

ОБЕДНЕННЫЙ ГЕКСАФТОРИД УРАНА

(современная ситуация, вопросы
безопасного обращения и перспективы)



2020

Авторы доклада:

Александр Никитин,
руководитель ЭПЦ «Беллона»

Олег Муратов,
физик-ядерщик, начальник отдела радиационных технологий АО «ТВЭЛ»

Ксения Вахрушева,
канд. экон. наук, эксперт международного объединения BELLONA

Редактор: Елена Веревкина

Дизайн: Александра Солохина

Доклад подготовлен при поддержке и участии
Комиссии по экологии Общественного совета ГК «Росатом»

Издатели:

ЭПЦ «Беллона»

АНО содействия охране окружающей среды
«Экспертно-правовой центр «Экоправо»

BELLONA

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений.....	4
Предисловие.....	5
Введение.....	6
ГЛАВА 1. Несколько слов о ядерной физике и радиоактивности для неспециалистов	8
ГЛАВА 2. Гексафторид урана и его свойства	11
2.1. Физические свойства гексафторида урана.....	12
2.2. Химические свойства гексафторида урана.....	13
ГЛАВА 3. Что такое ОГФУ	16
3.1. Статус ОГФУ в России.....	17
3.2. Регенерированный уран, его особенности и отличия от природного урана	18
ГЛАВА 4. Обращение с ОГФУ	20
4.1. Образование и накопление.....	20
4.2. Хранение ОГФУ и обслуживание контейнеров	22
4.3. Транспортировка.....	24
4.4. Случаи и возможные сценарии разгерметизации контейнеров при хранении и транспортировке	25
4.5. Переработка и использование ОГФУ	28
4.5.1. Использование ОГФУ в ядерном топливном цикле.....	29
4.5.2. Использование ОГФУ в промышленности.....	31
4.5.3. Переработка (обесфторивание) ОГФУ	35
4.6. Экологические аспекты при создании структуры по обращению с ОГФУ (лицензирование и государственная экологическая экспертиза)	37
ГЛАВА 5. Экономика обращения с ОГФУ	39
ГЛАВА 6. Перспективы переработки и ликвидации запасов ОГФУ	42
ГЛАВА 7. Использование ОГФУ за рубежом	44
7.1. США	44
7.2. Франция	45
7.3. Страны URENCO	46
7.4. Другие страны	47
ГЛАВА 8. Как организовать общественное участие в решении вопросов безопасного обращения с ОГФУ	48
Заключение.....	51
Список использованных источников.....	53

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЗОУ – закись-окись урана.

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

ОВОС – оценка воздействия на окружающую среду.

ОГФУ – обедненный гексафторид урана.

ОЗОУ – обедненная закись-окись урана.

ОУП – обогащенный урановый продукт.

ОЯТ – отработавшее ядерное топливо.

РАО – радиоактивные отходы.

ЯТЦ – ядерный топливный цикл.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ядерные технологии, а также процессы, явления и последствия, которые возникают при их использовании, вызывают интерес не только у специалистов, но и у широкого круга заинтересованной общественности. Людей в первую очередь интересует, насколько безопасны эти технологии и каково их влияние на здоровье человека и окружающую среду. Поэтому общественная активность и заинтересованность средств массовой информации, появившиеся в связи с возобновлением транспортировки обедненного гексафторида урана (ОГФУ) из Германии на предприятия Госкорпорации по атомной энергии «Росатом», вполне объяснимы.

Одной из причин повышенного интереса и беспокойства людей стало отсутствие у общественности объективной и своевременной информации и знаний о технологиях использования ОГФУ. Вопрос обращения с ОГФУ стал предметом рассмотрения на самом высоком уровне в атомном ведомстве и в регионах присутствия предприятий, на которых хранится или перерабатывается ОГФУ. В Комиссии по экологии Общественного совета ГК «Росатом» была создана рабочая группа, в которую приглашены представители таких экологических организаций, как российское отделение Гринпис, «Беллона», РСоЭС, «Гражданин», НИИПЭ и другие, а также представители образовательных и научных учреждений и организаций ГК «Росатом». Было принято решение силами экспертов этих организаций подготовить информационный доклад по вопросам обращения с ОГФУ. В подготовке доклада были заинтересованы также общественные экологические организации и активисты тех регионов, на территории которых хранится и перерабатывается ОГФУ.

Авторы настоящего доклада ставят своей целью поделиться информацией с заинтересованной общественностью, представители которой не являются специалистами и не обладают специальными знаниями в области использования ядерной энергии и обращения с ОГФУ. Авторы в максимально доступной форме постарались объяснить, что собой представляет и откуда берется обедненный гексафторид урана, какими свойствами он обладает, с какой целью его завозят, как используют и хранят на предприятиях атомной отрасли, а также какие правила и технологии применяются при обращении с этим веществом.

Кроме того, в докладе рассмотрены перспективы и этапы дальнейшего использования ОГФУ на предприятиях ГК «Росатом», которые были определены Программой безопасного обращения с ОГФУ Госкорпорации «Росатом», подготовленной в конце 2019 года и принятой в 2020 году. Изложены основные подходы к общественному контролю и вопросы, которые возникли в ходе обсуждения концепции обращения с ОГФУ с общественностью.

При подготовке доклада использованы материалы из открытых источников, а также информация и документы, предоставленные топливной компанией «ТВЭЛ» и акционерным обществом «Техснабэкспорт».

ВВЕДЕНИЕ

Информация, представленная в докладе, касается обращения с обедненным гексафторидом урана, который образуется в процессе обогащения природного урана. Под термином «обращение с ОГФУ» подразумеваются все действия, связанные с образованием, учетом, использованием, переработкой, перемещением и хранением ОГФУ.

В **первой главе** рассмотрены основные понятия, касающиеся ядерной физики, радиоактивности и видов радиоактивного излучения, – с учетом того, что читатель не является специалистом в этих областях знаний.

Вторая глава содержит сведения о том, как производят гексафторид урана, какими химическими и физическими свойствами он обладает и почему он так важен для атомной энергетики.

В **третьей главе** раскрывается основная тема доклада – что такое обедненный гексафторид урана. Особое внимание уделено статусу ОГФУ, поскольку этот вопрос стал камнем преткновения между противниками использования зарубежного ОГФУ на предприятиях России и теми, кто считает, что технологии использования ОГФУ являются абсолютно приемлемыми в плане безопасности и законности.

Раздел 3.2 «Регенерированный уран, его особенности и отличия от природного урана» подготовлен в связи с тем, что представителям общественности и экологических организаций по различным причинам бывает трудно понять, в чем отличия ОГФУ, образованного в процессе обогащения природного урана, от обедненного урана, который получен в процессе переработки восстановленного (регенерированного) отработавшего ядерного топлива.

В **четвертой главе** дано подробное описание всех процессов, которые входят в понятие «обращение с ОГФУ», начиная от производства и заканчивая транспортировкой, хранением, использованием и переработкой. Подробно описаны процессы обслуживания контейнеров и организация хранения и транспортировки. Кроме этого, приведены возможные сценарии возникновения аварийных ситуаций и их последствия. Также содержится информация об использовании ОГФУ в ядерном топливном цикле и промышленности.

В **пятой главе** рассмотрены экономические аспекты обращения с ОГФУ. Оценить стоимость хранения и переработки ОГФУ в России сложно, поскольку информация о стоимости отдельных операций, связанных с обращением с ОГФУ, в открытом доступе отсутствует. Поэтому экономический анализ выполнен в основном по данным зарубежных источников.

В **шестой главе** сделан обзор перспектив переработки и ликвидации запасов ОГФУ. Приведены основные этапы дорожной карты, которая определена в актуализированной Концепции безопасного обращения с ОГФУ и в Программе безопасного обращения с ОГФУ Госкорпорации «Росатом». Перечислены задачи, которые должны быть решены для полной ликвидации запасов ОГФУ, накопленных на предприятиях АО «ТВЭЛ».

В **седьмой главе** изложена информация об использовании ОГФУ за рубежом. Запасы обедненного урана сейчас сконцентрированы в странах, которые эксплуатировали ранее или продолжают эксплуатировать разделительные производства, – России, США, Франции, Китае и странах, где расположены предприятия компании URENCO, – Германии, Великобритании, Нидерландах и на заводе в США (г. Юнис). Обращено внимание на статус ОГФУ в странах, где сконцентрированы его запасы.

Восьмая глава посвящена такому важному вопросу, как общественное участие в решении вопросов обращения с ОГФУ. Вопрос общественного участия (включая общественный контроль) всегда стоит на повестке дня, когда речь заходит о проектах по использованию атомной энергии, и это касается не только обращения с ОГФУ. Также рассмотрены основные задачи общественного участия, принципы и методы его организации.

ГЛАВА 1.

Несколько слов о ядерной физике и радиоактивности для неспециалистов

Для получения энергии в ядерных реакторах различного назначения используют в основном урановое топливо. Содержание урана в земной коре составляет 0,0003%, он встречается в поверхностном слое земли в виде нескольких видов отложений (руд). Урановая руда считается очень богатой, если в ней содержится 1-2% урана. На основных промышленных месторождениях России содержание урана составляет от 0,05 до 0,2%.

Уран в природных месторождениях встречается в различных формах. В состав природного урана входят три радиоактивных изотопа: ^{238}U (99,2739%), ^{235}U (0,7205%) и ^{234}U (0,0056%). В ядерных реакторах в качестве ядерного топлива используют уран, обогащенный по изотопу ^{235}U . В составе смеси природного урана находится от 0,71 до 0,73% изотопа ^{235}U . Обогащенный уран содержит более 0,73% изотопа ^{235}U . Обедненный уран содержит менее 0,71% изотопа ^{235}U .

Радиоактивность урана – это способность его атомного ядра самопроизвольно распадаться с испусканием частиц, что сопровождается выделением энергии. Удельная радиоактивность природного урана составляет 25 кБк/г. Активность природного урана ровно наполовину обусловлена ^{238}U и ^{234}U , так как они в природном уране находятся в равновесии. Удельная активность изотопа ^{235}U в природном уране в 21 раз меньше удельной активности ^{238}U .

Радиоактивный распад характеризуется временем жизни радиоактивного изотопа, типом испускаемых частиц и их энергиями. Основными видами радиоактивного распада (излучения) являются:

- α -распад (α -излучение) – испускание атомным ядром тяжелых положительно заряженных α -частиц;
- β -распад (β -излучение) – испускание атомным ядром электрона и антинейтрино, позитрона и нейтрино, поглощение ядром атомного электрона с испусканием нейтрино;
- γ -излучение – вид электромагнитного излучения, поток элементарных частиц, имеющих высокую энергию (гамма-квантов);
- спонтанное деление (нейтронный распад или нейтронное излучение) – распад атомного ядра, в результате которого, как правило, образуется поток нейтронов (элементарных частиц, не имеющих электрического заряда).

Альфа-излучение характеризуется низкой проникающей способностью и воздействует на организм только в непосредственной близости от источника излучения. Поэтому даже лист бумаги, резиновые перчатки, пластиковые очки и простой респиратор будут для него непреодолимым препятствием.

Бета-излучение обладает большей, чем альфа-излучение, проникающей способностью, поэтому для защиты от этого вида излучения используют плексиглас, стекло, тонкий слой алюминия, противогаз и др.

Зачастую радиоактивный распад сопровождается гамма-излучением, которое представляет собой поток высокоэнергетических фотонов (гамма-квантов). Гамма-излучение распространяется на большие расстояния и проникает практически сквозь любую поверхность. Для защиты применяют тяжелые металлы типа вольфрама, свинца, стали, чугуна и др.

Нейтронное излучение – продукт ядерного распада с проникающей способностью, превосходящей гамма-излучение. Лучшей защитой от нейтронного излучения являются такие материалы, как вода, полиэтилен, другие полимеры. Нейтронное излучение обычно сопровождается гамма-излучением, поэтому нередко в качестве защиты применяют многослойные экраны или растворы гидроксидов тяжелых металлов.

Единственным природным изотопом урана, в котором возможна самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция (СЦР), является ^{235}U . Поэтому этот изотоп используется как ядерное топливо в транспортных, исследовательских, энергетических и других видах ядерных реакторов. Выделение изотопа ^{235}U из природного урана – сложная технологическая задача.

Добыча урана ведется различными способами – карьерным (открытым), когда порода находится неглубоко; шахтным (закрытым), рентабельным при высоком качестве руды; и методом подземного выщелачивания (рис. 1), который является наиболее экологичным и экономически эффективным. При добыче урана методом подземного выщелачивания получают урановый раствор солей урана.

Переработка природных соединений урана включает обогащение руд (получение рудных концентратов), ураново-рудный передел (получение химических концентратов), аффинаж (получение чистых соединений урана), сублиматное (гексафторидное) и металлургические производства (получение металла и отливок из него).

Первая стадия уранового производства – концентрирование. Породу (урановую руду) дробят и смешивают с водой. Тяжелые компоненты взвеси осаждаются.

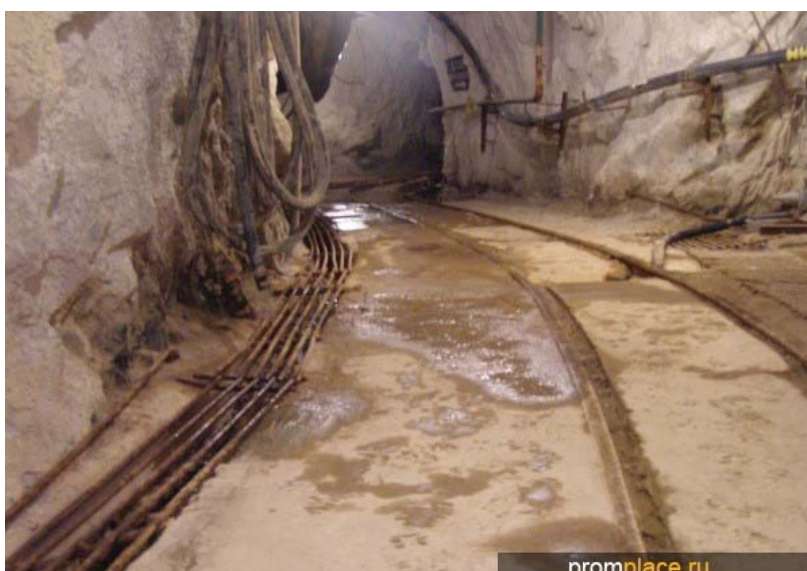
Вторая стадия – выщелачивание концентратов. В зависимости от вида породы применяют кислотное или щелочное выщелачивание.

На следующем этапе из полученного раствора нужно избирательно выделить уран. Содержание примесей должно соответствовать требованию ядерной чистоты, т. е. не превышать 10^{-6} - 10^{-7} . Эту проблему решают методами экстракции и ионного обмена, которые позволяют достаточно полно извлекать уран даже из бедных растворов.

После очистки природный уран на разделительно-сублиматных производствах Госкорпорации «Росатом» переводят в форму гексафторида (UF_6), который затем обогащается по изотопу ^{235}U и направляется на производство топлива для АЭС.



Карьерный способ добычи урановой руды



Шахтный способ добычи урановой руды

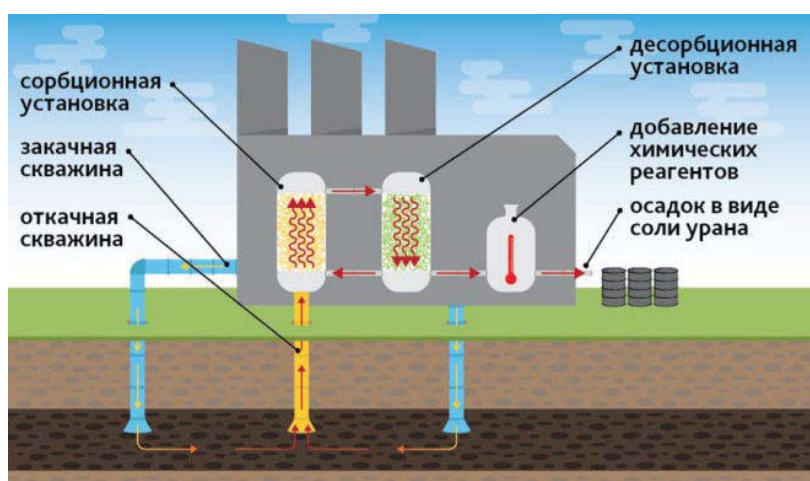


Рис. 1. Метод подземного выщелачивания

ГЛАВА 2.

Гексафторид урана и его свойства

Гексафторид урана (UF_6) играет ключевую роль в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) в качестве основного вещества, пригодного для разделения изотопов ^{235}U и ^{238}U как газодиффузионным, так и центрифужным методом, поскольку является единственным соединением урана, переходящим в газообразное состояние при относительно низкой температуре (56,4 °C).

Обогащенный изотопом ^{235}U гексафторид урана (обогащенный урановый продукт), полученный на заводах по разделению изотопов, в дальнейшем используется в производстве топлива для ядерных реакторов, а обедненный по изотопу ^{235}U отправляется на хранение и дальнейшую переработку.



Промышленная площадка разделительного завода

2.1. Физические свойства гексафторида урана

Гексафторид урана – это соединение шестивалентного урана и фтора (UF_6). Фтор здесь присутствует в виде единственного стабильного природного изотопа, фтора-19.

При нормальных условиях (т. е. при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20 °С) гексафторид урана находится в твердом состоянии. В процессе транспортировки и хранения гексафторид урана также находится в твердом состоянии и представляет собой плотное кристаллическое вещество, внешний вид которого зависит от технологии получения: от частиц нерегулярной формы, напоминающих порошок каменной соли, до бесформенной твердой массы. Плотность твердого гексафторида урана больше плотности гранита и равняется 5,09 г/см³.

Для гексафторида урана в нормальных условиях характерен прямой фазовый переход из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое (сублимация), и обратный переход из газообразного в твердое (десублимация) (рис. 2).

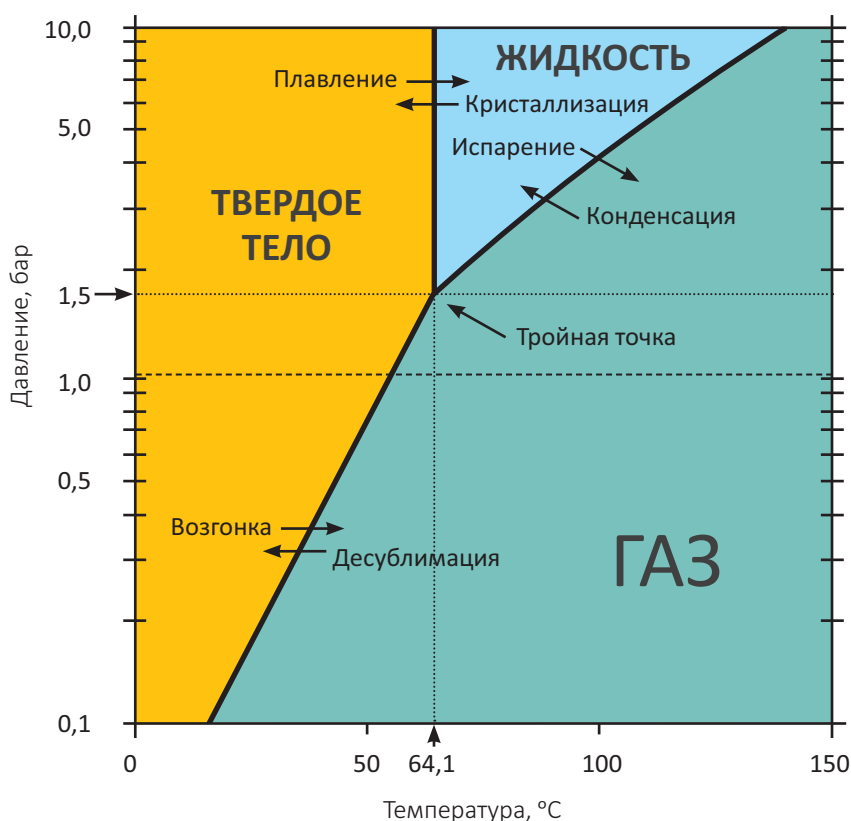


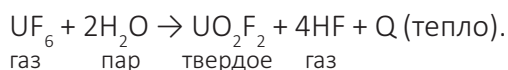
Рис. 2. Фазовые состояния гексафторида урана

Газообразный гексафторид урана – это тяжелый бесцветный газ. При температуре 64,1 °С и давлении выше 152 кПа жидкая и твердая фазы могут находиться в равновесии, а при наличии нагрева или охлаждения при этой температуре будут происходить процессы плавления или затвердевания гексафторида урана соответственно.

2.2. Химические свойства гексафторида урана

Гексафторид урана при нормальных условиях негорюч и не вступает в химические реакции с кислородом, азотом, углекислым газом и сухим воздухом. В газообразном и твердом состояниях бурно реагирует с водой, в том числе с атмосферной влагой, с образованием уранилфторида (UO_2F_2) и фтористого водорода (HF), которые очень гигроскопичны (легко поглощают влагу). Реакции очень экзотермичны, причем тепловыделение в процессе реакции с твердым гексафторидом урана значительно выше, чем с газообразным (211,6 и 156,8 кДж/моль соответственно).

При повышенных температурах газообразный гексафторид урана взаимодействует с парами воды следующим образом:



Реакция твердого гексафторида урана с водой протекает очень медленно по сравнению с газообразным, которая происходит практически мгновенно, так как образующийся мелкодисперсный аэрозоль (уранилфторид, UO_2F_2) формирует защитный слой, служащий диффузионным барьером, препятствующим поступлению воды к поверхности собственно гексафторида урана. Этот эффект приводит к существенному замедлению скорости реакции. Поэтому скорость гидролиза твердого гексафторида урана довольно низкая, в то время как газообразный UF_6 взаимодействует с водой почти мгновенно.

Гексафторид урана – сильный окислитель. В жидком виде реагирует со многими органическими веществами со взрывом, агрессивен в отношении некоторых металлов, пластиков, резины и полимерных материалов. Взаимодействуя с большинством металлов, образует фторид металла и малолетучий или нелетучий низковалентный фторид урана (UF_4).

Стойкими к воздействию гексафторида урана являются никель, легированные, в том числе и низколегированные стали, медь, медно-никелевые и некоторые алюминиевые сплавы. Также тефлон и другие фторсодержащие пластики устойчивы к гексафториду урана.

Учитывая перечисленные химические свойства гексафторида урана, на всех стадиях обращения с ним (технологические процессы, транспортировка, хранение и т. д.) необходимо исключить его взаимодействие с влагой. В аппаратах и контейнерах, заполняемых гексафторидом урана, нельзя использовать обычные углеводородные смазки, необходимо также обеспечивать отсутствие в них органических веществ.

Поскольку гексафторид урана – химически токсичное и очень едкое вещество, которое вызывает тяжелое отравление и разъедает любую живую органику с образованием химических ожогов, то в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» гексафторид урана отнесен к веществам I класса опасности. При обращении с ним необходимо обеспечивать промышленную безопасность производства, хранения и транспортировки как для химических производств. В России установлена максимальная предельно допустимая концентрация (ПДК) гексафторида урана в воздухе рабочей зоны – 0,015 мг/м³, а, например, в США предельный пороговый уровень однократного воздействия равен 0,6 мг/м³.

Радиоактивность гексафторида урана с природным содержанием его изотопов, поступающего на обогащение, несколько ниже, чем природного урана, – 17 кБк/г. Эта величина удельной активности относится к свежеприготовленному веществу, в котором отсутствуют все дочерние продукты распада уранового ряда.

После обогащения удельная активность гексафторида урана будет зависеть от степени его обогащения (табл. 1).

Таблица 1

**Удельная активность гексафторида урана
в зависимости от степени обогащения***

Вид гексафторида урана	Содержание ^{235}U , %	Удельная активность, Бк/г
Обедненный	0,1	$2,7 \cdot 10^3$
	0,2	$5,3 \cdot 10^3$
	0,45	$1,2 \cdot 10^4$
Природный	0,72	$1,7 \cdot 10^4$
Обогащенный	1,0	$1,9 \cdot 10^4$
	1,5	$2,5 \cdot 10^4$
	5,0	$6,7 \cdot 10^4$
	10,0	$1,2 \cdot 10^5$
	20,0	$2,5 \cdot 10^5$
	35,0	$5,0 \cdot 10^5$
	50,0	$6,2 \cdot 10^5$
	90,0	$1,5 \cdot 10^6$
	93,0	$1,8 \cdot 10^6$
	95,0	$2,3 \cdot 10^6$

* Значения удельной активности включают активность ^{234}U , который концентрируется в процессе обогащения, и не включают вклад дочерних продуктов.

Активность находящегося на хранении гексафторида урана зависит от продолжительности времени, прошедшего с момента его выработки, так как с течением времени в гексафториде урана накапливаются дочерние нуклиды. Поскольку все изотопы урана имеют очень длинные периоды полураспада, а дочерние изотопы ^{238}U и ^{235}U (соответственно ^{234}Th и ^{231}Th) короткие, естественное радиоактивное равновесие достигается через 150 дней. После этого удельная активность находящегося на хранении гексафторида урана с начальным природным содержанием изотопов увеличивается до 40 кБк/г.

Гексафторид урана, полученный из регенерированного урана (урана, извлеченного из отработавшего ядерного топлива, ОЯТ), дополнительно содержит достаточно большие концентрации искусственных изотопов урана, например ^{232}U , ^{233}U , ^{236}U , активность которых значительно превышает активность природных (табл. 2).

Таблица 2

Удельная активность изотопов урана

Изотоп	Содержание в природном уране, %	Удельная активность, Бк/г
^{232}U	–	$827,38 \cdot 10^9$
^{233}U	–	$356,54 \cdot 10^6$
^{234}U		$230,22 \cdot 10^6$
^{235}U		$80 \cdot 10^3$
^{236}U	–	$2,33 \cdot 10^6$
^{238}U		$12,5 \cdot 10^3$

Изотопный состав такого гексафторида урана зависит от типа реактора, в котором был облучен исходный уран, выгорания топлива, времени выдержки ОЯТ.

ГЛАВА 3.

Что такое ОГФУ

В процессе обогащения урана по изотопу ^{235}U образуются обогащенный урановый продукт (ОУП), который используется для изготовления топлива, и побочный продукт – обедненный гексафторид урана (ОГФУ) (рис. 3).



Рис. 3. Технологическая схема конверсии природного урана

ОГФУ относится к ядерным материалам, т. е. материалам, содержащим или способным воспроизвести делящиеся ядерные вещества и подлежащим государственному учету и контролю на федеральном и ведомственном уровнях. ОГФУ отличается от гексафторида природного урана изотопным составом и тем, что содержание изотопа ^{235}U в нем в несколько раз ниже. В значительной части как российских, так и зарубежных запасов ОГФУ содержится такое количество изотопа ^{235}U , которое делает экономически оправданным его повторное использование в качестве сырья для производства топлива для тепловых реакторов, хотя экономика дообогащения ОГФУ в каждом отдельном случае будет определяться соотношением цены природного урана на мировом рынке и затрат на доизвлечение ^{235}U из ОГФУ.

ОГФУ присущи те же химические свойства, что и гексафториду природного урана. Количество остаточного ^{235}U в ОГФУ зависит от технологии обогащения и может составлять примерно от 0,07% до 0,74%. Удельная активность ОГФУ определяется практически только активностью ^{238}U (12,5 кБк/г). Она составляет менее половины активности природного урана, поскольку в процессе обогащения невозможно разделить легкие изотопы и весь ^{234}U (дающий половину вклада в активность природного урана) вместе с ^{235}U переходит в ОУП. Более того, даже активность ОГФУ, полученного после обогащения регенерированного ура-

на, сравнима с активностью природного урана, так как почти все содержащиеся в регенерате высокоактивные изотопы (^{232}U , ^{233}U и ^{236}U) переходят в ОУП.

С точки зрения безопасности следует переводить химически токсичный и агрессивный газообразный ОГФУ в оксидную форму (UO_2) – твердое вещество с температурой плавления $2850\text{ }^\circ\text{C}$. Оксиды урана являются твердыми термически и химически устойчивыми соединениями, не реагируют с водой и ее парами до $300\text{ }^\circ\text{C}$, нерастворимы в большинстве минеральных и органических кислот.

При переработке ОГФУ будет происходить обесфторивание урана и переход его из потенциально химически опасного вещества в более безопасное, что значительно минимизирует риски.

3.1. Статус ОГФУ в России

Основной вопрос, который постоянно обсуждается в информационном поле и среди общественности: что такое ОГФУ – сырье или радиоактивный отход? Получить на него ответ принципиально важно, поскольку если ОГФУ – это радиоактивный отход, то возникает вопрос о законности ввоза ОГФУ из-за рубежа в Россию.

Согласно Федеральному закону от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» радиоактивными отходами являются «не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями, установленными Правительством Российской Федерации» (п. 8 ст. 3). Федеральным законом от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», регулирующим отношения в области обращения с радиоактивными отходами, «понятие "радиоактивные отходы" используется в значении, предусмотренном статьей 3 Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ "Об использовании атомной энергии"..."» (п. 2 ст. 3).

Других нормативных правовых актов, содержащих критерии отнесения к радиоактивным отходам (РАО), в Российской Федерации не существует.

Таким образом, следует выяснить, подлежит ли дальнейшему использованию обедненный гексафторид урана или нет.

ОГФУ является ядерным материалом. Благодаря высокой эффективности современной российской газодиффузионной технологии обогащения эквивалент природного урана разных марок, нарабатываемый из ОГФУ на российских разделительных предприятиях, имеет привлекательную стоимость в сравнении с мировой ценой на природный уран и поэтому используется при изготовлении топлива для АЭС. В настоящее время Россия реализует программу перехода к замкнутому ЯТЦ. Запущен в промышленную эксплуатацию реактор на быстрых нейтронах БН-800, в котором начата практическая демонстрация использования обедненного урана в составе МОКС-топлива. Сооружен завод по производству таблеточного МОКС-топлива для БН-800. Переход на загрузку активной зоны МОКС-топливом запланирован на 2022 год. Обедненный уран с увеличенным по сравнению с природным содержанием изотопа ^{238}U является сырьем для атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах.

Таким образом, ОГФУ рассматривается как стратегический запас для существующей атомной энергетики, в которой на сегодня реализован разомкнутый (или открытый) ЯТЦ, а также для замкнутого ядерного цикла, если он будет реализован.

Кроме того, ОГФУ является ценным источником фтора, который может использоваться в замкнутом по фтору разделительно-сублиматном цикле (см. гл. 4), а также в других отраслях промышленности.

Выясняя статус ОГФУ, необходимо учитывать заключения экспертов МАГАТЭ (ISBN 92-64-195254, 2001), согласно которым ОГФУ не является радиоактивным отходом и рассматривается в качестве полезного энергетического ресурса – дополнительного источника урана и фтора.

Отнесение ОГФУ к полезным ресурсам, а не радиоактивным отходам также подтверждено экспертным заключением АО «ВНИИХТ», ведущего российского научного центра по химическим технологиям.

Приведенная выше информация, а также описание возможностей использования ОГФУ, изложенное в гл. 4, свидетельствует о том, что обедненный гексафторид урана используется во многих областях российской промышленности как полезный ресурс, что, согласно вышеупомянутым нормативным правовым актам, исключает его из категории радиоактивных отходов.

ОГФУ – один из наиболее масштабных вторичных источников урана, поскольку является сырьем ядерной чистоты, что делает его привлекательным для производства ядерного топлива, а также вторичным источником фтора для неядерных направлений (металлургия, химическая промышленность). Именно такая классификация ОГФУ позволяет сегодня заключать контракты между компаниями на его импорт в качестве сырья, в том числе и на ввоз ОГФУ на территорию России.

3.2. Регенерированный уран, его особенности и отличия от природного урана

При обсуждении вопросов, связанных с обращением с ОГФУ, очень часто возникает непонимание того, в чем отличие урана, полученного из урановой руды путем конверсии (рис. 3), от регенерированного урана (регенерата).

Регенерированный уран – это уран, восстановленный в процессе переработки отработавшего ядерного топлива.

В зависимости от первичного обогащения, специфики ядерного топлива в различных реакторах, а также от технологии переработки ОЯТ регенерированный уран может иметь различное содержание изотопа ^{235}U – от десятых долей до нескольких процентов.

Регенерированный уран может быть возвращен в топливный цикл различными путями. Он может использоваться напрямую или быть дообогащен, а также смешиваться с обогащенным или природным ураном.

Применение регенерированного урана для изготовления ядерного топлива затруднено в связи с присутствием в его составе искусственных четных изотопов ^{232}U и ^{236}U и более высоким в сравнении с природной смесью содержанием ^{234}U . Указанные изотопы не могут быть отделены от ^{235}U в процессе химической переработки.

Чтобы изготовить ядерное топливо, которое соответствовало бы международным стандартам, содержание четных изотопов необходимо ограничивать. Например, изотоп ^{236}U яв-

ляется нейтронным ядом и для поддержания размножающих свойств топлива приходится дополнительно увеличивать его обогащение по изотопу ^{235}U .

Кроме того, относительно короткоживущий ^{232}U с периодом полураспада около 69 лет создает проблемы, связанные с радиационной безопасностью, поскольку продукты его распада (^{208}Tl) испускают жесткие гамма-кванты с энергией 2,6 МэВ, что требует дополнительной защиты персонала при работе с этим материалом. Учитывая, что концентрация ^{232}U в регенерированном уране зависит от многих факторов, фабрикация топлива из регенерированного урана определяется условиями радиационной безопасности персонала и нормы его содержания различаются в десятки раз для различных производств. В России содержание ^{232}U рекомендуется $2 \cdot 10^{-7}\%$.

Исходное содержание четных изотопов в регенерированном уране зависит от глубины выгорания ядерного топлива, из которого он выделен. В последние десятилетия сохраняется устойчивая тенденция к увеличению глубины выгорания топлива реакторов на тепловых нейтронах.

Переработка регенерированного урана – это высокотехнологичный и дорогостоящий процесс, поэтому не все страны используют эти технологии. В России переработка регенерата ведется в промышленных масштабах с 1977 года. С 1993 года АО «ТВЭЛ» выпускает топливо из дообогащенного регенерата как для отечественных реакторов (РБМК), так и для западных компаний.

В дальнейшем вопросы регенерированного урана в докладе рассматриваться не будут, поскольку это не имеет прямого отношения к основной теме.

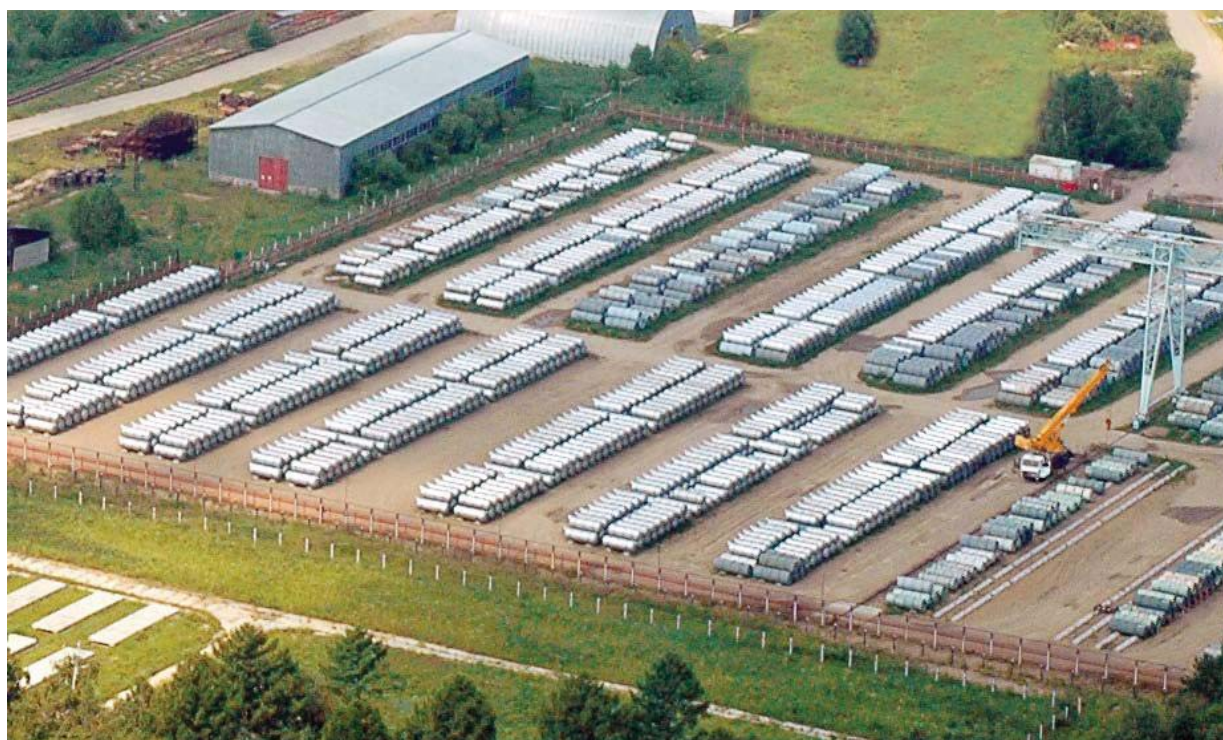
ГЛАВА 4.

Обращение с ОГФУ

К стадиям обращения с ОГФУ относятся все процессы жизненного цикла ОГФУ, начиная от его образования и заканчивая длительным хранением. Жизненный цикл включает такие этапы обращения, как накопление, хранение, транспортировка и переработка.

4.1. Образование и накопление

Проблема образования, накопления и обслуживания запасов ОГФУ появилась одновременно с развитием разделительных производств в странах, которые занимались обогащением урана. Оставшийся после обогащения урана ОГФУ, объемы которого в 6-8 раз превышали объемы ОУП, накапливался на промышленных площадках разделительных заводов.



Склад ОГФУ на Ангарском электролизном химическом комбинате

В самых первых газодиффузионных установках, на которых обогащался уран, содержание ^{235}U в ОГФУ равнялось 0,4% и более. В дальнейшем совершенствование технологий позволило снизить содержание ^{235}U в ОГФУ до ~0,3%. Газодиффузионная технология широко использовалась во многих странах до конца 1970-х годов и была практически единственной промышленной технологией обогащения урана. Таким образом, весь ОГФУ, который накапливался до конца 1970-х годов и большая часть которого сегодня находится на промышленных площадках, содержит примерно 0,3-0,4% ^{235}U .

Более эффективной технологией обогащения урана, обеспечивающей снижение содержания ^{235}U в ОГФУ до ~0,2% и менее, является газоцентрифужная технология. В центрифуге, вращающейся с большой окружной скоростью, тяжелые молекулы гексафторида с ^{238}U под действием центробежных сил концентрируются у периферии, а легкие с ^{235}U – у оси ротора центрифуги. Степень разделения пропорциональна квадрату отношения скорости вращения к скорости молекул в газе. Помимо эффективности обогащения газоцентрифужная технология по сравнению с диффузионной значительно менее энергозатратна.

В конце 1970-х годов в мире началось масштабное перевооружение разделительных производств и в настоящее время практически все заводы перешли с диффузионных на газоцентрифужные технологии.

Россия сегодня обладает наиболее совершенными газоцентрифужными обогатительными технологиями, которые позволяют снизить содержание ^{235}U в ОГФУ до 0,1% ^{235}U и менее (зарубежные – до 0,2-0,3%). Типичный диапазон концентраций ^{235}U в накопленном ОГФУ составляет 0,25-0,35%, а в значительной части накопленного ОГФУ, наработанного на разделительных мощностях прошлых поколений, – 0,4% и более. Так, например, в США у более трети накопленного ОГФУ концентрация ^{235}U составляет 0,35-0,66%.

К настоящему времени с начала развития атомной индустрии в мире накоплено более 2 млн тонн ОГФУ, в том числе свыше 1 млн тонн в России. При обогащении 1 тыс. тонн природного урана образуется ~150 тонн ОУП и ~850 тонн ОГФУ, поэтому к уже накопленному ежегодно добавляется 40-60 тыс. тонн ОГФУ. Подавляющая часть этого объема хранится в специальных герметичных стальных емкостях (контейнерах) на открытых площадках разделительных заводов.



Площадка хранения ОГФУ

В России ОГФУ образуется и хранится на четырех предприятиях разделительно-сублиматного комплекса топливной компании «ТВЭЛ» – в АО «Уральский электрохимический комбинат» (АО «УЭХК», г. Новоуральск, Свердловская область), АО «Производственное объединение Электрохимический завод» (АО «ПО ЭХЗ», г. Зеленогорск, Красноярский край), АО «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК», г. Северск, Томская область) и АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (АО «АЭХК», г. Ангарск, Иркутская область). Суммарные запасы ОГФУ на указанных предприятиях на конец 2019 года превышали 1 млн тонн.

4.2. Хранение ОГФУ и обслуживание контейнеров

ОГФУ в России хранится в толстостенных (16 мм) импортных контейнерах вместимостью 4 м³ и отечественных емкостях вместимостью 2,5 м³, изготовленных из высокопрочной углеродистой стали, проходящих испытания избыточным давлением 28 и 10,5 кг/см² соответственно и рассчитанных на экстремальные механические и коррозионные воздействия.



Контейнеры зарубежного производства

В конструкцию емкостей заложен значительный запас прочности, обеспечивающий устойчивость к механическим воздействиям и к воздействию высоких температур. Нормативный срок эксплуатации емкостей составляет для отечественных – 80 лет, для импортных – не ограничен, с вероятным риском утечки 10^{-7} и с возможностью оперативного перетаривания ОГФУ, а также ремонта дефектных контейнеров.

После изготовления контейнеры подвергаются испытаниям на механическую прочность, герметичность, термостойкость и устойчивость к гидростатическому давлению. Для испытаний на прочность проводят сбрасывание контейнера с высоты 9 м на бетонную плиту

с металлическим штырем диаметром 36 мм. Падение с такой высоты равносильно столкновению с бетонной плитой на скорости 45 км/час. Испытания на теплостойкость проводят выдержкой контейнера в открытом огне при температуре 800 °С в течение получаса. Испытания на герметичность проводят сопротивляемостью гидравлическому давлению, вдвое превышающему рабочее, при температуре от минус 40 °С до плюс 40 °С (указанные выше параметры испытаний применяются для импортных контейнеров типа 48Y).

Учитывая, что ОГФУ переходит в газообразное состояние при температуре 56,4 °С, на всех площадках он находится в твердом состоянии. Кроме ОГФУ часть обедненного урана хранится в других химических формах – в виде оксида или металла.

Контейнеры с ОГФУ обслуживаются на площадках в соответствии с программой и инструкциями по обслуживанию контейнеров российского производства или контейнеров типа 48Y зарубежного производства. Программа и инструкции предусматривают осмотр, контроль и другие действия, необходимые для гарантированной сохранности контейнеров. При техническом обслуживании выполняется оценка состояния контейнеров, замена дефектных клапанов и пробок, перекрашивание цилиндров, контроль скорости коррозии и принимаются меры к ее минимизации. Кроме этого, осуществляется техническая эксплуатация территории, инвентарный контроль, проводятся исследования по совершенствованию технологии хранения, обеспечивается безопасность.



Контейнеры российского производства

Если происходит утечка ОГФУ из цилиндра, вышедший UF_6 взаимодействует с водяным паром в воздухе, образуя фторид уранила (UO_2F_2) и фтористый водород (HF). Фторид уранила – твердое вещество, которое покрывает поверхность твердого UF_6 и тем самым ограничивает дальнейшее протекание реакции между UF_6 и влагой воздуха с образованием фтороводорода. Выброс фтористого водорода в атмосферу также замедляется при формировании пробки. В случае обнаружения утечки ОГФУ через клапан производят его замену. При коррозии стенки цилиндра целостность последнего восстанавливается заплаткой при помощи сварного стального шва. Контейнеры и емкости хранятся на площадках таким образом, чтобы была обеспечена возможность визуального осмотра любой упаковки.

В рамках повышения надежности контейнеров на всех разделительных предприятиях создаются комплексные системы диагностики, обслуживания и ремонта контейнеров. Методы диагностирования позволят выявлять и оценивать степень риска возникновения дефектов, определять уже возникшие дефекты, а также вероятность появления дефектов в будущем. Такая комплексная система является неотъемлемой частью внедренных на предприятиях систем менеджмента качества и экологической безопасности, включая сертифицированные по стандартам серий ISO-9000 и ISO-14000.

НИОКР, которые проводятся в области безопасного хранения ОГФУ, направлены на совершенствование систем мониторинга, технического диагностирования и контроля состояния контейнеров, технологий обращения с дефектными емкостями, выявленными при хранении. Кроме того, продолжаются исследования для обоснования возможности продления назначенного срока эксплуатации контейнеров российского производства свыше 80 лет.

На площадках хранения постоянно осуществляют радиационный контроль емкостей с ОГФУ, а безопасность технологии его хранения подтверждается лицензиями Ростехнадзора, выдаваемыми предприятиям.

4.3. Транспортировка

По классификации ООН все опасные грузы в зависимости от видов опасности, а также их физических, химических и биологических свойств разделяются на классы опасности. В России действует ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка», который распространяется на опасные грузы и устанавливает в том числе номенклатуру показателей и критерии для отнесения грузов к опасным, их классификацию, правила перевозки и маркировки на грузовые единицы.

Гексафторид урана указанными выше документами отнесен к 7-му классу опасности. Порядковый номер класса опасности (с 1-го по 9-й) не характеризует уровень или степень опасности груза. Для указания на опасные свойства грузов, а также их физические и химические свойства или принадлежность к определенной группе опасных веществ применяются классификационные коды, которые сами по себе раскрывают свойства опасного груза. Для гексафторида урана классификационные коды не назначены, т. е. дополнительных опасных свойств, таких как взрывоопасность, удушающие газы, самовозгорание и т. д. (всего в классификаторе их 12), для гексафторида урана не определено.



Контейнеры с ОГФУ на судне

Транспортировка ОГФУ из Западной Европы в Россию осуществляется морским транспортом через порт Санкт-Петербург (или порт Усть-Луга) и далее железнодорожным транспортом в места переработки и хранения. Следует заметить, что, в отличие от транспортировок нефти, газа, ядохимикатов и других опасных грузов, за всю историю (более 60 лет) перевозок ОГФУ по территории России (и СССР) не было ни одного инцидента и аварии на автомобильном и железнодорожном транспорте.

4.4. Случаи и возможные сценарии разгерметизации контейнеров при хранении и транспортировке

В случае разгерметизации контейнера главную опасность представляет утечка гексафторида урана (UF_6) в окружающую среду: он реагирует с влагой воздуха с образованием токсичной фтористоводородной кислоты (HF) и уранилфторида (UO_2F_2). Во всех публикациях, описывающих возможные последствия разгерметизации контейнера, отмечается, что оценки распределения выбросов в атмосферу затруднены, но, вероятно, при любой утечке UF_6 распределение будет весьма локальным.

Из диаграммы состояния гексафторида урана (см. рис. 2) видно, что при обычной температуре окружающего воздуха (а температура содержимого контейнера приходит в равновесие с температурой окружающей среды довольно быстро) и давлении меньше атмосферного (в контейнере всегда создают разряжение) UF_6 находится в твердом состоянии.

За последние 45 лет известно примерно о десяти происшествиях с контейнерами в хранилище с твердым гексафторидом урана. Большинство происшествий было вызвано корро-

зией вокруг вмятин, образовавшихся при неправильном обращении, или коррозией вокруг дефектов сварки. Кроме того, имели место ошибки персонала, в результате которых происходила разгерметизация контейнеров.



Погрузка контейнеров с ОГФУ на платформу

ПРОИСШЕСТВИЯ НА ПЛОЩАДКАХ

В США в 1944 году экспериментальная установка для термодиффузии была временно остановлена для модификации трубопроводов. Во время работ сварной шов на контейнере с газообразным природным UF_6 , который разогревался паром, разорвался на длине 8 футов. В атмосферу было выпущено около 400 фунтов UF_6 , который вступил в реакцию с паром, – и образовались HF и UO_2F_2 . При аварии погибли два человека и три человека пострадали от вдыхания HF и отравления ураном (впоследствии они выздоровели).

В 1978 году на складе в Портсмутской газодиффузионной установке контейнер (баллон), частично заполненный жидким UF_6 , был случайно сброшен и разгерметизировался. Были приняты меры по очистке и сбору UF_6 . При аварии никто не пострадал. Холодная погода ограничила рассеивание UF_6 , поскольку UF_6 в контейнере находится в жидком состоянии только в течение нескольких дней после заполнения. Как только контейнер остывает, UF_6 переходит в твердую фазу и будет выпускаться из баллона гораздо медленнее, что иллюстрируется фазовой диаграммой состояния UF_6 (см. рис. 2).

В 1986 году на коммерческой установке по переработке урана (Sequoiah Fuels Corp., Gore OK) произошла утечка UF_6 при разрыве баллона. Авария случилась, когда перегруженный баллон был нагрет для удаления избытка UF_6 . Он разорвался и выпустил облако UF_6 и продуктов реакции. Авария привела к смерти одного человека (от вдыхания HF) и еще

31 работник подвергся воздействию газового облака. Долговременных последствий для здоровья людей и окружающей среды не было.

ПРОИСШЕСТВИЕ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

За всю историю транспортировок ОГФУ (около 70 лет) известно только об одной навигационной аварии. 25 августа 1984 года грузовое судно «Монт-Луи», перевозившее 350 тонн гексафторида урана, затонуло в Северном море через 4,5 часа после столкновения с автомобильным паромом «Олау Британия»¹. Порт назначения – г. Рига.

Груз состоял из 18 контейнеров с гексафторидом обедненного урана (концентрация ²³⁵U 0,67%), девяти контейнеров с гексафторидом природного урана (концентрация ²³⁵U 0,71%) и трех контейнеров с гексафторидом обогащенного урана (концентрация ²³⁵U 0,88%). Причем в контейнерах с гексафторидом обедненного и обогащенного урана содержался регенерированный уран (примерно с одинаковым уровнем радиоактивности).

Контейнеры с гексафторидом урана были размещены в носовой части судна, а удар пришелся на корму правого борта, так что от прямого удара они не пострадали. Судно затонуло на глубине 14 м, и контейнеры оказались в воде.

Поскольку гексафторид урана имеет незначительную активность, основное внимание при проведении спасательных работ было уделено химическому загрязнению. Пробы брались с поверхности воды, из глубины и из трюма вокруг контейнеров, и каждый член команды «Монт-Луи» был подвергнут медицинскому обследованию. Все контейнеры были испытаны на герметичность на борту спасательной баржи и после их доставки в порт Дюнкерк.

Все 30 контейнеров с гексафторидом урана были извлечены с затонувшего судна. Находясь в условиях шторма в открытом трюме, многие из них были повреждены: имелись вмятины на стенках, крышки клапанов были сорваны, а несколько контейнеров – с погнутыми клапанами.

Во время спасательной операции и после доставки контейнеров в порт было взято 217 проб, которые подверглись 752 различным анализам, а также было проведено 146 замеров уровней доз излучений на самих контейнерах. В результате измерений не было обнаружено ни малейших признаков утечки радиоактивных (в природном или регенерированном уране) и химических веществ (фтор или фтористоводородная кислота), т. е. авария не имела никаких радиологических и химических последствий.

СЦЕНАРИИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ КОНТЕЙНЕРОВ

Институтом промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук рассмотрены основные реальные аварийные сценарии и их последствия, связанные с разгерметизацией контейнеров с ОГФУ, которые могут иметь место при их транспортировке и хранении на площадках (методика 1)².

Сценарии, которые были рассмотрены при расчете параметров последствий, предполагали, что выбросы уранилфторида, фтористого водорода и гексафторида урана поступят в атмосферу в облаке первичного выброса. Расчет производился исходя из различных условий и величины повреждений (отверстий) в разгерметизированных контейнерах. При этом

¹ Бернар О. Авария судна «Монт-Луи» и ядерная безопасность // Бюллетень МАГАТЭ. Т. 27. № 1. 1985. С. 31-34.

² Методика прогноза масштаба заражения (загрязнения) окружающей среды при разрушении наполненных обедненным гексафторидом урана контейнеров, хранящихся на открытых складах ФГУП «УЭХК» / Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, 2003.

относительная влажность воздуха принималась 85%, а температура 20 °С. Рассматривались сценарии, при которых разгерметизация контейнеров происходила в различных его частях, начиная от образования трещины сварного шва корпуса выше границы между твердым ОГФУ и свободным пространством внутри контейнера и заканчивая образованием сквозного отверстия ниже границы твердого ОГФУ. Кроме этого, были рассмотрены сценарии существенной разгерметизации контейнеров – разрушение части корпуса и повреждение контейнеров, равное 100 см². При этом предполагалось, что площадь просыпанного ОГФУ будет равна примерно 1000 см². Результаты показали, что максимальная стационарная эмиссия уранилфторида и фтористого водорода составит 2687 и 698 граммов в час соответственно.

Кроме происшествий и сценариев, изложенных выше, особое внимание уделяется оценке риска возникновения техногенных аварий с емкостями с ОГФУ, которые могут быть вызваны непредвиденными и весьма маловероятными факторами. В частности, вероятность попадания в контейнеры ОГФУ при их транспортировке и хранении тяжелого самолета с полностью заправленными баками (45 тонн керосина) в результате террористического акта или аварии, по оценкам АО «ВНИИХТ», составляет 10⁻⁸/год. Для сравнения: вероятность падения на человека предмета сверху или небесного тела, по оценкам ученых Гринвичской обсерватории (Великобритания), составляет 1,5·10⁻⁷/год.

4.5. Переработка и использование ОГФУ

В рамках ядерного топливного цикла ОГФУ может быть подвергнут восстановлению до тетрафторида, оксидов урана или металлического урана с получением фторсодержащих соединений, которые служат вторичным источником фтора для конверсионных производств. Обедненный уран в оксидной и металлической формах может использоваться в бланкете МОКС или мононитридного топлива для реакторов на быстрых нейтронах, а также для изготовления специальных радиационно-стойких бетонов. Такие бетоны являются непревзойденными конструкционными материалами для изготовления контейнеров и защитных экранов для хранения и транспортировки ОЯТ, а также используются в качестве защищающего от радиации балласта при геологическом захоронении ОЯТ.

В других, неатомных отраслях промышленности фторсодержащие соединения применяются в производстве озонобезопасных хладонов и для травления печатных плат и микросхем. Обедненный уран – перспективный материал для легирования полупроводников и магнитный материал, который может использоваться в качестве катализатора в нефтяной промышленности, в сферах, где требуются материалы с высокой плотностью, в качестве балласта, а также «аккумулятора» водорода для его хранения. Обедненный уран также применяется в качестве легирующих добавок при создании высокопрочных сталей. Поэтому переработка ОГФУ представляет коммерческий интерес.

Наконец, возможно организовать долгосрочное безопасное хранение ОГФУ в тех случаях, когда он не может быть эффективно использован при современном уровне развития технологий, но есть надежда на его применение при будущем уровне развития технологий.

Таким образом, ОГФУ везде в мире рассматривается в основном в качестве полезного ресурса и лишь в виде некоего исключения может быть отнесен к категории РАО в тех странах, которые не усматривают вариантов или не обладают технологиями для его полезного использования. В международной практике единый нормативно-правовой статус ОГФУ отсутствует, что еще раз необходимо подчеркнуть.

4.5.1. Использование ОГФУ в ядерном топливном цикле

В 2000 году Агентство по ядерной энергии ОЭСР и МАГАТЭ выпустили совместный доклад, посвященный ресурсам, производству и спросу на уран (Uranium 1999 Resources, Production and Demand, ISBN 92-64-17198-3). По состоянию на 1 января 2000 года разведанные запасы урана стоимостью до 40 \$/кг составляли 1 254 000 тонн, и при ежегодном потреблении 65 000 тонн этих запасов могло бы хватить приблизительно на 25 лет. Однако благодаря наличию складских запасов урана, которые составляют примерно 20 тыс. тонн, а также использованию регенерированного урана от переработки ОЯТ и дообогащенного урана, полученного из ОГФУ, этих ресурсов может хватить на более длительный период.

Динамика увеличения разницы между спросом и предложением в период до 2030 года показана на рис. 4.

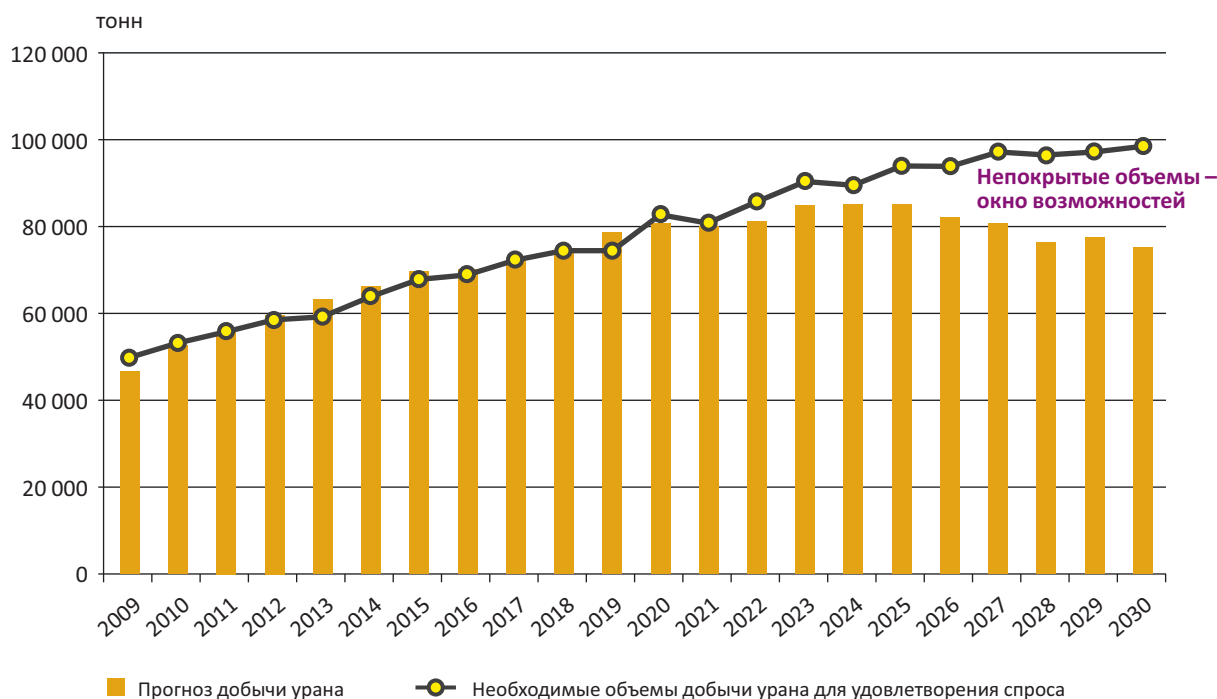


Рис. 4. Необходимые и прогнозируемые объемы добычи урана

В 2018 году объем мировой добычи урана составил 53 500 тонн, а общее потребление для АЭС, транспортных ядерных энергетических установок, исследовательских реакторов и установок специального назначения – 64 457 тонн. Учитывая сокращение складских запасов урана и ограниченное использование МОКС-топлива, потребность во вторичном источнике урана, которым является ОГФУ, может возрасти.

В процессе дообогащения одна часть ОГФУ становится дообогащенным и пригодным для использования в процессе изготовления ядерного топлива, а другая часть – еще более обедненным, содержание ²³⁵U в нем сократится до менее чем 0,1%.

На всех предприятиях разделительно-сублиматного комплекса «ТВЭЛ» осуществляется переработка богатых отвалов прежних лет с целью доизвлечения ^{235}U и дальнейшее использование этого урана для изготовления ядерного топлива. В результате склады накопленного «старого» ОГФУ планомерно сокращаются, а вновь образующийся, еще более обедненный гексафторид урана затаривается в новые контейнеры.

Целесообразность повторного дообогащения ОГФУ определяется технико-экономическими показателями обогатительных производств и его экономическими показателями, в сравнении с добычей первичного урана.



Цех обогащения урана

Типичное содержание ^{235}U в ОГФУ, наработанного, например, на обогатительных заводах компании URENCO, составляет 0,2-0,25%. Как уже отмечалось, в значительной части запасов ОГФУ содержится такое количество ^{235}U , которое делает экономически оправданным его повторное использование в качестве сырья для производства ядерного топлива. Поэтому нарабатываемый из ОГФУ на российских разделительных предприятиях уран имеет привлекательную стоимость в сравнении с ценой на природный уран.

Кроме дообогащения ОГФУ возможны другие варианты его использования для производства различных видов свежего ядерного топлива. ОГФУ является источником двух изотопов – ^{235}U , который используется для производства обычного уранового топлива для традиционных тепловых реакторов, и ^{238}U , который является компонентом для МОКС- или РЕМИКС-топлива. Поэтому выделенный из ОГФУ обедненный уран применяется для смешивания с плутонием для изготовления МОКС-топлива. В форме диоксида UO_2 он является одним из компонентов уран-плутониевого МОКС-топлива в наиболее распространенном его варианте. Этот компонент обычно составляет свыше 90% топливной матрицы при лю-

бом изотопном составе и доле плутония. В оксидной форме обедненный уран может использоваться в бланкете МОКС или мононитридного топлива для реакторов на быстрых нейтронах. Оксиды обедненного урана, получаемые при переработке ОГФУ, имеют статус ядерно-чистого сырья. Это стратегически важное сырье – как основное вещество зон воспроизводства реакторов на быстрых нейтронах, работающих в уран-плутониевом цикле. Использование обедненного урана, полученного при реконверсии ОГФУ, планируется в долгосрочной перспективе для топливообеспечения реакторов на быстрых нейтронах. Запасы обедненного урана позволят обеспечить потребности «быстрой» энергетики на ближайшие тысячелетия.

Для производства гексафторида природного урана используется фтористый водород, который в зависимости от масштаба конверсии ОГФУ реализуется в замкнутом по фтору сульфидно-разделительном цикле. Расширение проектов по переработке ОГФУ полностью обеспечит потребности во фторе, исключит необходимость эксплуатации производств безводного фтористого водорода по технологии разложения флюорита (CaF_2). Это обеспечит независимость атомной отрасли от закупок импортного сырья (плавикового шпата) и серной кислоты в условиях колебаний весьма неустойчивых цен на плавиковую кислоту.

С точки зрения экономики ядерного топливного цикла и обращения с ОГФУ его дообогащение или использование для разбавления высокообогащенного урана в первую очередь требуется осуществлять с ОГФУ со сравнительно высокой концентрацией ^{235}U , а конверсию, наоборот, проводить с ОГФУ с минимальной концентрацией ^{235}U . Поэтому сравнительно богатый ОГФУ следует сохранять в этом виде, так как его перевод в оксидную форму и последующий обратный процесс требует дополнительных материальных затрат и загрузки производственных мощностей. Такой подход минимизирует стоимость обращения с ОГФУ.

В качестве оптимальной стратегии дальнейшего обращения с оксидами обедненного урана, получаемыми в результате переработки ОГФУ, на период приблизительно до 2100-х годов (т. е. до планируемого перехода атомной энергетики России на эксплуатацию реакторов на быстрых нейтронах и уточнения потребности в обедненном уране) принимается его долговременное хранение.

4.5.2. Использование ОГФУ в промышленности

Помимо атомной технические возможности использования ОГФУ существуют в других отраслях промышленности.

Благодаря высокой плотности, превосходящей плотность свинца в 1,7 раза, ОГФУ применяется для биологической защиты от жесткого ионизирующего излучения, где имеется потребность в высокой плотности материала. В этом отношении обедненный уран в несколько раз эффективнее свинца, широко используемого для тех же целей. Также он используется при производстве различных материалов (сплавов, специальных бетонов, металлокерамики и др.) радиационной защиты в медицинской лучевой терапии и в оборудовании промышленной радиографии.

Высокая удельная массовая плотность урана обуславливает его применение в качестве балласта в судостроении, противовесов нефтяных платформ, балансировочных грузов самолетов и других, где требуются материалы с высокой плотностью. Также обедненный уран используется в качестве легирующих добавок при создании высокопрочных сталей и в качестве катализатора в нефтяной промышленности.

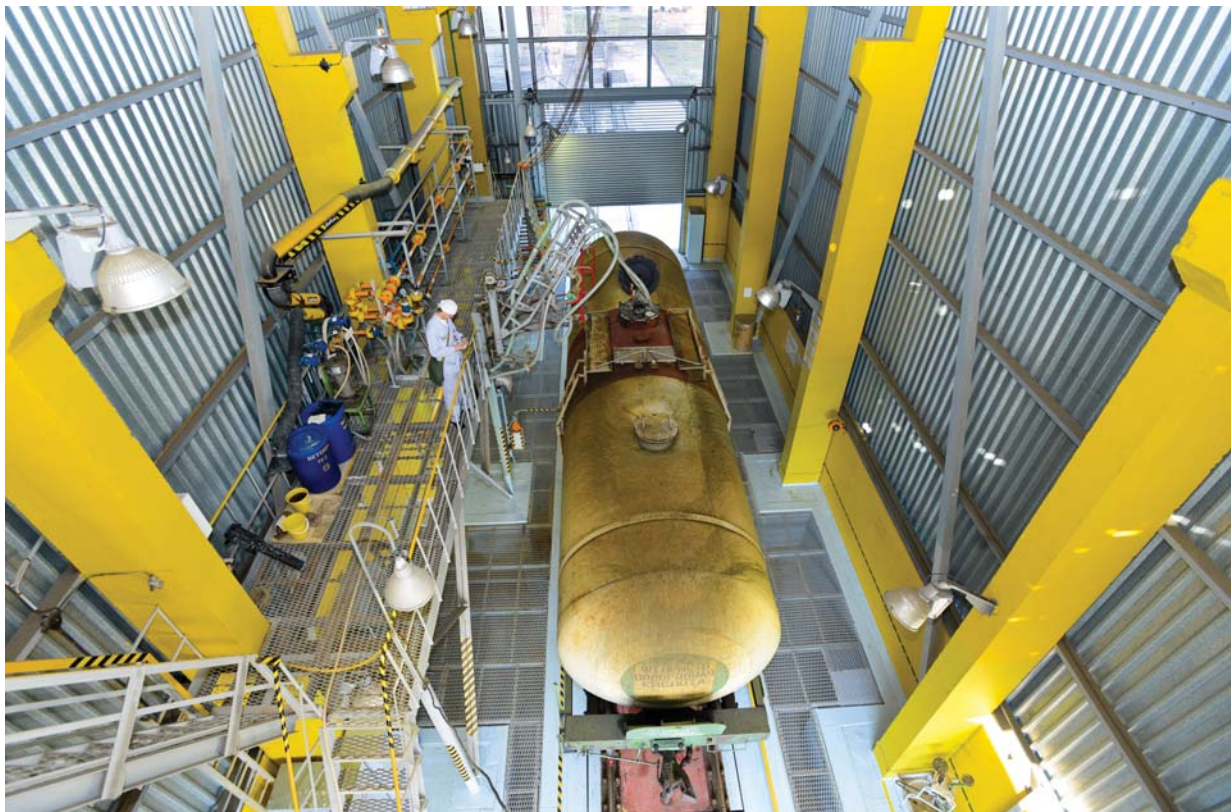
Конверсия ОГФУ также необходима в качестве первичной операции для большинства проводимых далее различных направлений его использования. Для нужд атомной промышленности ОГФУ проходит химическую переработку, в результате которой получают оксиды урана (U_3O_8 или UO_2), металлический уран и тетрафторид урана (UF_4), являющийся промежуточным продуктом для получения чистого урана и его оксидов. Эти твердые вещества обладают высокой химической стабильностью и поэтому представляют собой практически оптимальную форму для долговременного хранения стратегических запасов обедненного урана с существенно меньшими рисками, чем при долгосрочном хранении химически активного и токсичного ОГФУ.



Участок переработки обедненного урана

ОГФУ – крупный вторичный источник фтора. Промежуточными или конечными товарными продуктами при конверсии ОГФУ являются различные соединения фтора: водный и безводный фтористый водород (HF), шестифтористая сера (SF_6), тетрафторид кремния (SiF_4), моносилан (SiH_4) и др. Как и обедненный уран, выделенный при конверсии ОГФУ фтор имеет различное применение в неядерных производствах, широко используется в химической, электронной и других отраслях промышленности. Он применяется для получения фторопластов, в частности тефлона, который характеризуется небольшой плотностью, низкой влагонепроницаемостью, большой термической и химической стойкостью, высокими электроизоляционными свойствами.

Фторсодержащие соединения используются в производстве различных озонобезопасных хладагентов, для травления печатных плат и микросхем. В больших количествах фтор применяется для производства криолита, используемого в производстве алюминия. Широкое применение фтор находит в фармацевтической промышленности при синтезе различных медицинских препаратов и косметических средств.



Цистерны с фтористоводородной кислотой (продукт переработки ОГФУ)

Исходным сырьем для получения фтора и фтористых соединений является флюорит. Основным производителем флюоритового концентрата – Китай, на долю которого приходится свыше 50% мирового производства. Один из крупнейших импортеров флюоритового концентрата в мире – Россия. Учитывая широкое использование фтора и фтористых соединений, переработка ОГФУ позволит вовлечь в производство большой объем вторичного источника фтора. Поэтому переработка ОГФУ представляет коммерческий интерес.

Таким образом, с учетом технологических возможностей и концепций ядерного топливного цикла каждой страны, имеющей разделительные производства, необходимо развивать технологии переработки ОГФУ. В тех случаях, когда они не могут эффективно использоваться при современном уровне развития, но есть надежда на их применение в будущем, необходимо обеспечить долговременное безопасное хранение ОГФУ, исключив риски природного и техногенного характера. Причем при хранении и переработке ОГФУ необходимо обеспечить его доступность для дальнейшего использования.

Несмотря на более чем полувековой опыт безопасного хранения, ОГФУ все же представляет потенциальную химическую опасность. Поэтому для обеспечения химической и промышленной безопасности, а также для снижения токсикологических, химических и экологических рисков при авариях запасы ОГФУ переводят в стабильные формы, более подходящие для долгосрочного хранения. Предпочтительной формой такого хранения является инертная, химически стойкая, нелетучая и нерастворимая оксидная форма – закись-окись урана U_3O_8 (обедненная закись-окись урана) в виде прессованного порошка, который может храниться в контейнерах упрощенной конструкции из нелегированной стали в течение длительного времени.

СВОЙСТВА ОЗОУ

Химические и физические свойства закиси-окиси природного и обедненного урана (получаемой при обесфторивании обедненного гексафторида урана) полностью идентичны, за исключением радиоактивности.

Радиоактивность обедненной закиси-окиси урана (ОЗОУ) примерно в два раза ниже, чем закиси-окиси природного урана, за счет пониженного содержания изотопа ^{234}U .



Контейнеры для хранения ОЗОУ

Закись-окись урана, или ЗОУ (в литературе также используют наименования: оксид урана(VI)-диурана(V), триурана октаоксид и др.), – неорганическое бинарное соединение урана с кислородом, в котором металл имеет двойственную валентность: 5 (два атома) и 6 (один атом). Брутто-формула соединения – U_3O_8 . Из всех соединений урана, встречающихся в природе, ЗОУ распространена наиболее широко и является главным компонентом основного рудного минерала урана – настурана. В свободном состоянии представляет собой зелено-черное кристаллическое твердое вещество. Термически и химически устойчивое соединение.

Закись-окись урана термически стабильна до температур порядка 1000 °С, химически инертна и нерастворима в воде. ЗОУ растворима только в концентрированных сильных кислотах. Разбавленная серная и соляная кислоты очень слабо реагируют с закисью-окисью урана даже при нагревании. Как и для любых соединений урана, для ЗОУ характерна слабая радиоактивность. Закись-окись природного урана является основным компонентом урановых концентратов, служащих сырьем для производства топлива для ядерных реакторов

на тепловых нейтронах, формирующих основную долю парка реакторов АЭС в России и за рубежом в настоящее время. Обедненная закись-окись урана рассматривается в качестве сырья для ядерных реакторов на быстрых нейтронах.

4.5.3. Переработка (обесфторивание) ОГФУ

Первой в мире страной, которая приняла стратегию по постепенной конверсии ОГФУ и переводу его в стабильную химическую форму ОЗОУ, стала Франция, где в 1984 году была создана первая установка «W1» производительностью 10 тыс. тонн ОГФУ в год для его конверсии в закись-окись урана (U_3O_8), обеспечивающая полное обесфторивание гексафторида (рис. 5).

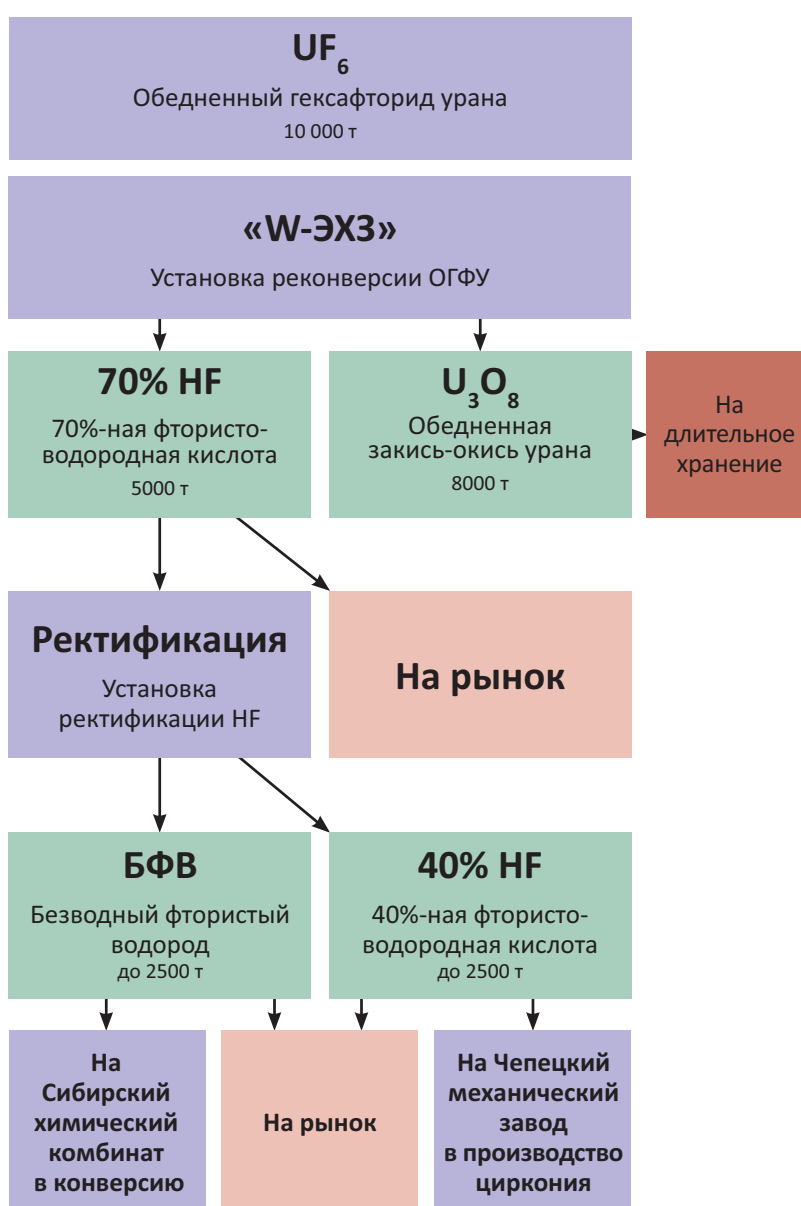
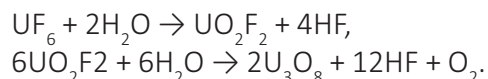


Рис. 5. Схема процесса переработки ОГФУ

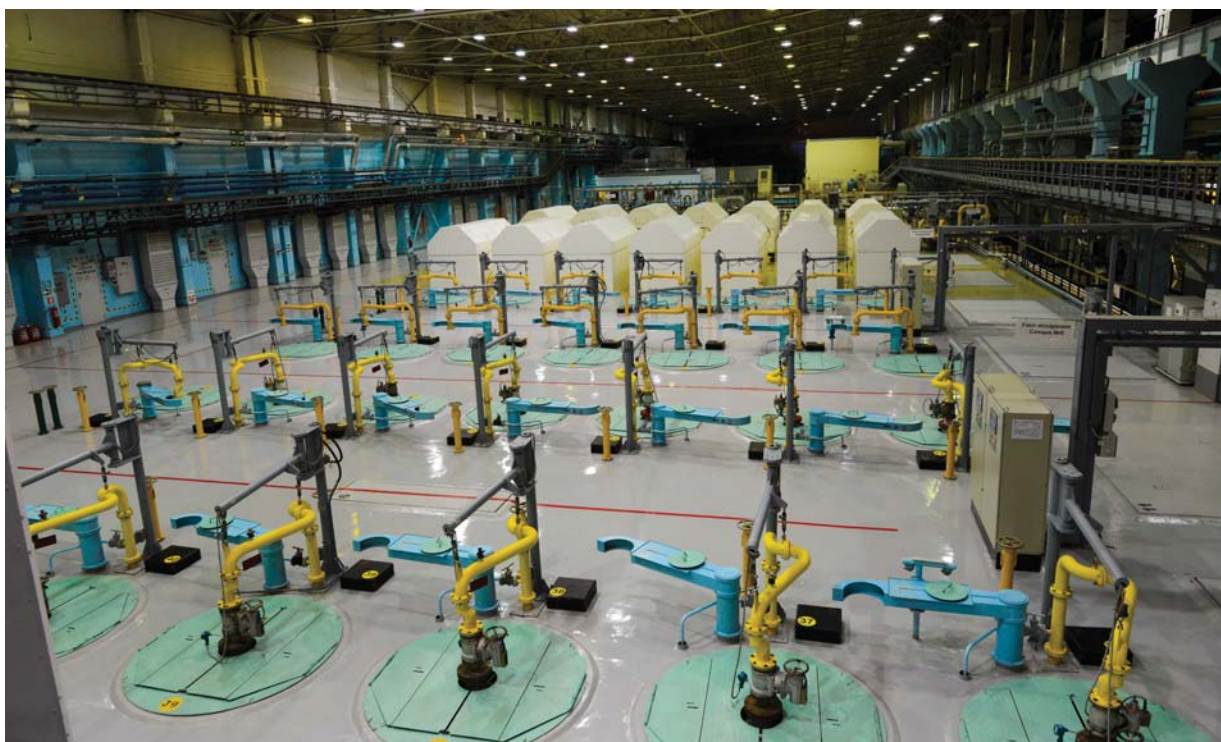
Установка работает по принципу пирогидролиза парами воды. В ней происходят следующие химические реакции:



Фтор восстанавливается до 70%-ной плавиковой кислоты, которая продается в химическую промышленность, а U_3O_8 уплотняется и упаковывается в контейнеры DV-70 объемом 3 м³. Заполненные контейнеры, содержащие ~10 тонн U_3O_8 удельной активностью $2,11 \cdot 10^4$ Бк/г, размещаются на хранение в легко возводимом ангаре.

Позднее была построена вторая аналогичная установка – «W2» той же производительностью, на которой к настоящему времени переработано более 140 тыс. тонн ОГФУ. На сегодняшний день конверсия ОГФУ продолжается, и мощности установок «W1» и «W2» превышают современное производство ОГФУ французских обогатительных предприятий, что приведет к сокращению его запасов.

В России на АО «ПО ЭХЗ» в 2009 году введено в эксплуатацию производство реконверсии (обесфторивания) ОГФУ, где обедненный уран переводится из формы гексафторида в ОЗОУ. Производство построено по контракту с французской энергетической компанией SOGEMA и именуется «W-ЭХЗ», по аналогии с названием во Франции.



Установка «W-ЭХЗ»

Мощность производства – 10 тыс. тонн ОГФУ в год. В результате эксплуатации «W-ЭХЗ» на конец 2019 года сокращение запасов ОГФУ в АО «ПО ЭХЗ» составило свыше 90 тыс. тонн. Сокращение запасов ОГФУ на других разделительных предприятиях будет начато после ввода дополнительных производств «W» в АО «ПО ЭХЗ» и на других предприятиях.

Следует заметить, что в России активизировались НИОКР по созданию новых технологий перевода ОГФУ в более безопасные формы для хранения и экономически привлекательного коммерческого использования. Примером работ в области разработки альтернативных (отечественных) технологий обесфторивания ОГФУ до безопасных форм хранения является совместный проект АО «СХК» (г. Северск) и ООО «Новые химические продукты» (г. Санкт-Петербург)³.

4.6. Экологические аспекты при создании структуры по обращению с ОГФУ (лицензирование и государственная экологическая экспертиза)

Согласно ст. 26 Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» деятельность по обращению с ядерными материалами (с ОГФУ) подлежит лицензированию. В соответствии со ст. 3 упомянутого закона ядерная установка по переработке (обесфториванию) ОГФУ, пункты хранения ОГФУ, установки для транспортировки ядерных материалов (в данном случае – ОГФУ) отнесены к объектам использования атомной энергии, для размещения, сооружения, эксплуатации и вывода из эксплуатации которых требуется лицензия.

Порядок лицензирования установлен в постановлении Правительства РФ от 29.03.2013 № 280 «О лицензировании деятельности в области использования атомной энергии» (вместе с Положением о лицензировании деятельности в области использования атомной энергии). В этом постановлении указано, что при получении лицензии эксплуатирующей организацией необходимо подавать в составе материалов, обосновывающих лицензию, положительное заключение государственной экологической экспертизы (ГЭЭ). Статус эксплуатирующей организации (признание организации эксплуатирующей) устанавливается приказом Госкорпорации «Росатом». В данном случае АО «УЭХК» (г. Новоуральск, Свердловская область), АО «ПО ЭХЗ» (г. Зеленогорск, Красноярский край), АО «СХК» (г. Северск, Томская область) и АО «АЭХК» (г. Ангарск, Иркутская область) являются эксплуатируемыми организациями.

Объектом ГЭЭ служат материалы обоснования лицензии (МОЛ), которые в своем составе содержат оценку воздействия на окружающую среду (ОВОС) при намечаемой деятельности. Проведение ОВОС включает в себя организацию и проведение общественных обсуждений, которые являются неотъемлемой частью ОВОС.

РАЗМЕЩЕНИЕ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Требования к получению разрешения на размещение ядерных установок по переработке (обесфториванию) ОГФУ содержатся в постановлении Правительства РФ от 14.03.1997 № 306 (ред. от 01.02.2005) «О Правилах принятия решений о размещении и сооружении ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения».

Пункт 4 упомянутого постановления гласит, что объекты в виде ядерных установок, размещаемые на территории закрытых административно-территориальных образований, являются

³ Интернет-издание РИА Новости (см.: https://ria.ru/20200512/1571175186.html?fbclid=IwAR2VtVGLPdmYUqkOn01ec_SmTMR5CVBUKCbIG1CDP1GxLN0vmGp7w8aFALs).

объектами федерального значения. В п. 6 постановления сказано, что в комплекте документов, подаваемых на согласование для размещения, должно быть положительное заключение ГЭЭ материалов обоснования лицензии. Кроме этого, п. 5 постановления устанавливает, что: «Решения о сооружении объектов федерального значения принимает Правительство Российской Федерации. Решения о месте размещения указанных объектов принимаются совместно Правительством Российской Федерации и органами государственной власти субъектов Российской Федерации, на территории которых предполагается размещение объектов».

Новые ядерные установки по переработке (обесфториванию) ОГФУ, которые планируется создать на АО «УЭХК» и АО «ПО ЭХЗ», будут встраиваться в уже существующие ядерные установки, а их эксплуатация будет регулироваться основной лицензией, которая в настоящий момент регулирует деятельность разделительного производства. В условиях действия основной лицензии ядерная установка включена в общий перечень сооружений, комплексов и установок с ядерными материалами, предназначенных для переработки ядерных материалов.

СООРУЖЕНИЕ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Если на предыдущем этапе положительное заключение ГЭЭ было необходимо только на размещение, то на сооружение надо будет разрабатывать материалы обоснования лицензий (МОЛ на сооружение ядерной установки) и проходить ГЭЭ. Также возможно и прохождение общественной экологической экспертизы (ОЭЭ). На практике Ростехнадзором допускается совмещение этапов размещения и сооружения и выдача совмещенной лицензии.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Для получения лицензии на эксплуатацию необходимо разрабатывать МОЛ на эксплуатацию ядерной установки и проходить ГЭЭ. Для действующих ядерных установок получать новую лицензию необходимо будет только тогда, когда завершится срок действия старой лицензии, действующей в настоящее время. Для вновь сооруженной ядерной установки необходимо получать лицензию на эксплуатацию.

В случае изменения условий действия лицензии на эксплуатацию ГЭЭ не проводится.

ТРАНСПОРТИРОВКА ОГФУ ПО ТЕРРИТОРИИ РФ

В соответствии со ст. 26 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» обращение с ядерными материалами и радиоактивными веществами, в том числе при транспортировке и хранении ядерных материалов, является лицензируемым видом деятельности.

Эксплуатирующая организация – это организация, созданная в соответствии с законодательством Российской Федерации и признанная в порядке и на условиях, установленных Правительством Российской Федерации, соответствующим органом управления использованием атомной энергии пригодной эксплуатировать ядерную установку, радиационный источник или пункт хранения и осуществлять собственными силами или с привлечением других организаций деятельность по размещению, проектированию, сооружению, эксплуатации и выводу из эксплуатации ядерной установки, радиационного источника или пункта хранения, а также деятельность по обращению с ядерными материалами и радиоактивными веществами.

Из этого определения следует, что организация, транспортирующая ядерные материалы, может не являться эксплуатирующей, в связи с чем Ростехнадзор не требует в составе материалов, обосновывающих лицензию, положительное заключение ГЭЭ.

ГЛАВА 5.

Экономика обращения с ОГФУ

Рассчитать точную стоимость хранения и переработки обедненного гексафторида урана достаточно сложно, поскольку в мире существует небольшое количество действующих предприятий, занимающихся переработкой ОГФУ и коммерческим хранением, с открытой и подробной информацией о себестоимости.

Оценить стоимость хранения и переработки ОГФУ в России еще сложнее, поскольку какая-либо информация о ценовых аспектах отдельных операций, связанных с ОГФУ, в открытом доступе отсутствует. Тем не менее ГК «Росатом» признает, что затраты на переработку ОГФУ на установках типа «W» (даже с учетом положительного экономического эффекта от реализации фторсодержащих продуктов и экономии на изготовлении тары под ОГФУ) превышают затраты на его хранение. В результате эксплуатация производств «W» в ближайшее десятилетие носит затратный характер и, как декларирует топливная компания «ТВЭЛ», имеет исключительно экологическую направленность. При этом вся надежда – на долгосрочную перспективу. В «ТВЭЛ» полагают, что есть возможность совершенствовать конструкцию упаковочных комплектов и оптимизировать технологии хранения ОЗОУ. Это даст дополнительную экономию затрат на хранение обедненного урана. При использовании в будущем обедненного урана в качестве сырья для топлива, предназначенного для реакторов на быстрых нейтронах, указанные затраты могут быть компенсированы ценой на это сырье. Сегодня затраты на текущие работы по безопасному обращению с ОГФУ включаются в себестоимость продукции разделительных производств АО «ТВЭЛ».

Существующие в настоящее время способы расчета стоимости использования ОГФУ в основном базируются на концепции его конверсии в более безопасную форму и последующего долговременного хранения. Различные организации пытались приблизительно рассчитать возможную стоимость операций по обращению с ОГФУ. Далее приведено несколько примеров таких расчетов. При этом необходимо иметь в виду, что экономические, технологические и другие условия, которые влияют на стоимость продукта, могут существенно различаться в разных странах, и это надо учитывать.

Французская фирма COGEMA в 1990-х годах предлагала свои услуги по переработке ОГФУ с использованием технологии пирогидролиза для конверсии гексафторида урана (UF_6) в оксид урана (U_3O_8) и 70%-ную плавиковую кислоту (HF) американской фирме LES. Эксперты тогда оценили стоимость конверсии UF_6 в U_3O_8 в 4,86 долл. США за 1 кг урана (или 3,29 долл. США за 1 кг UF_6)⁴.

Департамент энергетики США проводил свои расчеты различных вариантов переработки ОГФУ и оценил стоимость долговременного хранения U_3O_8 в подземных шахтах в 4,57 долл. США за 1 кг UF_6 . Но тогда эксперты Всемирной информационной службы по

⁴ Орехов В. Т., Власов А. А., Козлова Е. И. и др. Современные методы обращения с отвалами обедненного UF_6 , 2000 (см.: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20299707>).

энергетике (World Information Service on Energy, WISE) посчитали, что условия хранения ОГФУ нужно сравнивать с требованиями к условиям хранения ОЯТ⁵. Но это скорее относится к стоимости хранения ОГФУ в неизменном виде. Тогда, если брать за пример хранилище ОЯТ в Горлебене (Германия), стоимость хранения будет около 110 долл. США за 1 кг UF₆. Однако стоимость конверсии UF₆ в U₃O₈ в данных расчетах не учтена.

В 1999 году Департамент энергетики США принял план по переработке около 700 тыс. метрических тонн ОГФУ, накопленных в процессе обогащения урана на трех предприятиях – в городах Падьюка, Портсмут и Ок-Ридж. Согласно этому плану стоимость строительства двух предприятий по конверсии ОГФУ в оксид урана, их работа в течение 25 лет, захоронение оксида урана и вывод из эксплуатации этих предприятий должны были обойтись в 2,6 млрд долл. США. Стоимость переработки и хранения ОГФУ в этом случае составила бы около 3,7 долл. США за 1 кг UF₆.

В 2002 году Департамент энергетики США заключил договор с компанией Uranium Disposition Services LLC о строительстве двух заводов по переработке ОГФУ в городах Падьюка (штат Кентукки) и Портсмут (штат Огайо). В 2004 году началось строительство двух объектов, а стоимость проекта возросла до 3,5 млрд долл. США. В результате переработки около 700 тыс. метрических тонн ОГФУ, накопленных в США, должно было получиться около 551 тыс. тонн оксида урана, которые предполагалось захоронить как низкорadioактивные отходы. Стоимость этой операции оценивалась в 428 млн долл. США, или 0,8 долл. США на 1 кг оксида урана⁶. Таким образом, стоимость конверсии и хранения ОГФУ возросла до 5 долл. США за 1 кг UF₆, и, скорее всего, это не окончательная стоимость.

В 2004 году Институт энергетических и экологических исследований по заказу Комиссии по ядерному регулированию США (NRC) проанализировал затраты на утилизацию ОГФУ, который образовался бы при эксплуатации нового завода по обогащению урана в штате Нью-Мексико. Компания LES, предложившая проект по строительству нового завода, оценила стоимость утилизации (конверсии в оксиды урана и их хранение) ОГФУ в 7,44 долл. США за 1 кг урана. Авторы исследования усомнились в объективности расчетов LES и оценили разные сценарии на основе доступных данных. По их расчетам получилось, что конверсия ОГФУ в безопасную форму и дальнейшее его хранение в зависимости от различных технологий будет стоить от 13 до 30 долл. США за 1 кг урана⁷.

В 2010 и 2011 годах переработка ОГФУ на двух заводах в США была запущена. Департамент энергетики США каждые пять лет пересматривает контракт и проводит тендер на операционное управление заводами. Последний контракт был заключен в 2016 году с компанией Mid-America Conversion Services на срок пять лет и на сумму 457 млн долл. США⁸. В обязанности компании входит обслуживание производства, обеспечение безопасного хранения оксида урана и реализация плавиковой кислоты, получаемой в процессе конверсии. Учитывая, что стоимость плавиковой кислоты на рынке не очень высока (около 1000 долл. США за 1 тонну), дополнительная прибыль от ее продажи достаточно скромная.

⁵ Nuclear fuel cost calculator, World Information Service on Energy (см.: <https://www.wise-uranium.org/nfch.html>).

⁶ Audit Report: Potential uses for depleted uranium oxide, 2009 (см.: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/igprod/documents/IG-0810.pdf>).

⁷ Makhijani A., Smith B. Costs and risks of management and disposal of depleted uranium from the national enrichment facility proposed to be built in Lea County New Mexico by LES, 2004 (см.: <https://www.nirs.org/wp-content/uploads/les/lesdureportredactedfeb2005.pdf>).

⁸ Barber W. Weapons complex still weighing impact of fluor government biz sell-off / Exchange Monitor, September 27, 2019 (см.: <https://www.exchangemonitor.com/weapons-complex-still-weighting-impact-fluor-government-biz-sell-off>).

Параллельно Департамент энергетики США ищет возможности по альтернативному использованию оксида урана. Так, в январе 2020 года было анонсировано, что часть ОГФУ готова взять Национальная администрация по ядерной безопасности США для производства металлического урана, который планируется использовать в программах по ядерному вооружению. Они намереваются приобрести около 14 тыс. тонн ОГФУ⁹. В 2016 году Департамент энергетики США заключил соглашение с компанией GE-Hitachi Global Laser Enrichment, LLC, на дообогащение ОГФУ с помощью лазерной технологии SILEX¹⁰, но проект до сих пор не запущен из-за неблагоприятной ситуации на мировом рынке урана.

Считается, что дообогащение ОГФУ будет коммерчески оправданным, если стоимость 1 кг U_3O_8 и его конверсии в UF_6 будет выше, чем стоимость 1 ЕРР (единица работы разделения)¹¹. До 2011 года, когда цена ЕРР росла и достигла 160 долл. США за 1 ЕРР, надежд на коммерческое использование ОГФУ не было, после чего стоимость ЕРР начала серьезно снижаться. Но сейчас при текущей цене на оксид урана около 75 долл. США (за 1 кг U_3O_8), стоимости конверсии около 22 долл. США и стоимости 1 ЕРР в 45 долл. США¹² перспективы коммерческого дообогащения ОГФУ являются экономически оправданными.

К тому же из исторических графиков цен на уран и ЕРР видно, что за последние 20 лет цены сильно менялись, резко росли и резко падали, поэтому из-за нестабильности на рынке и высоких капитальных затрат инвестировать в новые проекты по переработке ОГФУ надо осторожно, но в то же время использование уже существующих мощностей по обогащению урана, возможно, будет оправданно.

Не стоит также забывать, что после дообогащения останется дважды обедненный гексафторид урана, который надо будет перевести в стабильную форму и отправить на долгосрочное хранение. Объем вторичного ОГФУ, как и стоимость его переработки и хранения, снизится при этом не очень сильно.

⁹ Leone D. NNSA Plans to Take Some Portsmouth DUF_6 for Weapons Programs / Exchange Monitor, January 31, 2020 (см.: <https://www.exchangemonitor.com/nnsa-plans-take-portsmouth-duf6-weapons-programs>).

¹⁰ Ruch A. Proposed depleted uranium facility could bring 800-1200 jobs to Paducah / KFVS12, November 10, 2006 (см.: <https://www.kfvs12.com/story/33683029/proposed-depleted-uranium-facility-could-bring-800-1200-jobs-to-paducah>).

¹¹ Совместный доклад Агентства по атомной энергии ОЭСР и Международного агентства по атомной энергии, 2001 (см.: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2001/3035-management-depleted-uranium.pdf>).

¹² Данные о стоимости урана и ЕРР взяты с сайта компании UxC, LLC, занимающейся маркетинговыми исследованиями в атомной промышленности (см.: <http://www.uxc.com>).

ГЛАВА 6.

Перспективы переработки и ликвидации запасов ОГФУ

В 2015 году была принята актуализированная Концепция безопасного обращения с ОГФУ (далее – Концепция-2016). В целях дальнейшей реализации Концепции-2016 разработана Программа безопасного обращения с ОГФУ Госкорпорации «Росатом» (далее – Программа-2020), в которой определены горизонты и намечена дорожная карта решения задачи полной ликвидации запасов ОГФУ, накопленных на предприятиях топливной компании «ТВЭЛ».

Как было указано выше (см. разд. 4.5), для промышленной переработки ОГФУ и перевода его в безопасную форму в настоящее время на площадке АО «ПО ЭХЗ» используется установка «W-ЭХЗ» мощностью 10 тыс. тонн в год.

На следующем этапе переработки накопленного запаса ОГФУ будет выполнено тиражирование установок обесфторивания. Планируется, что в 2024 году будет введена в эксплуатацию еще одна установка – «W2-ЭХЗ» на площадке АО «ПО ЭХЗ», что позволит довести мощность переработки до 20 тыс. тонн ОГФУ в год, а к 2028 году на этом же предприятии планируется увеличить мощность установок до 30 тыс. тонн в год (проект «W3-ЭХЗ»). Кроме того, на площадке АО «УЭХК» будет введена в эксплуатацию установка «W-УЭХК» мощностью 20 тыс. тонн ОГФУ в год. На площадке АО «СХК» в 2025 году будет введена в эксплуатацию установка «НХП-СХК» с планируемой мощностью до 12 тыс. тонн ОГФУ в год. Технология пламенного обесфторивания ОГФУ, которая разрабатывается для этой установки, должна к 2025 году быть испытана и внедрена. Если технология пламенного обесфторивания не будет внедрена на установке «НХП-СХК», то тогда планируется увеличить мощность установки «W-УЭХК» до 30 тыс. тонн ОГФУ в год.

Важным решением, которое утверждено Программой-2020, является решение о сокращении числа площадок с запасами ОГФУ. В первую очередь планируется освободить до 2035 года площадку АО «АЭХК», переместив все запасы ОГФУ на площадку АО «ПО ЭХЗ». До 2040 года будет освобождена площадка АО «СХК».

Таким образом, с учетом ввода в строй пяти вышеперечисленных установок («W» + «НХП-СХК») срок ликвидации склада ОГФУ на всех площадках топливной компании «ТВЭЛ» составит 35 лет, т. е. до 2057 года.

В таблице 3 приведены основные мероприятия, которые должны быть выполнены для решения задачи полной ликвидации запасов ОГФУ на всех площадках¹³.

¹³ Программа по безопасному обращению с ОГФУ Государственной корпорации «Росатом», 2019 (см.: https://osatom.ru/media/uploads/cedee0c6-ed33-41f7-823c-81924454ea3e/02_1_Doklad_po_Programme_OGFU_dlja_Obschest_EkwVQ52.pdf).

Основные мероприятия по реализации программы ликвидации запасов ОГФУ

Направление	Срок реализации	Ожидаемый результат
1. Расширение проектов по переработке ОГФУ		
1.1. Увеличение мощности установки «W-ЭХЗ» до 20 000 тонн ОГФУ в год (проект «W2-ЭХЗ»)	2017-2023 гг.	Увеличение темпов переработки ОГФУ, переход от накопления к снижению склада ОГФУ
1.2. Создание установки по обесфториванию ОГФУ в АО «УЭХК» мощностью 20 000 тонн ОГФУ в год (проект «W-УЭХК»)	2020-2026 гг.	Полное обеспечение потребностей АО «ТВЭЛ» в безводном фтористом водороде
1.3. Увеличение мощности установки «W-ЭХЗ» до 30 000 тонн ОГФУ в год (проект «W3-ЭХЗ»)	2020-2028 гг.	Сокращение удельных издержек на переработку ОГФУ
2. Сокращение числа площадок хранения ОГФУ		
2.1. Перемещение ОГФУ с площадки АО «АЭХК» на площадку АО «ПО ЭХЗ»	К 2035 г.	Полное освобождение площадки АО «АЭХК» от ядерных материалов
2.2. Перемещение ОГФУ с площадки Завода разделения изотопов (ЗРИ) АО «СХК» на площадки АО «ПО ЭХЗ» / АО «УЭХК»	К 2038 г.	Полное освобождение площадки Завода разделения изотопов (ЗРИ) АО «СХК» от ядерных материалов
3. Обеспечение долговременного безопасного хранения ОГФУ		
3.1. Эксплуатация и совершенствование систем мониторинга, контроля состояния и обращения с упаковочными комплектами (УК) для ОГФУ, включая обращение с дефектными УК, выявленными при хранении	Постоянно	1. Обеспечено безопасное хранение контейнеров с ОГФУ в течение 80 лет и более 2. Усовершенствованы технологии переработки ОГФУ в безопасные формы хранения
3.2. Реализация текущих и перспективных НИОКР в области безопасного обращения с ОГФУ,	Постоянно	
в т. ч.: – разработка и испытания конструкции защитного контейнера для перемещения ОГФУ с длительным сроком хранения на значительные расстояния; – разработка технологии подготовки контейнеров с ОГФУ с длительным сроком хранения к перемещению на значительные расстояния	2019-2021 гг.	1. Разработан, изготовлен и испытан защитный контейнер для перемещения ОГФУ с длительным сроком хранения 2. Разработана технология подготовки контейнеров с ОГФУ с длительным сроком хранения к перемещению на значительные расстояния

ГЛАВА 7.

Использование ОГФУ за рубежом

МАГАТЭ признает, что определение политики в области ядерного топливного цикла является прерогативой государства (п. VII Преамбулы Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами). Совместный отчет Агентства по ядерной энергии ОЭСР и МАГАТЭ Management of Depleted Uranium (2001) определяет ОГФУ полезным сырьевым ресурсом. В отчете Management of Depleted Uranium, посвященном вопросам потенциального использования обедненного урана и видам его применения в качестве источника энергии и в промышленных целях, сказано: «Стратегия долгосрочного обращения с обедненным ураном основана на рассмотрении обедненного урана в качестве ценного материала, который может иметь различные применения, и не рассматривается в качестве отхода».

Признается, что обедненный уран является одним из самых проблемных продуктов ядерной индустрии. Поэтому некоторые страны относят ОГФУ к радиоактивным отходам, а другие рассматривают его как сырье для практического применения не только в атомной отрасли, но и во многих других областях. С учетом технологических возможностей и концепции ЯТЦ каждой страны, имеющей разделительные производства, ОГФУ может рассматриваться как полезный сырьевой ресурс или низкоактивные РАО, т. е. единый нормативно-правовой статус отсутствует.

7.1. США

В США согласно Закону «Об атомной энергии» ОГФУ напрямую не классифицируется. По этому закону к низкоактивным отходам относятся любые материалы, не подпадающие ни под одну из следующих категорий: высокорadioактивные отходы, отработавшее ядерное топливо и побочные продукты (разд. 2 закона). Побочный (сопутствующий) продукт определен только как «хвосты или отходы, образовавшиеся при извлечении или концентрировании урана или тория из любой руды» (разд. 11е закона).

В США ОГФУ относится к побочным продуктам, но Комиссия по ядерному регулированию США (NRC) в особых случаях может установить свою категорию для побочного продукта. Поэтому своим распоряжением NRC признала ОГФУ низкоактивным отходом (меморандум и распоряжение № CLI-05-05) на том основании, что он не подпадает ни под одну категорию РАО. Однако в упомянутом решении NRC была сделана важная оговорка, что ОГФУ будет считаться низкоактивным отходом только в том случае, если у его собственника будет отсутствовать стратегия дальнейшего использования материала. Регламент NRC № 10 CFR 40.25 предусматривает генеральную лицензию на использование обедненного урана, содержащегося в промышленных продуктах или устройствах, для различного применения. Эта лицензия позволяет любому лицу владеть обедненным ураном или его использовать.

Таким образом, признание в США ОГФУ низкоактивным отходом не означает необходимость захоронения обедненного урана после перевода ОГФУ в стабильную форму. Если у Министерства энергетики США (DOE) будет иметься привлекательная стратегия дальнейшего использования ОГФУ, оно будет вправе хранить его сколь угодно долго и извлекать из него полезные ресурсы.

В США накоплено более 800 тыс. тонн ОГФУ, которые размещены на площадках закрытых газодиффузионных заводов в Пайктоне и Падьюке, а также на действующем обогатительном заводе компании URENCO в Юнисе. В Падьюке и Пайктоне были построены установки конверсии ОГФУ мощностью 18 и 13,5 тыс. тонн в год соответственно. Они вступили в опытно-промышленную эксплуатацию в 2010 году и основной их продукцией являются закись-окись урана (U_3O_8) и фтористый водород (HF). В 2013 году началась промышленная эксплуатация заводов, и их фактическая производительность составляет около 23 тыс. тонн ОГФУ в год.

Кроме того, компания International Isotopes Inc. (INIS) 2 октября 2012 года получила лицензию на строительство и эксплуатацию завода конверсии ОГФУ мощностью 3,7 тыс. тонн ОГФУ в год. Пуск завода, который должен осуществлять обезфторивание ОГФУ с получением оксидов урана (UO_2 и U_3O_8), до 1400 тонн трифторида бора (BF_3) и/или тетрафторида кремния (SiF_4) и 450 тонн безводного фтористого водорода (HF), намечался на начало 2014 года. Однако в 2013 году INIS объявила о приостановке проекта.

США не рассматривают свои запасы ОГФУ в качестве будущего энергетического ресурса и проводят политику его переработки в более стабильную экологически безопасную форму с целью утилизации, пока не определится потенциальный потребитель этого материала.

7.2. Франция

Во Франции нормативно-правовой статус ОГФУ также не определен. В 1974 году Франция первой начала использовать извлеченный из ОГФУ обедненный уран для изготовления МОКС-топлива.

Вопрос об отнесении ОГФУ к полезным ресурсам или отходам возник в 1998 году в аспекте возможности его долгосрочного хранения. В июле 1998 года административный трибунал провинции Лимож признал ОГФУ радиоактивным отходом при современном уровне развития технологий и отозвал лицензию компании COGEMA на его бессрочное хранение. Однако в ноябре 1998 года апелляционный суд Бордо постановил, что ОГФУ не является отходом, а представляет собой «сырьевой материал прямого применения, который может эффективно использоваться для множества целей». Со времени судебного прецедента ОГФУ во Франции рассматривается в качестве полезного ресурса.

Франция осуществляет дообогащение ОГФУ в небольших объемах. ОГФУ обогащается с достаточно высокой концентрацией ^{235}U (0,3-0,4%). Дообогащение регенерированного урана для французской компании EDF производит компания URENCO.

7.3. Страны URENCO

В Великобритании, Германии и Нидерландах в национальном законодательстве статус ОГФУ непосредственно не определен, но преобладает мнение, что ОГФУ – это полезный ресурс. Причем в Германии, проводящей политику отказа от ядерной энергетики, эксплуатируется обогатительный завод в Гронау и, соответственно, продолжается накопление ОГФУ.

В Великобритании более 130 тыс. тонн ОГФУ накоплено на площадке «Кейпенхерст», где расположено два хранилища, в одном из которых размещен основной объем ОГФУ, образовавшийся во время эксплуатации газодиффузионного завода в 1950-1980 годах. В настоящее время на площадке эксплуатируется обогатительный завод компании URENCO и, соответственно, продолжается накопление. Также на площадке проводились исследования по плазменной переработке ОГФУ с получением металлического урана и элементарного фтора, и в результате опытных работ часть его переведена в металлический уран, оксиды и тетрафторид урана.



Хранение ОГФУ на разделительном заводе в Гронау (Германия)

В 2019 году на площадке «Кейпенхерст» началась эксплуатация предприятия по конверсии ОГФУ мощностью 7 тыс. тонн урана с получением оксида обедненного урана и ~5 тыс. тонн фтористого водорода. На заводе планируется перерабатывать ОГФУ со всех трех европейских площадок обогатительной компании URENCO, включая «Алмело» (Нидерланды) и «Гронау» (Германия). Потенциальные области применения обедненного урана не определены, однако его захоронение не рассматривается.

7.4. Другие страны

В Японии продолжается хранение ОГФУ, а его переработка планируется только в будущем для использования обедненного урана в качестве топлива в реакторах на быстрых нейтронах. Статус ОГФУ в Японии, так же как и в других странах, не определен. После аварии на АЭС «Фукусима-1» работы по способам конверсии ОГФУ не проводятся.

Планы по переработке ОГФУ отсутствуют сегодня и в Китае, где продолжается его хранение в качестве будущего энергетического сырья.

Обогащенный уран из ОГФУ используется также в Бельгии, Финляндии и Швеции. Этот вторичный источник обогащенного урана обеспечивает до нескольких процентов спроса на рынке Европы.

Таким образом, в настоящее время только четыре страны (Франция, Россия, США и Великобритания) в промышленном масштабе осуществляют конверсию ОГФУ, переводя его в стабильную оксидную форму и сокращая его запасы.

ГЛАВА 8.

Как организовать общественное участие в решении вопросов безопасного обращения с ОГФУ

Для достижения общественной приемлемости при решении вопросов безопасного обращения с ОГФУ необходимо создать условия для общественного участия в процессах, связанных с задачами, стоящими перед организациями Госкорпорации «Росатом».

Общественное участие может осуществляться в различных формах, таких, например, как общественная экспертиза, обсуждения, слушания, а также общественный мониторинг и контроль. Основная задача общественного участия заключается в том, чтобы организациями ГК «Росатом», реализующими проекты обращения с ОГФУ, соблюдалась законность и обеспечивалась максимальная безопасность всех процессов.

Для организации общественного участия на принципах публичности и добровольности создана рабочая группа в составе Комиссии по экологии Общественного совета ГК «Росатом». Для деятельности в рабочей группе приглашены заинтересованные активисты, представляющие экологические и другие общественные организации, а также СМИ и представители региональных и местных законодательных органов. Планом рабочей группы предусматриваются различные формы общественного участия, такие как мониторинг, посещение предприятий в ходе технических и пресс-туров, а также экспертизы, общественные обсуждения и слушания.

Важным результатом общественного участия является достижение открытости, установление обратной связи между организациями Госкорпорации «Росатом» и общественностью, обеспечение взаимопонимания и учета мнений, предложений и рекомендаций сторон.

В конце 2019 – начале 2020 года осуществлялась подготовка Программы безопасного обращения с ОГФУ Госкорпорации «Росатом», в процессе обсуждения и принятия которой со стороны экологической общественности были сформулированы предложения и целый ряд вопросов.

Основные вопросы касались темы обращения с ОГФУ. Было задано около 40 вопросов, ответы на большинство из них изложены в предыдущих главах доклада. Некоторые вопросы затрагивали тему экономики, статистики наступления тех или иных событий (аварийных происшествий) или прогнозов и сценариев на будущее, которые не связаны напрямую с процессами обращения с ОГФУ (например, прогнозы по развитию быстрых реакторов и перехода на замкнутый топливный цикл, в том числе и за рубежом). Незначительная часть вопросов осталась без ответа по причине ограничения распространения коммерческой или служебной тайны.

Опыт взаимодействия представителей общественности и госкорпорации в рамках созданной рабочей группы показал, что имеется достаточно много задач, которые необходимо будет решать на протяжении всего периода, пока будет реализовываться Программа-2020.

Прежде всего это вопросы своевременной информированности общественности и создания условий для мониторинга происходящего в области обращения с ОГФУ. Распространяемая информация должна в первую очередь касаться безопасности, а также реализации мероприятий, предусмотренных Концепцией-2016 и Программой-2020. Следует наладить каналы, через которые будет предоставляться информация. Эту работу целесообразно и реально сосредоточить в формате рабочей группы Комиссии по экологии, при этом еще раз подчеркнув, что в деятельности рабочей группы могут принимать участие все заинтересованные представители общественности из регионов. Других реальных каналов в настоящее время практически не существует.

Вторым важным вопросом общественного участия является знакомство с предприятиями (производствами), на которых осуществляется хранение и переработка ОГФУ. Как показывает опыт организации технических туров на предприятия Госкорпорации «Росатом», представители общественности имеют возможность не только услышать, как реализуются проекты, но и увидеть, получив при этом разъяснения от непосредственных участников процесса обращения с ОГФУ.



Технический тур на Производственное объединение «Электрохимический завод»

Общественная экспертиза позволяет представителям общественности, обладающим специальными знаниями, проанализировать и оценить технические нормативные акты, намечаемые проекты, принимаемые документы и другие материалы, которые касаются вопросов обращения с ОГФУ. Исходя из планов Госкорпорации «Росатом» по наращиванию мощностей по переработке ОГФУ у заинтересованной общественности будет возможность

организовать экспертизу, так же как и общественные обсуждения в процессе подготовки документов к государственной экологической экспертизе. Детально эти вопросы рассмотрены в разд. 4.6 настоящего доклада.



Заседание Общественного совета ГК «Росатом»

Основной задачей рабочей группы Комиссии по экологии Общественного совета Госкорпорации «Росатом» является повышение уровня доверия граждан к проектам в области обращения с ОГФУ и обеспечение взаимодействия предприятий отрасли с институтами гражданского общества по всем перечисленным выше вопросам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы доклада надеются, что им удалось в доступной форме и в полном объеме объяснить, что собой представляет сложный и проблемный материал под названием ОГФУ, а также описать весь процесс обращения с ним – с тем, чтобы помочь заинтересованной общественности получить ответы на некоторые важные для нее вопросы.

О БЕЗОПАСНОСТИ

ОГФУ является ядерным материалом, побочным продуктом процесса обогащения урана. При нормальных условиях хранения (транспортировки) ОГФУ не представляет радиационной опасности, его активность меньше, чем природного урана. В то же время обедненный гексафторид урана при определенных особых условиях становится химически опасным токсичным веществом. Радиационные и химические последствия при различных сценариях (кроме гипотетических) описаны в разд. 4.4. Следует иметь в виду, что в результате аварийных случаев практически не наступает тяжелых последствий (гибели людей или обширного загрязнения территорий).

В тексте доклада оценена вероятность наступления гипотетической аварии (падение тяжелого самолета на площадку хранения или на эшелон с грузом ОГФУ), которая составляет 10^{-8} /год. При этом, для сравнения, подсчитана вероятность падения сверху на человека предмета или небесного тела (которая, по оценкам ученых Гринвичской обсерватории, составляет $1,5 \cdot 10^{-7}$ /год) или вероятность погибнуть в результате дорожно-транспортного происшествия в России (которая в 2019 году составляла 10^{-3} /год).

Эти примеры дают возможность сравнить риски и понять, что страхи, распространяемые паникерами, не имеют под собой реальной почвы.

О КАТЕГОРИИ ОГФУ (РАДИОАКТИВНЫЙ ОТХОД ИЛИ ПОЛЕЗНЫЙ РЕСУРС)

Самые горячие дискуссии в общественном поле развернулись вокруг вопроса: ОГФУ – это радиоактивный отход или полезный ресурс?

Если ОГФУ – радиоактивный отход, то проект АО «Техснабэкспорт» по ввозу ОГФУ из Германии должен расцениваться как нарушающий российское законодательство, поскольку на территорию России ввозятся чужие радиоактивные отходы.

В гл. 3, 4 и 6 приведена информация об использовании ОГФУ на предприятиях России и о планах по обращению с ОГФУ на ближайшее будущее. Аргументы и конкретные данные свидетельствуют о том, что ОГФУ используется в атомной и других областях промышленности как полезный ресурс. Кроме того, как показано на схеме процесса переработки ОГФУ (см. разд. 4.5.3), в результате технологических операций в конечном счете на хранении остается только ОЗОУ, который в перспективе планируют использовать в качестве сырья для ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Следует заметить, что ОЗОУ обладает свой-

ствами, которые почти не представляют потенциальной радиационной и иной опасности (см. разд. 4.5.2).

Таким образом, согласно российским законам, в которых содержится определение и разъяснение понятия «радиоактивные отходы», ОГФУ не может быть отнесен к категории РАО, и законодательство РФ, запрещающее ввоз на территорию России РАО, а также моральные нормы, о которых говорят некоторые экологов, не нарушаются.

Единственная задача, которая стоит перед предприятиями, занимающимися транспортировкой, хранением и переработкой ОГФУ, – обеспечить безопасность этих процессов.

ОБ ЭКОНОМИКЕ

В текущей ситуации на рынке урана использование ОГФУ как ресурса для получения урана и фторсодержащих продуктов может быть экономически оправданно, поскольку себестоимость разделительных производств достаточно низкая. В случае если спрос на уран, а вместе с ним и цена урана на мировом рынке будет снижаться, экономическая эффективность дообогащения ОГФУ станет иной. Реализация фторсодержащих продуктов, которые являются полезным компонентом производства, вряд ли сможет обеспечить прибыльность переработки ОГФУ. Для оценки коммерческой эффективности использования ОГФУ в реакторах на быстрых нейтронах необходимо будет определить, насколько успешно станет развиваться это направление. На данный момент делать какие-либо однозначные выводы преждевременно.

О ПЕРСПЕКТИВАХ

В настоящее время в мире накоплено более 2 млн тонн ОГФУ. Половина всего накопленного мирового объема находится на территории России. Большую часть объема богатых отвалов прежних лет планируется дообогатить. Другая часть, с учетом химической и токсикологической опасности ОГФУ, будет переведена в стабильные химически стойкие формы, безопасные для длительного хранения и удобные для дальнейшего использования в различных областях промышленности, включая атомную.

Для России принятие и реализация программ перевода ОГФУ в стабильную безопасную форму в ближайшие 30-40 лет имеет большое значение. Для этого в Программе-2020 разработана и представлена дорожная карта и к 2057 году определен период, на который намечен план полной ликвидации накопленного объема ОГФУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Андреев Б. М., Арефьев Д. Г., Баранов В. Ю. и др. Изотопы: свойства, получение, применение / под ред. В. Ю. Баранова. Т. 2. М.: Физматлит, 2005. 727 с.

Борисевич В. Д. Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге: учеб. пособие для вузов / В. Д. Борисевич, В. Д. Борман, Г. А. Сулаберидзе и др.; под ред. В. Д. Бормана. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 275 с.

Быков А. А. Обзор мировых практик обращения с обедненным гексафторидом урана // Ядерный клуб. 2016. № 1-2. С. 16-21.

Внуков В. С. Обеспечение ядерной безопасности на заводах, производящих ядерное топливо АЭС. М., 2009. – 172 с.

Концепция безопасного обращения с обедненным гексафторидом урана. Утв. 27.12.2006 руководителем Федерального агентства по атомной энергии С. В. Кириенко.

Копырин А. А., Карелин А. И., Карелин В. А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива. М.: ЗАО «Издательство Атомэнергоиздат», 2006. 576 с.

Кудрина Н. Не стоит прибежаться // Атомный эксперт. 2019. № 8 (77). С. 8-11.

Орехов В. Т., Рыбаков А. Г., Шаталов В. В. Использование обедненного гексафторида урана в органическом синтезе. М.: Энергоатомиздат, 2007. 112 с.

Павлов А. В., Платов М. А. Обогащение урана: распространение газоцентрифужной технологии в мире // Ядерный клуб. 2000. № 2 (3). С. 8-14.

Программа безопасного обращения с обедненным гексафторидом урана Госкорпорации «Росатом». Утв. 26.02.2010 генеральным директором Госкорпорации «Росатом» А. Е. Лихачевым.

Урановый проект HOME WISE (<https://www.wise-uranium.org/edumu.html>).

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, НП-053-16 «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» (приказ Ростехнадзора от 15.09.2016 № 388).

Шульга И. Наследие обогащения // Атомный эксперт. 2018. № 2 (63). С. 40-47.

Bulletin International Atomic Energy Agency (IAEA) // Spring. 1985. P. 28-31.

Management of Depleted Uranium / A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency: Paris, OECD Publications Service. 65 p.

Nuclear fuel cycle science and engineering / Ed. by I. Crossland. Cambridge Woodhead Publishing Ltd, 2012. 648 p.

BELLONA

bellona.org

