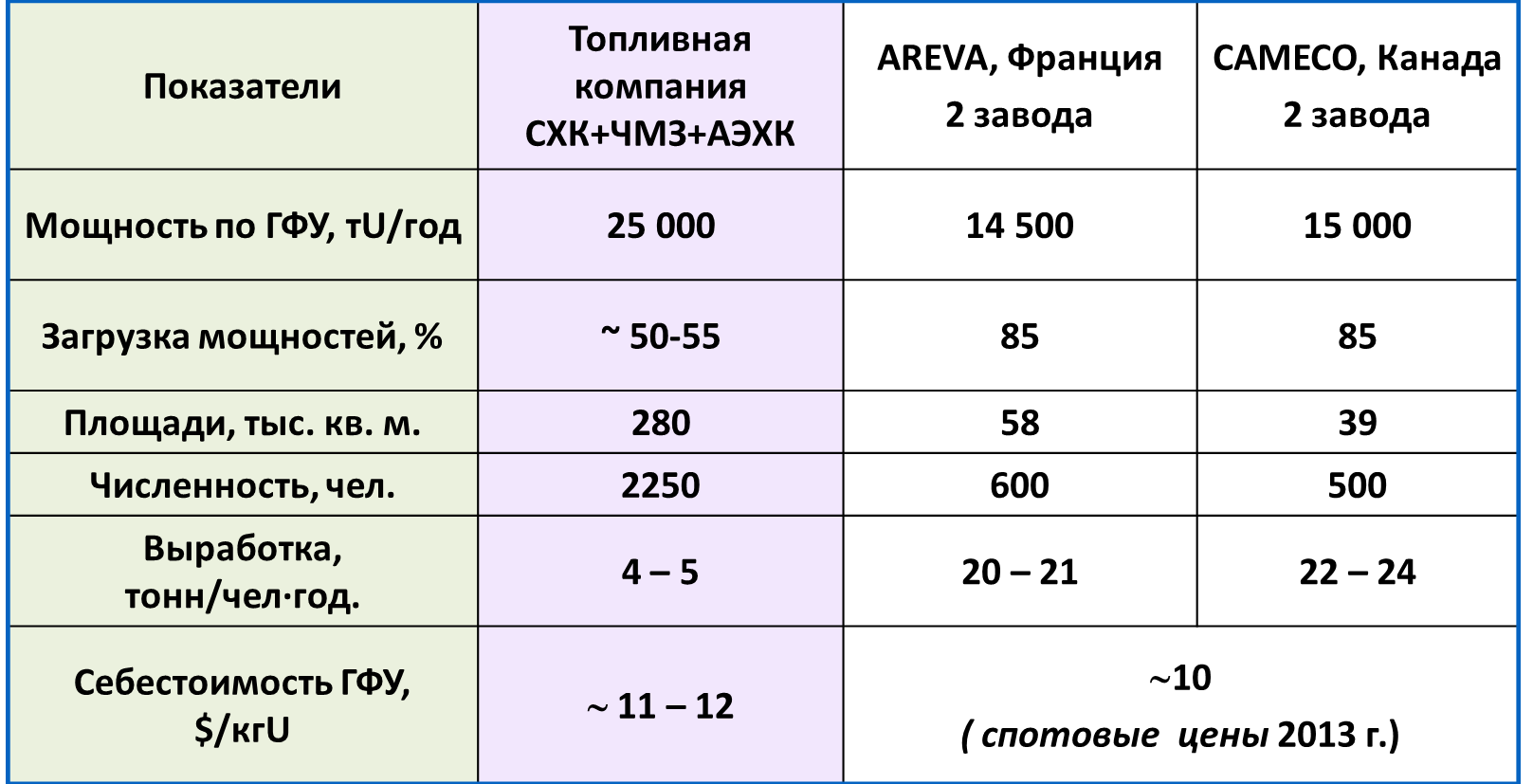


При этом коэффициент воспроизводства Pu-239 находится в пределах 1,2-1,4, т.е. энергию сжигаем меньше, чем получаем!

**5.** **Технико-экономические показатели основных производителей ГФУ**

Технико-экономические показатели основных производителей ГФУ – Российских предприятий, англо-французских и канадо-американских приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Технико-экономические показатели основных производителей ГФУ



Из таблицы 2 следует, что спотовые цены всех производителей примерно одинаковы, но выработка на одного работника в России в 4 раза меньше, поэтому возникла необходимость увеличения этого показателя в России.

Рассмотрим пути повышения эффективности уранового производства в России.

**6.** **Потоки сырья в ТК «ТВЭЛ»**

На рисунке 3 показаны потоки сырья – логистика в ТК «ТВЭЛ» до 2017 г.

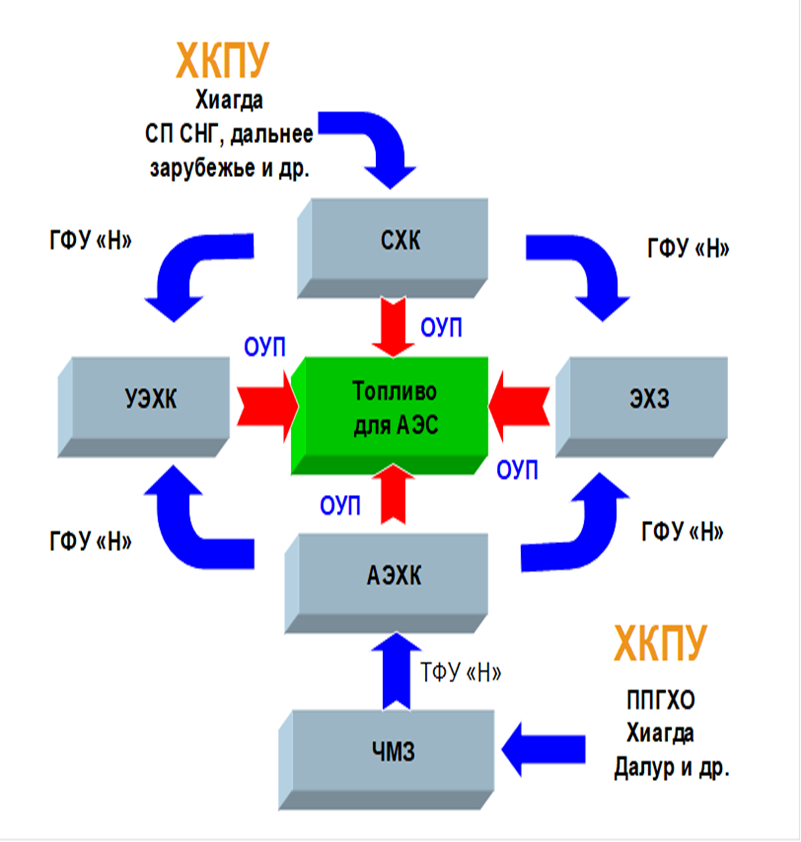


Рисунок 3 - Логистика в ТК «ТВЭЛ» до 2017 г.

В центре приведены потребители урановой продукции – АЭС, а по краям - поставщики – UF6 - 4 завода по разделению изотопов урана: УЭХК, ЭХЗ, ЗРИ-СХК и ЗРИ-АЭХК, а также две цепочки – производителей гексафторида урана:

1) СХК - поставщики уранового сырья – Хиагда, дальнее и ближнее зарубежье;

2) ЧМЗ, АЭХК - поставщики уранового сырья – ППГХО, Далур и т.д.

Логистика второй цепочки в 2 раза хуже, соответственно 5-6 и 10-12 тыс. км.

Поэтому ГК «Росатом» приняла решение» ‒ улучшить логистику поставки урановой продукции на заводы РИ.

Схема основных потоков урана в топливной компании после 2017 года приведена на рисунке 4. При этом все урановое сырьё после первичной обработки поступает на СХК.

АЭХК и ЧМЗ – закрываются урановые производства, в том числе и ЗРИ.

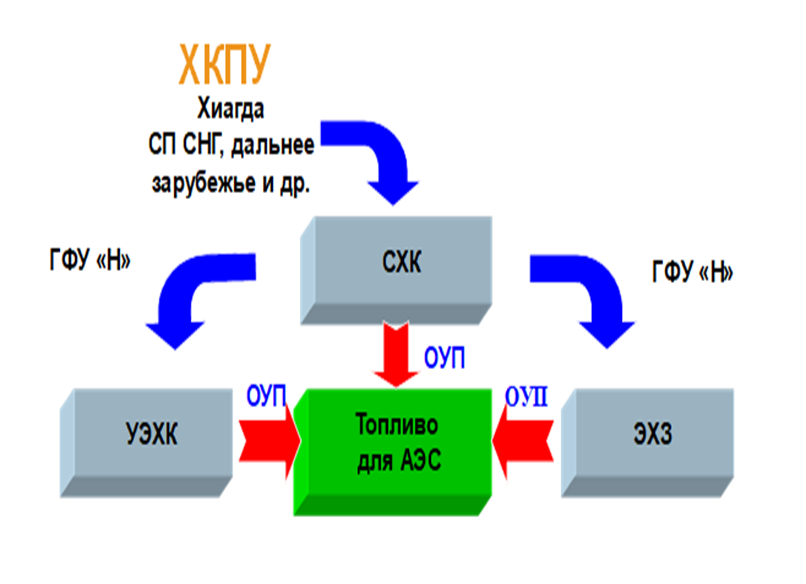


Рисунок 4 - Логистика в ТК «ТВЭЛ» после 2017 г

**7.** **Цели проекта НКП**

Основными целями проекта создания НКП является:

* создание современного, производства, способного перерабатывать

различное урановое сырьё;

* переработка всех оборотов, возникающих в топливной компании;
* максимальная концентрация передела на одной производственной

площадке;

* получение UF6, соответствующего международному стандарту ASTM-787,

и по себестоимости, позволяющей конкурировать на мировом рынке обогатительных услуг.

**8.** **Вариант размещения зданий и сооружений НКП**

Видно, что цели были поставлены очень высокие и для их выполнения предполагалось построить новый завод «НКП» на СХК, схема которого показана на рисунке 5.

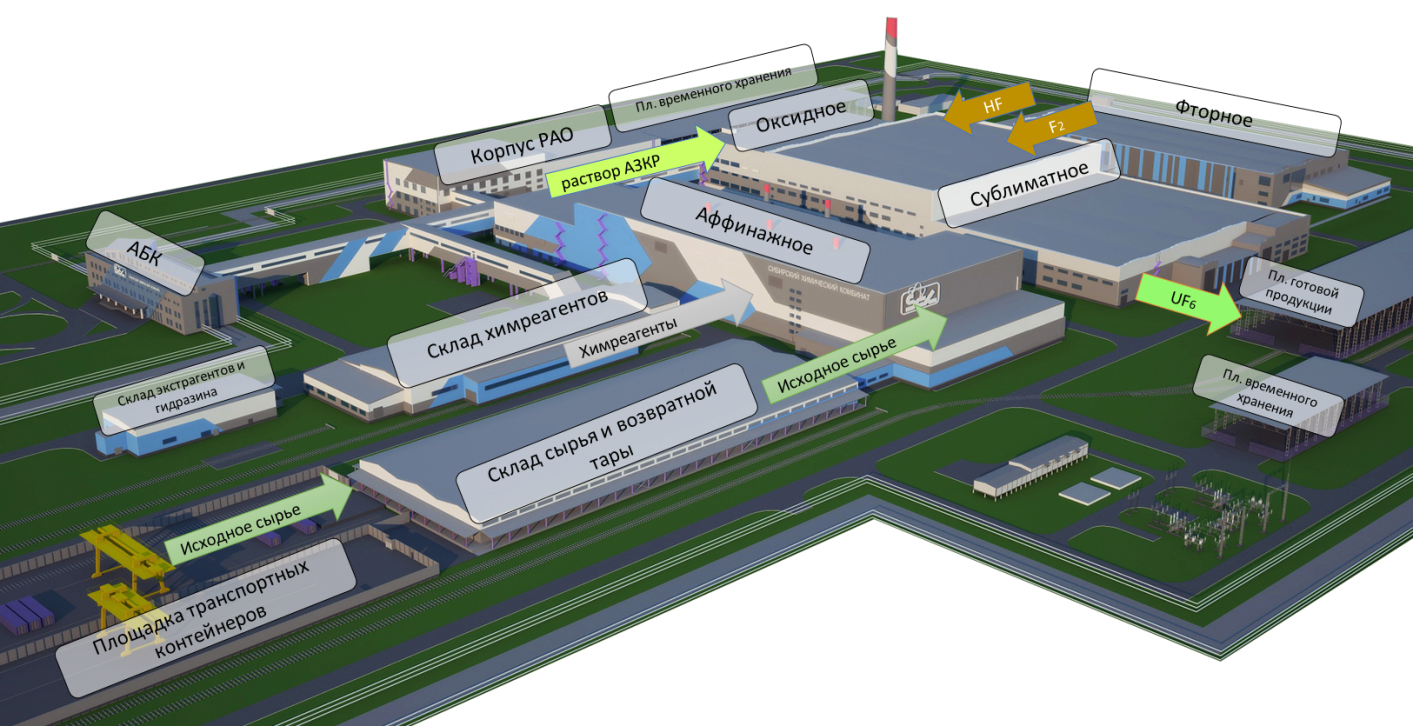


Рисунок 5 – Схема размещения зданий и сооружений НКП

Завод включал следующие производства: аффинажное, оксидное, сублиматное, переработки РАО и вспомогательные участки.

При этом в проект было заложено, что общий периметр НКП составит 2,5 км, площадь - 28,5 га, плотность застройки – 48,5%, коэффициент использования территории – 86,5%, протяженность ж/д – 3,7 км, автодорог – 6,2 км.

К сожалению, все это осталось лишь на бумаге и было принято решение модернизировать и использовать только существующие производства на СХК.

**9.** **Принципиальная схема производства УП**

Принципиальная схема производства УП на АО «СХК» показана на рисунке 6 и включает 3 завода:

* РХЗ – азотнокислое растворение уранового сырья и аффинаж;
* СЗ – получение оксидов и UF6;
* ЗРИ – разделение изотопов урана.

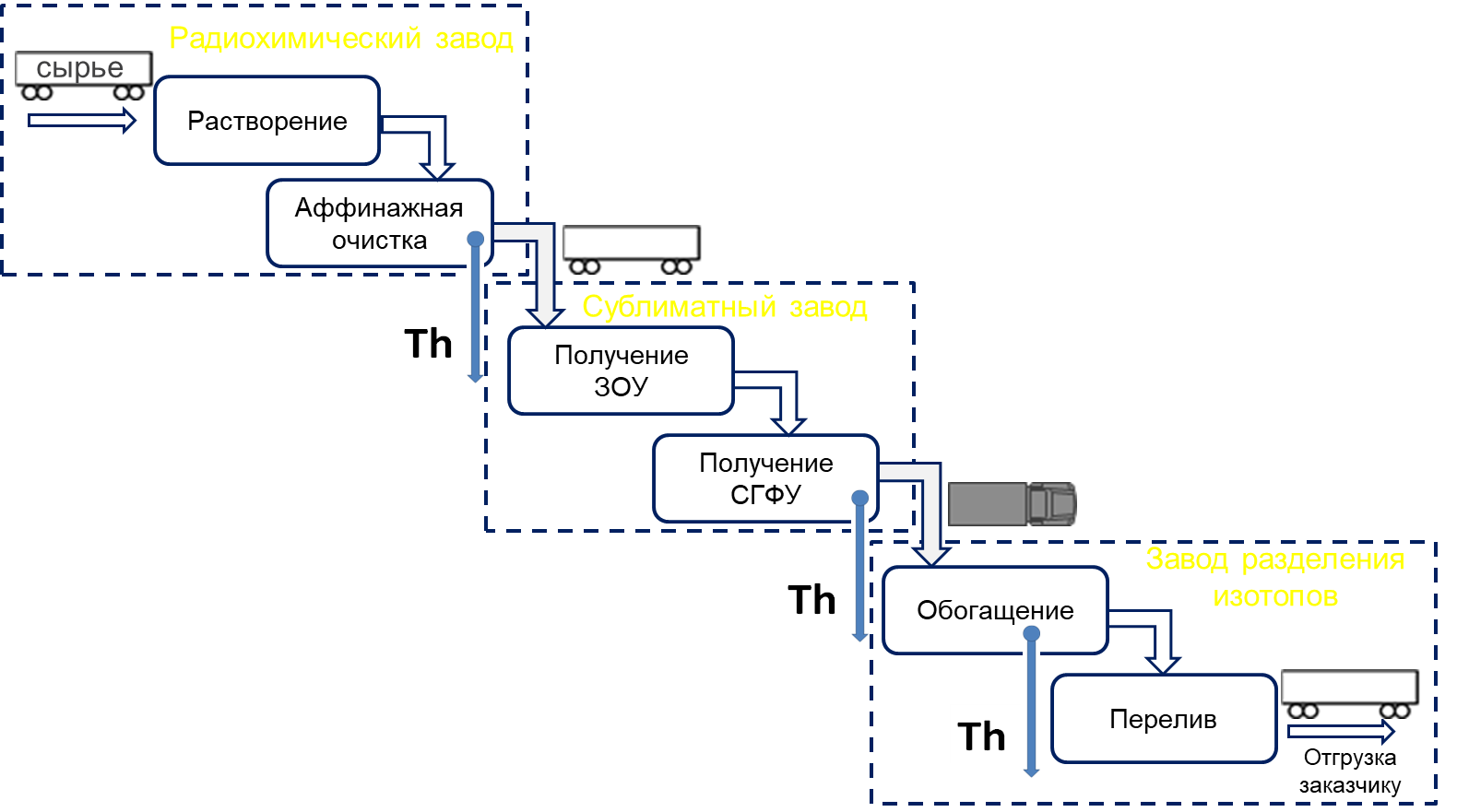


Рисунок 6 – Принципиальная схема производства УП

**10.** **Действующая технологическая схема конверсии на АО «СХК»**

Проанализируем действующую технологию производства UF6. Она включает:

* получение раствора уранил-нитрата;
* экстракционный аффинаж раствора;
* химическую денитрацию раствора уранил-нитрата методом осаждения

полиуранатов аммония;

* получение ядерно-чистого U3O8 методом прокалки полиуранатов;
* получение гексафторида урана методом прямого фторирования элементным

фтором U3O8.

Эта схема имеет ряд недостатков, основными из которых являются большой расход дорогостоящего фтора – 6 атомов фтора на 1 атом урана и высокая стоимость осадителя – гидроксида аммония. В связи с этим было решено ее усовершенствовать (конверсия).

**11.** **Принципиальная схема конверсии урана в АО «СХК»**

Принципиальная схема конверсии урана на АО «СХК» несколько отличается от вышерассмотренной (отличия выделены цветом).

1. Получение азотнокислого раствора уранил-нитрата.
2. Получение ядерно-чистого уранил-нитрата методом экстракционного аффинажа.
3. Получение триоксида урана методом термической денитрации.
4. Получение диоксида урана восстановлением водородом.
5. Получение тетрафторида урана гидрофторированием в потоке газа HF.
6. Получение гексафторида урана фторированием элементным фтором тетрафторида урана.

При этом:

* вместо химической осуществляется термическая денитрация с получением

триоксида урана и его восстановление до диоксида;

* вместо прямого фторирования осуществляется двухступенчатое

фторирование – вначале более дешевым, чем фтор, фторирующим агентом ‒ фтороводородом до тетрафторида урана и затем фтором до гексафторида.

При этом расход фтора составит 2 атома на 1 молекулу гексафторида урана, т.е. в 3 раза меньше, чем при прямом фторировании.

**12.** **Существующая в АО «СХК» схема обращения с РАО при ее внедрении в новом конверсионном производстве**

Еще одним недостатком работающей схемы уранового производства на СХК является обращение с жидкими РАО. В настоящее время они в основном закачиваются под землю.

На рисунке 7 приведена существующая схема переработки уранового сырья марки «Н» (18 тыс. т/г.) и «РТ» (1 тыс. т/г.) и обращения с ЖРАО с указанием их количества. При переработке этих видов сырья образуются одинаковые ЖРАО, только в разных количествах.



Рисунок 7 – Существующая на АО «СХК» схема обращения с РАО

ЖРО образуются при:

* экстракционном аффинаже и концентрировании растворов уранилнитрата. Это (РХЗ) – растворы азотной кислоты – ЖРО-1;
* химической денитрации растворов уранилнитрата (СЗ).

Это – растворы нитрата аммония – ЖРО-2;

* уран-фторсодержащие обороты (СЗ, ЗРИ) – ЖРО-3.

**13.** **Анализ возможных схем обращения с РАО для обоснования оптимального варианта**

Рассмотрим принципы выбора возможных схем обращения с ЖРАО.

Это:

* уменьшение себестоимости продукции – это один из ключевых моментов;
* упрощение технологической компоновки нового конверсионного

производства.

Причем выбор схемы обращения с РАО должен быть основан на:

* действующих в РФ законодательных и правовых актах, регламентирующих

порядок обращения с РАО;

* лучших мировых практиках для их реализации в новом производстве, то есть

перевод всех ЖРО в ТРО.

**14**. **Вариант 1. Оптимизированная схема обращения с РАО. Мероприятия по оптимизации**

Переработка всех видов ЖРО на СХК предполагает достижение следующих результатов согласно варианта 1:

* частичный рецикл аммиачно-нитратных маточных растворов для

использования взамен азотной кислоты – ЖРО-1 и 2;

* реализация нитрата аммония из сырья «Н» (ЖРО-2), как удобрения;
* извлечение фтора из растворов (ЖРО-3) в виде CaF2 для получения БФВ и

сброс растворов в водоемы.

А в соответствие с вариантом 2:

* упаривание, цементирование и контейнеризация ЖРО;
* перевод среднеактивных ЖРО в ТРО (остекловывание).

**15. Жизненный цикл ОИАЭ**

Жизненный цикл ОИАЭ (согласно ст. 3 ФЗ-170 «Об использовании АЭ») приведен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Жизненный цикл ОИАЭ

Он включает следующие стадии:

* размещения объекта;
* проектирование;
* конструирование;
* строительство;
* эксплуатация:
* вывод из эксплуатации.

**16. Жизненный цикл проекта вывода из эксплуатации ядерной установки**

Рассмотрим более подробно жизненный цикл ВЭ ЯиРОО (рисунок 9).

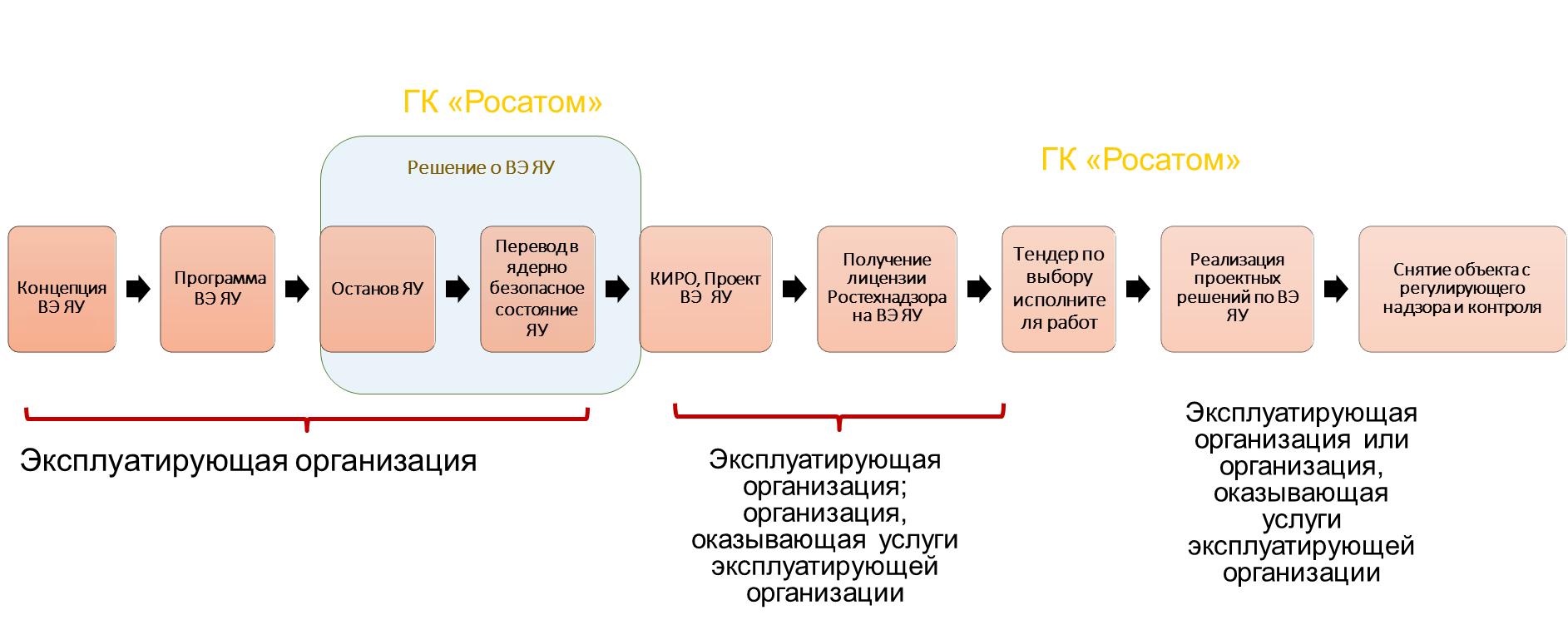


Рисунок 9 – Жизненный цикл ВЭ ЯиРОО

Он включает следующие стадии:

* разработка концепции вывода из эксплуатации;
* разработка программы вывода из эксплуатации;
* остановка ядерной установки;
* перевод в ядерно безопасное состояние;
* проведение КИРО;
* получение лицензии;
* тендер по выбору исполнителя;
* реализация проекта по ВЭ;
* снятие объекта с регулирующего надзора и контроля.

**17. Задачи нормативного регулирования вывода из эксплуатации ОИАЭ**

Задачи нормативного регулирования вывода из эксплуатации ОИАЭ включают:

* обеспечение ядерной, радиационной и экологической безопасности;
* решение вопросов финансирования деятельности по выводу из

эксплуатации;

* стимулирование эксплуатирующих организаций на осуществление

деятельности по выводу из эксплуатации с целью минимизации рисков и затрат.

**18. Варианты вывода из эксплуатации ЯРОО**

Варианты вывода из эксплуатации ЯРОО приведены в «Отраслевая концепция вывода ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения», утвержденной в 2008 году С.В. Кириенко, которая устанавливает 3 базовых варианта ВЭ ЯРОО:

* ликвидация (немедленная или отложенная);
* создание объекта окончательной изоляции («безопасное захоронение на

месте»);

* конверсия.

**19. Типовой процесс ВЭ ЯРОО – подготовительный этап**

Типовой процесс ВЭ ЯРОО (подготовительный этап) включает:

* окончательный останов ЯРОО;
* выгрузку и удаление с площадки ОЯТ и ЯМ (приведение объекта в ядерно

безопасное состояние);

* удаление рабочих сред, проведение дезактивации оборудования и

помещений;

* разработку программы и проведение КИРО;
* разработку концепции ВЭ с проведением ТЭИ вариантов вывода и выбором

наиболее приемлемого варианта;

* разработку программы ВЭ;
* разработку ТЗ на проект ВЭ и отчета по обоснованию безопасности;
* разработку комплекта документов на получение лицензии на ВЭ.

**20. Типовой процесс ВЭ ЯРОО – вариант «немедленная ликвидация»**

Типовой процесс ВЭ ЯРОО (вариант «немедленная ликвидация») включает следующие операции:

* создание участков по переработке РАО;
* выполнение работ по дезактивации и демонтажу оборудования и

строительных конструкций;

* переработка образовавшихся РАО, их контейнеризация и сдача на

хранение и захоронение;

* реабилитация загрязненной территории;
* снятие объекта с регулирующего контроля.

**21. Типовой процесс ВЭ ЯРОО – вариант «отложенная ликвидация»**

Типовой процесс ВЭ ЯРОО (вариант «отложенная ликвидация») включает:

* локализацию и консервацию высокоактивного оборудования;
* долговременную выдержку этого оборудования. Во время выдержки

осуществляется:

- создание участков по переработке РАО;

- дезактивация и демонтаж слабозагрязненного и чистого оборудования;

- переработка и сдача накопленных РАО;

* переработку образовавшихся РАО, их контейнеризацию и сдачу на хранение

и захоронение;

* реабилитацию загрязненной территории;
* снятие объекта с регулирующего контроля.

**22. Типовой процесс ВЭ ЯРОО – вариант «создание объекта окончательной изоляции»**

Типовой процесс ВЭ ЯРОО (вариант «создание объекта окончательной

изоляции») включает:

* создание участков по переработке РАО;
* выполнение работ по дезактивации и демонтажу оборудования,

дезактивации поверхностей;

* создание системы дополнительных защитных инженерных барьеров с целью

надежной локализации радионуклидов в месте нахождения на весь период потенциальной опасности;

* переработку образовавшихся РАО, их контейнеризация и сдача на хранение и

захоронение;

* реабилитацию загрязненной территории;
* снятие объекта с регулирующего контроля в качестве исходного ЯРОО,

постановка на учет как «пункта хранения – пункта консервации – пункта захоронения особых РАО»;

* проведение мониторинга подземных вод, приземного воздуха и т.п.

**23. Типовой процесс ВЭ ЯРОО – вариант «создание объекта окончательной изоляции**

Источниками финансирования ВЭ ЯРОО являются:

* целевые средства федерального бюджета;
* средства бюджетов субъектов РФ;
* средства специальных фондов;
* средства, получаемые в ходе международного научно-технического

сотрудничества и помощи;

* другие средства, использование которых не противоречит

законодательству РФ.