

## Проблемы обращения с обеднённым гексафторидом урана (обзор)

© 2020. О. Э. Муратов, к. т. н., член Общественного совета, Госкорпорация «Росатом», 119117, Россия, г. Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24, e-mail: oleg@twell.ru

Обеднённый уран – один из самых противоречивых и проблемных продуктов ядерной индустрии. К большей его части, хранящейся в виде гексафторида урана, в настоящее время относятся как к проблемным отходам. Главную опасность обеднённого гексафторида урана (ОГФУ), являющимся высокотоксичным веществом, представляют химические свойства, а радиоактивность его невысока. Неопределённость правового статуса ОГФУ иногда относит его к радиоактивным отходам. В то же время, благодаря химическому составу и свойствам ОГФУ, его следует рассматривать как уникальное сырьё для практического применения не только в атомной, но и во многих других областях промышленности. В ожидании переработки для использования накопленных запасов ОГФУ необходимо переводить химически опасное токсичное вещество в устойчивые безопасные формы.

**Ключевые слова:** ядерное топливо, обогащение урана, изотопный состав, удельная активность, стойкость к воздействиям, разделительное производство, оксиды урана, обесфторивание.

## Handling problems of depleted uranium hexafluoride (review)

© 2020. O. E. Muratov ORCID: 0000-0001-5148-4189, State Atomic Energy Corporation, 24, Bolshaya Ordynka St., Moscow, Russia, 119117, e-mail: oleg@twell.ru

Since the dawn of the nuclear era, large stocks of depleted uranium have arisen as a by-product of uranium enrichment operations. Nowadays, the world has accumulated more than two million tons of depleted uranium hexafluoride (DUH). It is a very chemically dangerous and toxic substance, but its radiation properties are quite low. Some very important issues concerning radiation, chemical protection, security and safety of DUH should be taken into consideration.

Lots of countries regard DUH as radioactive waste, but there is a big range of its possible useful applications in various fields, including the nuclear fuel cycle. Re-enrichment of DUH represents potentially valuable source of <sup>235</sup>U for light water reactors, whilst the remaining <sup>238</sup>U could be used for the “blankets” of the fast reactors. The efficient centrifuge technologies could be applied for the re-enrichment of the DUH. Future use of nuclear energy would ultimately require the implementation of fast reactors. In this case, DUH would become an important energy source.

Some key issues, such as time, quantity, form and way of storage of the depleted uranium require further considerations. As the application of DUH is currently limited, many countries with its stockpiles showed an interest in developing technologies on safe storage, potential future uses and disposition options. In case of improper managing, depleted uranium hexafluoride could represent potential chemical hazard.

Alternatives for the strategic management of DUH therefore include the deconversion of its stocks to stable forms more suitable for long-term management. Uranium oxides of high density are other possible forms with a high long-term stability. In this case, due to their high chemical stability and low solubility, uranium oxides are in general more preferable. Currently there is an effective technology to deconvert DUH to uranium protoxide-oxide, the most stable substance.

**Keywords:** nuclear fuel, uranium enrichment, isotopic composition, specific activity, resistance to impacts, separation production, uranium oxides, defluorization.

Единственное природное ядерное топливо – уран. Он широко распространён в природе, но находится в очень рассеянном состоянии, и руды с содержанием урана около 1% считаются очень богатыми [1]. Природный уран, состоящий из смеси трёх изотопов:  $^{238}\text{U}$  (99,2739%),  $^{235}\text{U}$  (0,7205%) и  $^{234}\text{U}$  (0,0056%), является слаборадиоактивным элементом с удельной активностью 24,79 кБк/г, обусловленной, в основном,  $^{234}\text{U}$  с удельной активностью 230,22 МБк/г [2].

На первой стадии изготовления ядерного топлива производится обогащение и очистка руды. Содержание урана в концентратах

в 200 раз выше, чем в руде, а содержание примесей не превышает  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  [3] и соответствует требованию ядерной чистоты.

Для большинства реакторов в качестве ядерного топлива используется обогащённый уран по делящемуся изотопу  $^{235}\text{U}$  [4], единственному природному изотопу, в котором возможна самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция. Единственным веществом, пригодным для разделения изотопов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , является газообразный гексафторид урана ( $\text{UF}_6$ ), поэтому уран переводится в газообразное состояние. Технологическая схема конверсии природного урана имеет вид:



Цель данной статьи: на основе обзора свойств обеднённого гексафторида урана и способов обращения с ним обосновать, что он является уникальным сырьём для атомной и других отраслей промышленности.

### Свойства гексафторида урана

Гексафторид урана – единственное его соединение, переходящее в нормальных условиях из твёрдого в газообразное состояние, минуя жидкую фазу, при относительно низкой температуре 56,4 °С [5]. При увеличении температуры или давления он переходит в жидкость [6].

Гексафторид урана негорюч, но при его нагревании выделяются токсичные пары фтористого водорода (HF). В нормальных условиях гексафторид урана не реагирует с кислородом, азотом, углекислым газом. В газообразном и твёрдом состояниях бурно реагирует с водой, включая атмосферную влагу, с образованием уранилфторида ( $\text{UO}_2\text{F}_2$ ) и HF, которые очень гигроскопичны [7]. Реакции экзотермичны, причём тепловыделение реакции с твёрдым гексафторидом урана значительно выше, чем с газообразным (211,6 и 156,8 кДж/моль).

Реакция газообразного гексафторида урана с водой протекает практически мгновенно, а твёрдого – очень медленно, так как образующийся  $\text{UO}_2\text{F}_2$  формирует защитный слой,

препятствующий поступлению воды к поверхности собственно гексафторида урана.

Гексафторид урана – сильный окислитель. В жидком виде реагирует со многими органическими веществами, агрессивен к некоторым металлам, резине и другим полимерным материалам. Стойкими являются никелированная сталь, медь, никель, медно-никелевые и некоторые алюминиевые сплавы. Фторсодержащие пластики устойчивы к гексафториду урана.

Гексафторид урана – химическое токсичное очень едкое вещество, вызывающее тяжёлые отравления и химические ожоги. В соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» относится к веществам I класса опасности.

Радиоактивность гексафторида урана с природным содержанием его изотопов, поступающего на обогащение – 17 кБк/г [8]. Это величина свежеприготовленного вещества, в котором отсутствуют дочерние продукты распада уранового ряда. Удельная активность гексафторида урана в зависимости от степени его обогащения приведена в таблице 1.

Гексафторид урана, полученный из регенерированного урана, дополнительно содержит искусственные изотопы урана –  $^{232}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  и  $^{237}\text{U}$ , активность которых значительно превышает активность природных [9]. Кроме того, регенерированный уран содержит повышенное содержание изотопа  $^{234}\text{U}$ , который является продуктом цепочки распада  $^{238}\text{U}$ .

Таблица 1 / Table 1

Удельная активность гексафторида урана в зависимости от степени обогащения  
Specific activity of uranium hexafluoride depending on the degree of enrichment

Вид гексафторида урана Types of uranium hexafluoride	Содержание <sup>235</sup> U, % Content of <sup>235</sup> U, %	Активность, Бк/г Activity, Bq/g
Обеднённый / Depleted	0,1	$2,7 \cdot 10^3$
	0,2	$5,3 \cdot 10^3$
	0,45	$1,2 \cdot 10^4$
Природный / Natural	0,72	$1,7 \cdot 10^4$
Обогащённый / Enriched	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	$2,3 \cdot 10^6$	

Примечание: значения удельной активности включают активность <sup>234</sup>U, который концентрируется в процессе обогащения, и не включают вклад дочерних продуктов.

Note: the specific activity values include the activity of <sup>234</sup>U, which is concentrated during the enrichment process, and do not include the contribution of child products.

При обогащении урана образуются обогащённый урановый продукт (ОУП), который используется для изготовления топлива, и обеднённый гексафторид урана (ОГФУ), являющийся побочным продуктом. Объёмы ОГФУ, которые накапливаются на промышленных площадках разделительных заводов [10] в 6–8 раз превышают объёмы ОУП.

Количество остаточного <sup>235</sup>U в ОГФУ зависит от технологии обогащения и составляет от 0,05 до 0,40%. Удельная активность ОГФУ определяется практически только активностью <sup>238</sup>U (12,5 кБк/г), так как дающий основной вклад в активность природного урана <sup>234</sup>U вместе с <sup>235</sup>U переходит в ОУП. Активность ОГФУ после обогащения регенерированного урана также сравнима с активностью природного урана, так как содержащиеся в регенерате искусственные изотопы, переходят в ОУП [11].

### Обогащительные технологии и накопление ОГФУ

Проблема накопления запасов ОГФУ возникла в 1950-х годах после начала развития разделительных производств и остаётся актуальной для стран как продолжающих обогащение урана, так и прекративших его по экономическим или технологическим причинам [12].

Первая технология обогащения урана – газодиффузионное разделение изотопов <sup>235</sup>U

и <sup>238</sup>U – основана на разнице в подвижности и, соответственно, скорости прохождения сквозь пористую мембрану молекул газообразного вещества. Молекулы газа с лёгким изотопом урана легче проходят через мембрану, и после её прохождения гексафторид обогащён изотопом <sup>235</sup>U. Ввиду малого различия масс (1,5%) молекул гексафторида с <sup>235</sup>U и <sup>238</sup>U производительность диффузионного метода мала. Кроме того, через мембрану частично проникают тяжёлые молекулы, а лёгкие не проходят. Поэтому в ОГФУ остаётся достаточно высокое количество <sup>235</sup>U [13].

В первых вариантах газодиффузионных технологий в ОГФУ содержалось более 0,4% <sup>235</sup>U. Совершенствование технологии снизило содержание <sup>235</sup>U до 0,3%. Газодиффузионная технология использовалась до конца 1970-х годов, и 98% всего обогащённого урана в мире производилось этим способом.

Более эффективной технологией, обеспечивающей снижение содержания <sup>235</sup>U в ОГФУ до 0,2% и менее, является газодиффузионная, основанная на различии центробежных сил, действующих на молекулы разных масс [14].

Помимо эффективности обогащения газодиффузионная технология значительно менее энергозатратна, чем диффузионная и потребляет в 50 раз меньше энергии на единицу разделения. В конце 1970-х годов в мире на-

чался переход разделительных производств на газоцентрифужные технологии.

В настоящее время все диффузионные заводы остановлены. Все зарубежные обогатительные предприятия оснащены разработанными в Германии газовыми центрифугами [15], а в мире производителями центрифуг являются только Россия и Германия.

В настоящее время мощности по обогащению урана имеются в 13 странах, а промышленное обогащение осуществляют пять корпораций. Предприятия и их производительность (согласно данным ресурса <https://www.wise-uranium.org/edumu.html>) приведены в таблице 2.

В результате отечественных разработок в 1970–1980-е годы в стране был проведён полный перевод разделительной отрасли на газоцентрифужную технологию, что позволило реализовать беспрецедентный рост производства обогащённого урана при многократном снижении затрат на единицу продукции. В настоящее время на российских предприятиях сосредоточено около 40% мировых мощностей по обогащению урана, и центрифуги последних поколений обеспечивают с высокой эффективностью снижение содержания <sup>235</sup>U в ОГФУ до 0,05–0,08% [16].

Обеднённый гексафторид урана – один из самых проблемных и противоречивых продук-

тов ядерной индустрии. Многие относят его к проблемным отходам, но в то же время он является уникальным сырьём для применения во многих областях. В России, согласно Федеральному закону от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», ОГФУ относится к ядерным материалам (содержащим или способным воспроизвести делящиеся (расщепляющиеся) ядерные вещества).

К настоящему времени в мире накоплено более 2 млн т ОГФУ, в том числе в России около 1 млн т. При обогащении 1 тыс. т природного урана образуется 150 т ОУП и 850 т ОГФУ, поэтому к накопленному ежегодно добавляется 40–60 тыс. т ОГФУ [17].

Типичный диапазон концентраций <sup>235</sup>U в накопленном ОГФУ составляет 0,25–0,35%, а в значительной части ОГФУ, наработанного на разделительных мощностях прошлых поколений, 0,4% и более.

Накопленные запасы ОГФУ сконцентрированы в странах, где ранее эксплуатировались или продолжают эксплуатироваться разделительные производства [18]. Подавляющая часть этого объёма хранится в специальных герметичных стальных контейнерах на специально оборудованных открытых площадках разделительных заводов [19]. Контейнеры объёмом 2,5 м<sup>3</sup> изготовлены из высокопрочной легированной углеродистой

Таблица 2 / Table 2

Обогатительные предприятия в мире / Processing plants in the world

№ No.	Корпорация Corporation	Страна Country	Предприятия Companies	Мощность, тыс. ЕРР Production capacity, thousands SWU
1	ТВЭЛ TVEL	Россия / Russia	АО «УЭК», АО «ПО «ЭХЗ», АО «СХК», АО «АЭК» / JSC “UEP”, JSC “EChP”, JSC “SChP”, JSC “AEChPt”	28663
2	URENCO	Великобритания / United Kingdom Германия / Germany Нидерланды / Netherlands США / USA	Capenhurst  Gronau Almelo Eunice	19600
3	Orano	Франция / France	Georges Besse II	7500
4	CNNC	Китай / China	Hanzhun & Lanzhou	7520
5	JNFL	Япония / Japan	Rokkaasho	75
6	–	Аргентина*, Бразилия, Индия, Иран, Пакистан Argentina*, Brazil, India, Iran, Pakistan	–	170
ИТОГО / TOTAL:				63528

Примечание: «–» – нет данных; \* – на опытно-промышленном предприятии используется диффузионная технология.

Note: “–” – no data available; \* – the pilot plant uses diffusion technology.

стали с толщиной стенки 16 мм, которые выдерживают рабочее давление 14 кг/см<sup>2</sup> и рассчитаны на экстремальные механические и коррозионные воздействия [20]. Срок безопасной эксплуатации контейнеров составляет 80–100 лет.

На площадках постоянно осуществляется радиационный контроль, на них созданы комплексные системы диагностики, обслуживания и ремонта контейнеров, которые позволяют выявлять и устранять дефекты, главным из которых является потеря герметичности контейнеров. Все площадки оборудованы системами физической защиты, несмотря на то, что ОГФУ не представляет собой риска распространения. Такая технология хранения, существующая около 70 лет, вполне безопасна, и мировая история хранения ОГФУ свидетельствует, что никаких происшествий с ним не зафиксировано.

Надёжность контейнеров для хранения ОГФУ подтверждает авария, произошедшая 25.08.1984, она не имела никаких радиологических или химических последствий [21]. Грузовое судно *Монт-Луи*, перевозившее 30 контейнеров с 350 т гексафторида урана, затонуло в Северном море на глубине 14 м после столкновения с автомобильным паромом *Олау Британия*. Все контейнеры с гексафторидом урана были извлечены с затонувшего судна, многие из них были повреждены, на них имелись вмятины на стенках, сорванные крышки клапанов, несколько погнутых клапанов. По результатам 752 различных анализов и 146 замеров уровней дозы на контейнерах не было обнаружено ни малейших признаков утечки радиоактивных (уран) и химических веществ (фтор или фтористоводородная кислота) [21].

Кроме ОГФУ, часть обеднённого урана хранится в других химических формах, в виде оксидов или металла [22]. Небольшая доля извлечённого из ОГФУ обеднённого урана используется во Франции для МОКС-топлива для тепловых реакторов, которые эксплуатируются в Западной Европе и Японии.

### Правовой статус и способы обращения с ОГФУ

Способы обращения с ОГФУ в разных странах зависят от их стратегии в области ядерного топливного цикла (ЯТЦ), определение которой по рекомендации МАГАТЭ является прерогативой государства. Учитывая технологические возможности и концепцию ЯТЦ,

ОГФУ может рассматриваться как сырьевой ресурс или радиоактивные отходы. Поэтому в мире отсутствует единый нормативно-правовой статус ОГФУ.

МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР признают ОГФУ ценным сырьевым ресурсом: «Стратегия долгосрочного обращения с обеднённым ураном основана на рассмотрении обеднённого урана в качестве ценного материала, который может иметь различные применения, и не рассматривается в качестве отхода». В странах, в которых ОГФУ признаётся отходом, также рассматривается возможность выгодного его использования [23].

В США ОГФУ признан низкоактивным отходом, но он будет считаться таковым, только если у собственника ОГФУ будет отсутствовать стратегия дальнейшего использования материала [23]. Поэтому не требуется его захоронение, и собственник ОГФУ вправе хранить его сколь угодно долго и извлекать из него полезные ресурсы. Во Франции нормативно-правовой статус ОГФУ также не определён, но он рассматривается в качестве ценного ресурса, и с 1974 г. французы используют извлечённый из ОГФУ обеднённый уран для изготовления МОКС-топлива. В Великобритании, Германии, Нидерландах и Японии в национальном законодательстве статус ОГФУ не определён, но преобладающей точкой зрения является та, что ОГФУ – это ценный сырьевой ресурс [24]. Даже в Германии, провозгласившей отказ от ядерной энергетики, действует обогатительный завод в г. Гронау и продолжается накопление ОГФУ.

В России нормативно-правовой статус ОГФУ также не определён, но при анализе нормативных документов, регулирующих вопросы безопасного обращения с ОГФУ, следует признать его в качестве ценного ресурса.

Согласно закону «Об использовании атомной энергии» (№ 170-ФЗ от 21.11.1995), радиоактивные отходы – это не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества. В законе не указано, предполагается ли использование ОГФУ и извлекаемых из него полезных материалов при современном или перспективном уровне развития технологий. Такая классификация ОГФУ позволяет его импорт в качестве давальческого сырья.

Возможные варианты его дальнейшего использования: дообогащение и использование в ядерной энергетике и других отраслях промышленности обеднённого урана, фтора и фторсодержащих соединений [25].

В природе уран является очень рассеянным элементом, и руды, содержащие примерно

1,5% урана, считаются очень богатыми. Низкие цены на уран (около 55 \$/кг) и ужесточение экологических требований не стимулировали развитие его добычи, и более 25 лет спрос на 40% превышает добычу. Разница покрывается складскими запасами. Несмотря на намерения ряда компаний увеличить добычу урана, она отстаёт от планов и за последнее десятилетие увеличилась с 43,6 до 50,3 тыс. т [26]. Продолжающееся сокращение складских запасов урана и снижение его добычи увеличит разницу между спросом и предложением и потребует дополнительных источников урана.

Обеднённый гексафторид урана является одним из наиболее масштабных вторичных источников урана. Это сырьё «ядерной чистоты», привлекательное для производства ядерного топлива. Выделенные из ОГФУ 3,894 кг урана с обогащением 0,3% эквивалентно одному кг природного урана, содержащего 0,711% <sup>235</sup>U, что позволит почти в четыре раза сократить потребление природного урана [27].

Обеднённый гексафторид урана может стать ощутимым фактором на рынке ядерного топлива. Как побочный продукт первичной переработки природного урана, он может подвергаться дообогащению и сократить в повторно обеднённом ОГФУ содержание <sup>235</sup>U – менее 0,1% [28].

Россия, обладающая наиболее совершенными обогатительными технологиями, является мировым лидером по техническим характеристикам, эффективности и экономичности подобного оборудования. Российская технология обогащения урана позволяет оставлять в ОГФУ 0,05–0,08% <sup>235</sup>U, а зарубежные (URENCO) – 0,20–0,25% [29].

Отечественная технология позволяет эффективно дообогащать ОГФУ с содержанием <sup>235</sup>U 0,2–0,3%, и нарабатываемый уран имеет привлекательную стоимость в сравне-

нии с ценой на природный уран. Технико-экономические показатели обогащения природного урана и дообогащения ОГФУ с различным содержанием <sup>235</sup>U приведены в таблице 3 [30].

Дообогащение ОГФУ осуществляется и во Франции, где обогащается ОГФУ с достаточно высокой концентрацией <sup>235</sup>U (0,3–0,4%) [31]. Этот вторичный источник урана обеспечивает до нескольких процентов спроса на рынке Европы. Дообогащение ОГФ с регенерированным ураном для французской компании EDF проводит концерн URENCO. Топливные сборки с регенератором урана будут использоваться в EDF, начиная с 2023 г. [32].

Для изготовления МОКС-топлива применяется 150 т обеднённого U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, выделенного из ОГФУ и составляющего 90% топливной матрицы. В мире используется 150–200 т МОКС-топлива [33], что позволяет заместить 2–3% мировых потребностей в уране.

Обеднённый уран является сырьём для зон воспроизводства реакторов на быстрых нейтронах [34], с созданием которых связывают будущее своей ядерной энергетики с замкнутым топливным циклом некоторые страны.

Обеднённый гексафторид урана используют и в других отраслях промышленности [35]. Благодаря высокой плотности (19,1 г/см<sup>3</sup>), выделенный обеднённый уран применяется для балласта в судостроении, противовесах нефтяных платформ, балансировочных грузах самолетов и др., где требуются материалы с высокой плотностью.

Для минимизации рисков химической опасности агрессивный и токсичный ОГФУ следует переводить в оксидные формы (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> или UO<sub>2</sub>), которые являются твёрдыми соединениями с температурой плавления 2850 °С, не реагирующими с водой и большинством минеральных и органических кислот [36].

Таблица 3 / Table 3

Технико-экономические показатели дообогащения ОГФУ  
Technical and economic indicators of additional enrichment of DUH

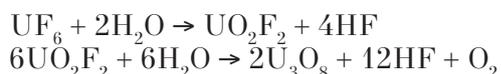
Обогащение, % <sup>235</sup> U Enrichment, % <sup>235</sup> U	Исходный материал, % <sup>235</sup> U Source material, % <sup>235</sup> U	% <sup>235</sup> U в ОГФУ % <sup>235</sup> U in DUH	Количество ОГФУ, кг Quantity of DUH, kg	Количество ЕРР Quantity of SWU
4,4	0,711	0,1	7,04	10,16
	0,711	0,06	6,67	12,33
	0,25	0,1	28,67	22,68
	0,25	0,06	22,84	28,52
	0,711	0,25	9,00	6,66

Эти твёрдые вещества представляют собой оптимальную форму для долговременного хранения стратегических запасов обеднённого урана. Прессованные порошки оксидов урана могут храниться в контейнерах упрощённой конструкции из нелегированной стали.

Обеднённый гексафторид урана является и вторичным источником фтора для производства гексафторида природного урана, он используется в химической, электронной и других отраслях промышленности [37]. Переработка ОГФУ исключит необходимость эксплуатации производств безводного HF путём разложения флюорита (CaF<sub>2</sub>).

С точки зрения экономики обращения с ОГФУ, его дообогащение или использование для разбавления высокообогащённого урана в первую очередь требуется осуществлять с ОГФУ со сравнительно высокой концентрацией <sup>235</sup>U, а деконверсию проводить с ОГФУ с минимальной концентрацией <sup>235</sup>U.

Первой в мире стратегию по деконверсии ОГФУ приняла Франция, где в 1984 г. была создана первая установка W1 для его перевода в закись-окись урана (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), обеспечивающая обезфторивание гексафторида. Установка работает по принципу пирогидролитического гидролиза парама воды:



Фтор восстанавливается до 70%-ной плавиковой кислоты, а U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> упаковывается в контейнеры DV 70 объёмом 3 м<sup>3</sup>. Заполненные контейнеры, содержащие порядка 10 т U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> удельной активностью 2,11 · 10<sup>4</sup> Бк/г, размещаются в легко возводимом ангаре на хранение.

Позднее была построена вторая аналогичная установка W2, и к настоящему времени

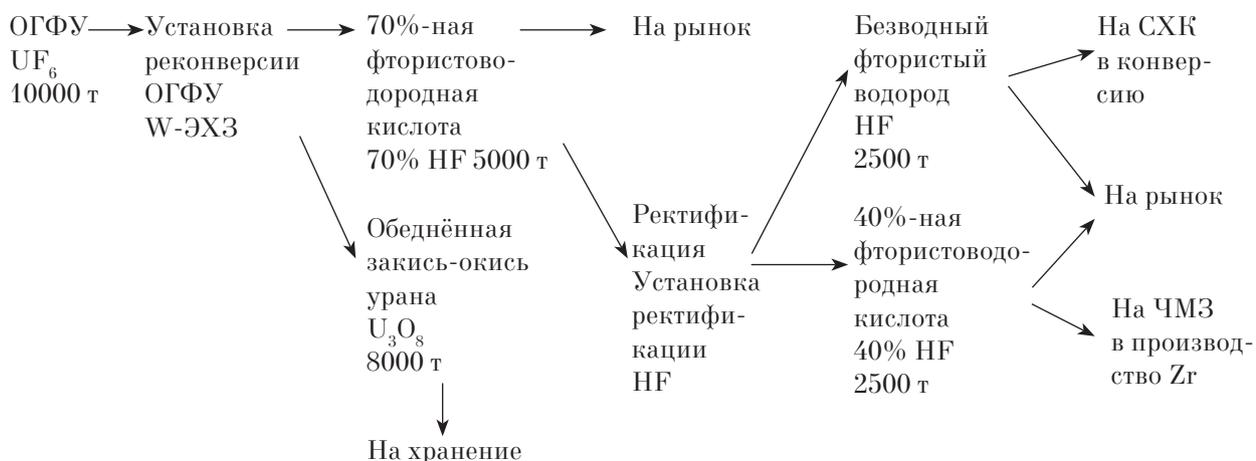
переработано более 140 тыс. т ОГФУ. В настоящее время мощности установок W1 и W2 превышают наработку ОГФУ французских обогатительных предприятий, что приведёт к сокращению его запасов.

В Великобритании на площадке Кейпенхерст накоплено более 30 тыс. т ОГФУ, основные объёмы которого образовались в 1950–1980 годах в результате работы газодиффузионного завода [38]. С 2019 г. эксплуатируется предприятие по деконверсии ОГФУ мощностью 7 тыс. т ОГФУ, получая оксид обеднённого урана и фторводород. На заводе планируется перерабатывать ОГФУ со всех трёх европейских площадок URENCO. Потенциальные области применения обеднённого урана не определены, но его захоронение не рассматривается.

В Японии и Китае продолжается хранение ОГФУ, а его переработка планируется только в будущем для использования обеднённого урана в качестве топлива в реакторах на быстрых нейтронах.

### Стратегия обращения с ОГФУ в России

С учётом больших объёмов ОГФУ в России, принята стратегия по его деконверсии. В 2009 г. на АО «Электрохимический завод» по контракту с французской компанией SOGEMA (ныне Orano) введена в эксплуатацию установка W-ЭХЗ с годовой производительностью 10 тыс. т ОГФУ. Установка аналогична французской W2, но дополнительно оснащена комплексом ректификации для получения безводного фтористого водорода и 40%-ной плавиковой кислоты. Материальный баланс на установке W-ЭХЗ приведён на схеме:



За время эксплуатации установки W-ЭХЗ переработано около 100 тыс. т ОГФУ и сейчас на «Электрохимическом заводе» прекратилось накопление ОГФУ от текущей деятельности.

Однако даже с учётом положительного экономического эффекта от реализации фторсодержащих продуктов эксплуатация установки носит затратный характер: стоимость переработки превышает стоимость хранения.

Для ликвидации накопленных объёмов ОГФУ и прекращения дальнейшего его накопления от текущей деятельности разработана «Программа безопасного обращения с ОГФУ Государственной корпорации «Росатом» [39], предусматривающая планомерное сокращение его запасов, а затем и полную их ликвидацию. При этом не предусматривается захоронение.

Для ликвидации накопленных объёмов ОГФУ в период 2023–2028 гг. предусмотрен ввод в эксплуатацию четырёх установок W и НХП-СХК. За счёт ввода дополнительных установок с 2028 г. начнётся снижение запасов накопленного ОГФУ, а окончательная их ликвидация будет в 2057 г. Также имеют перспективы использование полученных продуктов.

### Заключение

Обеднённый гексафторид урана является побочным продуктом обогащения урана для изготовления ядерного топлива и ядерного оружия. В настоящее время в мире накоплено более 2 млн т ОГФУ, большая часть которого образовалась при выполнении ядерно-оружейных программ. В дальнейшем для мирной ядерной энергетики ОГФУ нарабатывался во многих странах.

Обеднённый гексафторид урана не представляет радиационной опасности, его активность меньше, чем природного урана, однако, это химически опасное токсичное вещество. Поэтому проблема безопасного обращения с ОГФУ имеет мировой характер.

Проблема обращения с ОГФУ связана с совершенствованием технологий обогащения урана. Начальные газодиффузионные технологии не позволяли эффективно извлекать делящийся  $^{235}\text{U}$ , поэтому в настоящее время возможно дообогащать ОГФУ, превратив его в дополнительный источник уранового сырья, сократив таким образом добычу природного урана.

Развитие реакторных технологий и вовлечение в ЯТЦ новых материалов, включая обеднённый уран, сделали ОГФУ стратеги-

ческим сырьём для ЯТЦ. Кроме того, ОГФУ является дополнительным источником фтора, широко используемого во многих отраслях промышленности.

Учитывая химическую и токсикологическую опасность ОГФУ, МАГАТЭ рекомендовало переводить его в стабильные химически стойкие формы, безопасные для длительного хранения и удобные для дальнейшего использования. В промышленном масштабе такие технологии применяются в Великобритании, России, США и Франции – странах, где сосредоточена подавляющая часть накопленного ОГФУ, причём только Россия и Франция имеют реальные программы по использованию продуктов его переработки.

### References

1. Pribytkov P.V. Basic principles of classification of industrial uranium ores // *Atomnaya Energiya*. 1960. V. 9. No. 3. P. 201–207 (in Russian).
2. Isotopes: Properties. Receiving. Application. In 2 vol. V. 2. / Ed. V.Yu. Baranov. Moskva: Fizmatlit, 2005. 727 p. (in Russian).
3. Lizunov A.V., Tananaev I.G. Production of isotopes. Moskva: Izdatelskiy dom MEI, 2015. 254 p. (in Russian).
4. Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A.H. The nubase evaluation of nuclear and decay properties // *Nuclear Physics A*. 2003. V. 729. No. 1. P. 3–128. doi: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001
5. Helmer R.G., Browne E., Be M.-M. International decay data evaluation project // *Journal of Nuclear Physics Technic*. 2002. V. 1. No. 2. P. 455–458. doi: 10.1080/00223131.2002.10875138
6. Gromov B.V. Introduction to chemical technology of uranium. Moskva: Atomizdat, 1978. 336 p. (in Russian).
7. Brickwedde F.G., Hoge H.J., Scott R.B. The low temperature heat capacities, enthalpies, and entropies of  $\text{UF}_4$  and  $\text{UF}_6$  // *The Journal of Chemical Physics*. 1948. V. 16. No. 5. P. 429–436. doi: 10.1063/1.1746914
8. Audi G., Thibault C., Wapstra A.H. The Ame2003 Atomic Mass Evaluation (II). Tables, graphs and references // *Nuclear Physics A*. 2003. V. 729. No. 1. P. 337–676. doi: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.003
9. Vnukov V.S. Nuclear safety's ensuring at plants that produce nuclear fuel for nuclear power plants. Moskva: TVEL, 2009. 172 p. (in Russian).
10. Kudrina N. Don't be shy // *Atomnyy ekspert*. 2019. No. 8 (77). P. 8–11 (in Russian).
11. Burrows T.W. The evaluated nuclear structure data file: philosophy, content and uses // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1990. V. 286. No. 3. P. 595–600. doi: 10.1016/0168-9002(90)90922-S
12. Shulga I. Legacy of enrichment // *Atomnyy ekspert*. 2018. No. 2 (63). P. 40–47 (in Russian).

13. Safutin V.D., Verbin Yu.V., Tolstoy V.V. Status and prospects of separation plants // *Atomnaya Energiya*. 2000. V. 89. No. 4. P. 338–343 (in Russian).
14. Borisevich V.D., Borman V.D., Sulaberidze G.A., Tikhomirov A.V., Tokmantsev V.I. Physical basis of isotope separation in a gas centrifuge / Ed. V.D. Borman. Moskva: Izdatelskiy dom MEI, 2011. 275 p. (in Russian).
15. Pavlov A.V., Platov M.A. Uranium enrichment: the spread of gas-centrifuge technology in the world // *Yadernyy klub*. 2000. No. 2 (3). P. 8–14 (in Russian).
16. Bukharin O. Understanding Russia's uranium enrichment complex // *Science and Global Security*. 2004. V. 12. No. 3. P. 193–214. doi: 10.1080/08929880490521546
17. Golovko V. The problems of depleted uranium // *Nauka i tekhnika*. 2015. No. 9 (112). P. 20–25 (in Russian).
18. Bykov A.A. Overview of world practices for handling depleted uranium hexafluoride // *Yadernyy klub*. 2016. No. 1–2. P. 16–21 (in Russian).
19. Laverov N.P., Velichkin V.I., Yudinsev S.V., Tagirov B.R. Geological conditions of safe long-term storage and disposal of depleted uranium hexafluoride // *Geology of Ore Deposits*. 2010. V. 52. No. 4. P. 261–266. doi: 10.1134/S107570151004001X
20. Polskiy V.I., Kalin B.A., Yakushin V.L., Chernov I.I. Materials science problems of ecology in the field of nuclear power. Moskva: Izdatelskiy dom MEI, 2012. 176 p. (in Russian).
21. Bulletin International Atomic Energy Agency (IAEA). Spring, 1985. P. 28–31.
22. Depleted uranium hexafluoride management programme. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-AR-124080, 1997. V. 1. Rev. 2. P. 3–6.
23. Black P., Tauxe J., Perona R., Lee R., Catlett K., Balshi M., Fitzgerald M., McDermott G., Shrum D., McCandless S., Sobocinski R., Rogers V. Advancing performance assessment for disposal of depleted uranium at Clive Utah – 12493 // WM2012 Conference. Phoenix, Arizona, USA, 2012, P. 1–15.
24. Management of depleted uranium // A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Paris: OECD Publications Service, 2001. 65 p.
25. Orekhov V.T., Rybakov A.G., Shatalov V.V. Use of depleted uranium hexafluoride in organic synthesis. Moskva: Energoatomizdat, 2007. 112 p. (in Russian).
26. World nuclear performance report 2019. WNA Report No. 2019/007: WNA, London, 2019. 36 p.
27. Nuclear fuel cycle science and engineering / Ed. I. Crossland. Cambridge Woodhead Publishing Ltd, 2012. 648 p.
28. Diehl P. Re-enrichment of West European depleted uranium tails in Russia // *Energy Solutions*. Utah Low-Level Radioactive Waste Disposal License – Condition 35 (RML UT2300249) Compliance Report. Energy Solutions, Salt Lake City, 2011. 48 p.
29. Kehoe R.B. The enriching troika, a history of Urenco to the year 2000. Urenco, Marlow, 2002. 296 p.
30. Bukharin O. Russia's gaseous centrifuge technology and uranium enrichment. Princeton University, 2004. 44 p.
31. Forsberg C.W. Effect of depleted-uranium dioxide particulate fill on spent-nuclear-fuel // *Nuclear Technology*. 2000. V. 131. P. 337–353. doi: 10.13182/NT00-A3121
32. Management of reprocessed uranium. Current status and future prospects // IAEA-TECDOC-1529. IAEA, Vienna, 2007. 99 p.
33. Kopyrin A.A., Karelin A.I., Karelin V.A. Technology of production and radiochemical processing of nuclear fuel. Moskva: ZAO "Izdatelstvo Atomenergoizdat", 2006. 576 p. (in Russian).
34. Factors determining the long term back end nuclear fuel cycle. Strategy and Future Nuclear Systems. IAEA-TECDOC-1286. IAEA, Vienna, 2002. 212 p.
35. Hutchings G.J., Heneghan C.S., Hadson I.D., Taylor S.H. Uranium-oxide-based catalysts for the destruction of volatile chloro-organic compounds // *Nature*. 1996. V. 384. P. 341–343. doi: 10.1038/384341a0
36. Tananaev I.V., Nikolaev N.S., Lukyanychev Yu.A., Opalovskiy A.A. Chemistry of uranium fluorides // *Uspekhi khimii*. 1961. V. XXX. No. 12. P. 1490–1522 (in Russian).
37. Isikava N., Kobayasi E. Fluorine. Chemistry and application: From Japan. Moskva: Mir, 1982. 280 p. (in Russian).
38. Radioactive wastes and materials not reported in the 2013 UK Radioactive Waste Inventory. DECC Report URN 14D043 and NDA Report NDA/ST/STY (14)0013, Prepared by Pöyry Energy Limited and AMEC plc, February 2014 [Internet recourse] [https://ukinventory.nda.gov.uk/wp-content/uploads/2014/02/14D043\\_NDA-STY140013\\_-\\_Radioactive\\_Wastes\\_Materials\\_Not\\_Reported\\_in\\_the\\_2013\\_UK\\_Radioactive\\_Waste\\_Inventory.pdf](https://ukinventory.nda.gov.uk/wp-content/uploads/2014/02/14D043_NDA-STY140013_-_Radioactive_Wastes_Materials_Not_Reported_in_the_2013_UK_Radioactive_Waste_Inventory.pdf) (Accessed: 28.09.20).
39. Program for safe handling of depleted uranium hexafluoride of the Rosatom state Corporation / Ed. A.E. Likhachev. 26.02.2020 (in press).