

1. Технология производства твэлов

Характерной особенностью настоящего периода развития ядерной энергетики является доминирующее строительство АЭС с легководными реакторами (ЛВР) на оксидном топливе (UO_2). Применение оксидного топлива связано с его хорошими эксплуатационными характеристиками: диоксид урана имеет высокую температуру плавления ($\sim 2800^\circ\text{C}$); изотропную кубическую решетку, стабильную в поле облучения при температурах, близких к точке плавления; диоксид урана совместим со многими конструкционными материалами и химически устойчив по отношению к большинству теплоносителей (вода, водяной пар, органические жидкости, углекислый газ, гелий). В компактном виде (цилиндрические таблетки, стержни, кольца, пластины, сегменты) UO_2 позволяет при сравнительно низких обогащениях (до 5% по U^{235}) изготавливать тепловыделяющие элементы (твэлы), способные без серьезных деформаций выдержать высокие степени выгорания. К тому же применение оксидного топлива связано со сравнительно простой технологией изготовления твэлов. Тем не менее, необходимо помнить, что UO_2 , как продукт производства, не является истинным химическим соединением, а представляет смесь различных оксидов урана со «средним» отношением атомов кислорода к атомам урана, равным 2. Общая формула для этого соединения записывается как UO_x , где $1,9 \leq x \leq 2,1$. Стехиометрическое соотношение является одной из паспортных характеристик для топлива. Более того, по мере выгорания урана соотношение уран-кислород в топливе может изменяться.

Производство наиболее распространенных твэлов из диоксида урана состоит из следующих технологических стадий и переделов.

1. *Подготовка ядерного топлива:* приготовление порошков оксидного топлива путем конверсии гексафторида в двуокись урана, прессование и получение спеченных таблеток, шлифование, выходной контроль и комплектование таблеток для снаряжения твэлов.

2. *Подготовка трубчатых оболочек твэлов:* изготовление тонкостенных бесшовных труб.

3. *Снаряжение твэлов топливом:* дозировка и упаковка таблеток в подготовленные к сборке оболочные трубки, установка концевых деталей, герметизация, контроль качества твэл.

4. *Сборка твэлов в ТВС:* соединения твэлов в ТВС; сборка неразъемных соединений.

Изготовление твэлов и ТВС по своему характеру является *массовым механическим и в значительной мере автоматизированным производством прецизионного класса.*

1.1. Подготовка ядерного топлива

Существует несколько способов получения керамического UO_2 и топливных таблеток на его основе.

1. Получение керамического диоксида урана через промежуточную стадию осаждения полиураната аммония (АДУ - процесс).
2. Получение керамического диоксида урана через промежуточную стадию осаждения трикарбонатуранилата (АУК - процесс).
3. Процесс безводного восстановления диоксида урана.
4. Получение диоксида урана через диуранат аммония (осаждение диураната аммония $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ из раствора азотнокислого уранила с последующим фильтрованием, промывкой, сушкой и восстановлением водородом при 900°C).
5. Получение диоксида урана из шестифтористого урана (возгонка UF_6 при 100°C , гидролиз UF_6 в разбавленном растворе аммиака с получением осадка диураната аммония паром (850°C) до образования U_3O_8 и восстановление водородом до диоксида).

Все перечисленные процессы включают две основные стадии – получение двуокиси урана из гексафторида или другого его соединения и изготовление топливных таблеток на основе порошка двуокиси. До промышленного уровня были доведены АДУ и АУК процессы изготовления топлива (в России и США, в частности, используются АДУ процессы). Далее технологические цепочки с кратким описанием первой стадии АДУ и АУК процессов будут кратко рассматриваться.

1.1.1. Общие принципы АДУ процесса

Своим названием АДУ-процесс обязан аммонийдиуранату, являющемуся исходным продуктом для получения многих соединений, в том числе и керамического UO_2 . Обычно под АДУ-процессом подразумевают классическую схему получения керамического UO_2 из UF_6 (гидролиз UF_6 в воде или растворе аммиака – осаждение полиураната аммония – сушка – прокалка – восстановление).

АДУ-процесс предназначен для переработки UF_6 , содержащего повышенную концентрацию ^{235}U либо обедненного по изотопу ^{235}U . Получаемый порошок UO_2 с содержанием до 5% ^{235}U используется для изготовления таблетированного топлива энергетических реакторов типа ЛВР, а порошок UO_2 , обедненный по изотопу ^{235}U , – для топлива зоны воспроизводства реакторов на быстрых нейтронах.

Технологическая схема АДУ-процесса для получения двуокиси урана может быть рассмотрена на примере технологической схемы, используемой на заводе фирмы «Керр-Мак Джи корпорейшн» г. Симарроне (шт. Оклахома, США). Мощность завода – 250 т/год порошков и таблеток UO_2 . Технологическая схема завода показана на рис. 10.

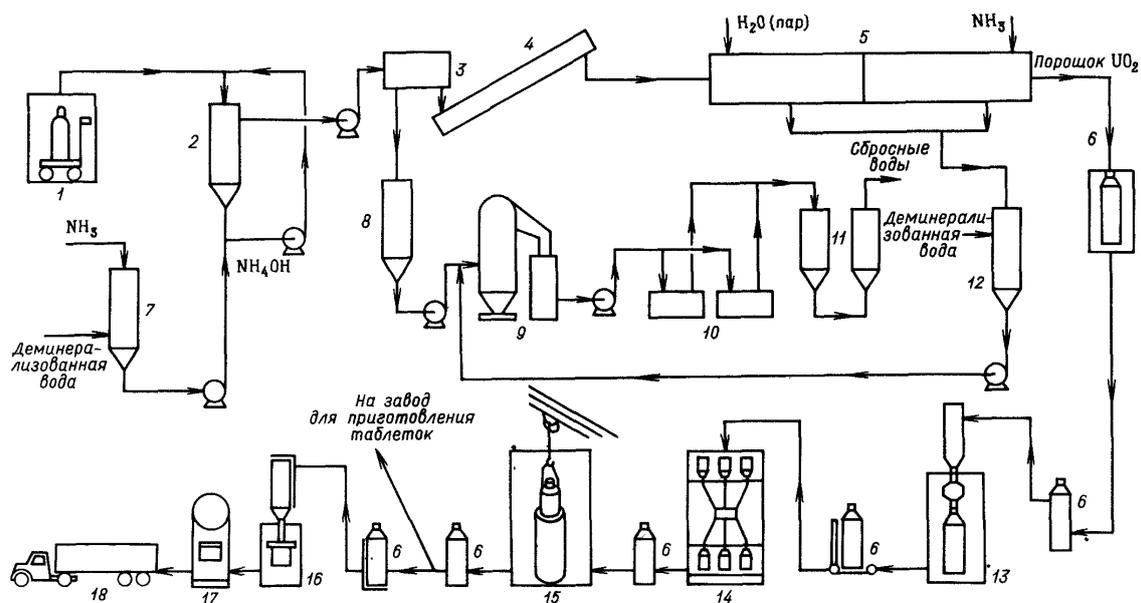


Рис. 10. Аппаратурная (АДУ) схема процесса получения таблетированной UO_2
 1 — камера для испарения UF_6 ; 2 — реактор для осаждения полиураната аммония;
 3 — центрифуга; 4 — сушилка; 5 — вращающаяся двухсекционная печь для
 восстановления; 6 — контейнер с порошком UO_2 ; 7 — колонна для получения
 раствора аммиака; 8 — емкость для фильтрата; 9 — центрифуга для фильтрата; 10 —
 контрольные фильтры; 11 — ионообменные колонны; 12 — скруббер для
 улавливания газов прокалочных печей; 13 — узел измельчения порошка; 14 —
 аппарат для усреднения партии порошка; 15 — склад хранения для порошка UO_2 ;
 16 — узел затаривания; 17 — весы; 18 — транспорт.

Гексафторид урана поставляется на завод в баллонах, содержащих 2,5 тонн UF_6 . Нагреванием до 366 К UF_6 испаряется из баллона и подается в реактор, где в результате смешения UF_6 с водой и аммиаком образуется осадок полиураната аммония. Реактор имеет систему охлаждения для отвода тепла, выделяющегося в процессе реакции. Пульпа полиураната аммония подается на центрифугу. Фугат пропускают через вторую высокоскоростную центрифугу, затем через контрольный фильтр и ионообменную колонну для глубокого извлечения урана из фугатов. Очищенный от урана раствор поступает в систему переработки сточных вод. Осадок с центрифуги поступает в сушилку шнекового типа. Высушенный кек подают в прокалочную двухсекционную печь барабанного типа. В первой секции, куда подается водяной пар, происходит обесфторивание и прокалка до U_3O_8 , во второй секции октаоксид триурана восстанавливается диссоциированным аммиаком до UO_2 . Отходящие газы, содержащие HF , NH_4F и твердые частицы, механически увлеченные газовой фазой, проходят через скруббер, орошаемый деионизованной водой, и сбрасываются в атмосферу. Вся аппаратура — центрифуги, сушилка, печь прокалки и др. — имеет безопасную геометрию (диаметр не превышает 254 мм). Полученный в результате переработки порошок UO_2 измельчается в мельнице до размера частиц

порядка нескольких микрометров, усредняется в смесителе специальной конструкции и поступает на операцию таблетирования.

Общие принципы АУК процесса

До промышленной реализации доведен альтернативный так называемый *АУК процесс*. Промышленный способ получения керамического UO_2 из UF_6 через промежуточное соединение *трикарбонатоуранилата аммония* разработан фирмой НУКЕМ («Нуклеар кеми унд металлурги», ФРГ). Именно этому соединению, широко известному в технической литературе как аммоний-уранилтрикарбонат, АУК процесс обязан своим названием. Аппаратурная схема технологической АУК линии по производству двуокси урана на заводе в Вольфганге под Ханау (Германия) показана на рис. 11.

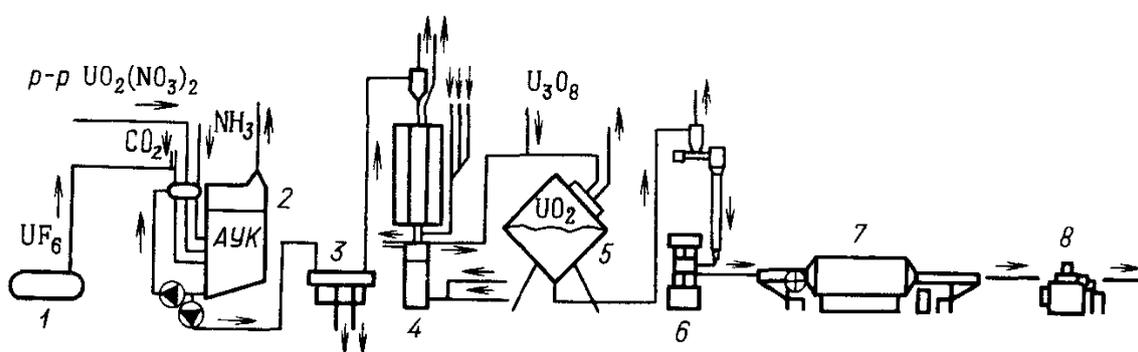
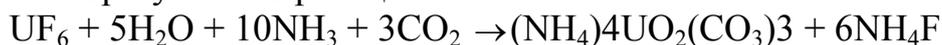


Рис. 11. Аппаратурная (АУК) схема получения таблетированного топлива

1 — испарение гексафторида урана; 2 — осаждение трикарбонатоуранилата аммония; 3 — фильтр; 4 — печь кипящего слоя; 5 — вращающийся смеситель; 6 — пресс; 7 — печь для спекания; 8 — шлифование таблеток.

Гексафторид урана поставляют из США в баллонах диаметром 76,2 см (до середины 1966 г. поставляли в баллонах диаметром 30,5 см). В каждом баллоне содержится до 1,5 т урана. Баллон присоединяют к аппарату, в котором ведут одновременно гидролиз UF_6 и осаждение его в виде трикарбонатоуранилата аммония. Баллон нагревают паром по заданной программе. Испаряющийся UF_6 поступает в аппарат для гидролиза через специальное устройство форсуночного типа (см. рис.11). В этот же аппарат подают газообразный аммиак и углекислый газ. Трикарбонатоуранилат аммония образуется по реакции:



Очень важно поддерживать рН раствора в сравнительно узком диапазоне (7,8–8,6). Хотя качество осадка мало зависит от рН раствора, этот рН следует выдерживать во избежание вспенивания суспензии при повышении температуры. Поддержание рН в заданном интервале — достаточно простая задача вследствие буферности системы «карбонат аммония — фторид аммония». Обычно на практике условную концентрацию урана в пульпе поддерживают на уровне 200—250 г/л. Концентрация растворенного урана не превышает 200 мг/л; температуру в реакторе

поддерживают в пределах 313—338 К. В зависимости от аппаратурного оформления процесс может быть осуществлен как в периодическом, так и в непрерывном режиме.

Технология производства таблеток из диоксида урана

Таблетки из UO_2 являются одной из основных составляющих ТВЭЛОВ, в значительной степени определяющих их работоспособность, поэтому к ним предъявляются довольно жесткие требования по многим параметрам:

- плотность (10,4–10,7 г/см³);
- геометрия (геометрия таблеток должна обеспечивать зазор 130–150 мкм между таблетками и оболочкой);
- внешний вид (таблетки должны быть без сколов и трещин);
- термическая стабильность (таблетки не должны спекаться при выводе реактора на номинальную мощность);
- микроструктура (размер и форма зерна, количество и крупность пор).

Технологии производства таблеток из двуокиси урана схожи для различных производств и технологических цепочек (АДУ и АУК в частности). Это один из наиболее сложных, важных и ответственных этапов производства ТВЭЛОВ. Он включает большое количество технологических стадий.

1.1.2. Подготовка пресспорошка

Пресспорошок – это порошок на основе UO_2 , обладающий заданными физико-химическими свойствами. Он является сырьем для прессования «сырых» таблеток, последующего их спекания и получения ядерного керамического топлива. В частности, для приготовления таблеток необходимо чтобы порошок обладал свободной текучестью. Этого добиваются путем приготовления смесей. Например, смешивается диоксид урана, сухая связка (стеарат цинка) и мягкий порообразователь (U_3O_8) в определенных пропорциях. Приготовление пресспорошка производится в два этапа. В биконический контейнер загружается смесь диоксида урана с высоким содержанием стеарата цинка, так называемая «богатая» смесь. Этот контейнер устанавливается на смесительный станок, на котором производится тщательное перемешивание исходных компонентов до получения качественной однородной смеси. Далее в контейнер добавляется диоксид урана до концентрации стеарата цинка 0,2–0,6 % и производится смешивание всей партии.

1.1.3. Прессование таблеток

Контейнер с пресспорошком кран-балкой устанавливается на устройство загрузки пресса. Пресспорошок поступает в загрузочную камеру

роторного пресса. Производится прессование таблеток. Полученные таблетки выгружаются из пресса в молибденовые лодочки объемом 13 л, установленные в боксе. Производится контроль плотности отпрессованных таблеток гамма-адсорбционным методом. Заполненные лодочки из бокса через герметичный узел перегружаются в закрытую транспортную тележку (две лодочки в одну тележку) и транспортируются к высокотемпературной печи спекания таблеток.

1.1.4. Спекание таблеток

Спекание проводится в печи туннельного типа. Лодочки устанавливаются на шагающую балку, которая загружает их в печь. Печь состоит из четырех секций.

Первая секция предназначена для удаления связующих компонентов. В ней расположены первые три зоны рабочей камеры, в которых происходит нагрев сырья. В стенах этой секции находится нихромовые шторные нагревательные элементы, которые поднимают температуру до 600°C . Горячая водородная атмосфера, которая движется из следующих секций, обволакивает влажные таблетки. Влага при этом испаряется и удаляется из системы через трубы дожигания вместе с водородом и газообразными примесями, которые таким образом уничтожаются безопасным способом в пламени газа наверху печи.

Во второй секции проводится предварительный нагрев таблеток. Эта секция состоит из зон 4 и 5, в которых происходит разогрев таблеток молибденовыми байонетными нагревателями. Температура секции достигает $(900 \div 1200)^{\circ}\text{C}$.

Третья секция предназначена для высокотемпературной обработки. Она состоит из зон 6,7 и 8, в которых в действительности происходит спекание вещества по мере того, как оно движется вдоль механизма шагающей балки. Молибденовые байонетные нагреватели в зонах 6, 7 и 8 поднимают температуру до 1780°C . К тому времени, когда таблетки топлива выходят из зоны 8 и переходят в выходной вестибюль, таблетки оксида урана уже очищены до требуемого уровня. В этом выходном вестибюле находится 4 отверстия для подачи рабочего газа.

Четвертая - секция охлаждения/выхода. Она представляет собой гигантский теплообменник. К внешней стене камеры прикреплены стальные змеевики, в которых циркулирует вода.

После спекания лодочки со спеченными таблетками подаются к шлифовальному станку.

1.1.5. Шлифование таблеток

Таблетки подаются в рабочую зону полуавтомата круглошлифовального бесцентрового, где шлифуются в размер по диаметру. В качестве охлаждающей жидкости при шлифовании используется дистиллированная вода.

При мокром шлифовании обеспечивается более мягкий режим обработки поверхности таблетки, следствием чего является лучшее качество поверхности, меньшее количество сколов, запыленность таблеток пренебрежимо мала.

Прошлифованные таблетки моются под струей дистиллированной воды и загружаются в перфорированные нержавеющей стали лодочки объемом 6 л, установленные в боксе и оттуда по рольгангу поступают в печь сушки таблеток.

1.1.6. Сушка таблеток

Сушка таблеток производится в среде азота при температуре до 300°C. После выхода из печи таблетки подвергаются контролю в аналитической лаборатории на содержание водорода. До получения результатов анализа таблетки в лодочках хранятся в транспортных тележках. Если обнаружены отклонения от установленных требований, то таблетки возвращаются на повторную сушку в печь.

Контроль готовых таблеток. Заключительным этапом производства таблеток твэлов является 100% контроль их качества. Контроль проводится по содержанию урана и примесей, плотности и геометрии таблеток, внешнему виду, термической стабильности, содержанию остаточных газов.

При получении положительного результата таблетки или сразу направляют на снаряжение твэлов или упаковывают в специальную тару для временного хранения на складе готовой продукции.

Таблетки расфасовываются по контейнерам, контейнеры маркируются и отправляются в отдел, где снаряжают ядерные стержни. Белый цилиндр на контейнере – это чип в котором есть вся информация о содержимом контейнера (кол-во таблеток, масса, дата выпуска и т.п.), вся эта информация уже передана в производственное задание станка для снаряжения стержня, если вдруг информация с чипа и информация станка не совпадет, то работа станка автоматически остановится.

1.2. Подготовка трубчатых оболочек твэлов

Оболочки твэлов находятся в сложных условиях эксплуатации. Они подвергаются тепловому, химическому и механическому воздействию. *Основные требования, предъявляемые к оболочке:* высокая теплопроводность; коррозионная и эрозионная стойкость в теплоносителе и в контакте с ядерным топливом; стабильность формы и размеров во время эксплуатации; минимальный паразитный захват нейтронов; технологичность; по возможности низкая стоимость. *По геометрической форме оболочки твэл могут быть классифицированы на:* а) трубы с прямыми ребрами; б) гладкие трубы; в) трубы со спиральными ребрами; г) сферы; д) пластины. Наибольшее распространение, в энергетических аппаратах, получили оболочки трубчатого типа изготавливаемые из сплавов циркония и нержавеющей стали.

Оболочка в виде гладкой тонкостенной бесшовной трубы.

Получение тонкостенных бесшовных труб из сплавов циркония являются наиболее специфичными. Процесс изготовления тонкостенных труб характеризуется высокими техническими требованиями к качеству металла (по химическому составу, содержанию примесей и включений), к допускам на геометрические размеры труб. Заготовками служат прутки, полученные прессованием, а также просверленные стержни. Для защиты от окисления при волочении стержень помещают в герметичную металлическую оболочку (материал – медь или мягкая сталь) и процесс ведут со смазкой на графитовой основе. Получающаяся защитная оболочка препятствует одновременно соприкосновению циркония с инструментом, и таким образом не допускается истирание инструмента и растрескивание поверхности трубы. Трубчатые оболочки твэлов из циркониевых сплавов можно получать прессованием при температурах 650-1000⁰С и скоростью Пуассона до 500 мм/сек. Однако для большего уменьшения толщины стенок трубчатых оболочек твэлов за один проход с целью повышения производительности рекомендуется применять холодную прокатку. В отличие от волочения при этом способе не возникает напряжения растяжения, снижающего деформируемость материала. Правильный выбор режимов прокатки позволяет за один проход уменьшить сечение на 80%.

Большое значение при изготовлении трубчатых твэл имеет контроль качества оболочки твэлов малого диаметра (~10 мм). Контроль внутренней поверхности оболочек твэлов малого диаметра осуществляется методом реплик (отпечатков), получаемых с помощью поливинилхлоридной трубки, вставляемой внутрь оболочки с гарантированным зазором (рис. 12). В открытый конец трубки подают аргон под давлением, которое поддерживают в течение всего процесса снятия реплики. Втулки из фторопласта предотвращают деформацию трубки на концах. Затем центральную часть трубки подогревают горелкой, постепенно повышая температуру до 145⁰С. При разогреве трубки под действием внутреннего давления происходит вдавливание во все неровности внутренней поверхности оболочки размягченного поливинилхлорида. После охлаждения давление снижают и поливинилхлоридную трубку извлекают. Поливинилхлорид восстанавливает после извлечения полученную реплику, которую рассматривают на оптическом или электронном микроскопе. Этот метод позволяет получить отпечатки для оболочек с внутренним диаметром от 1,5 мм.

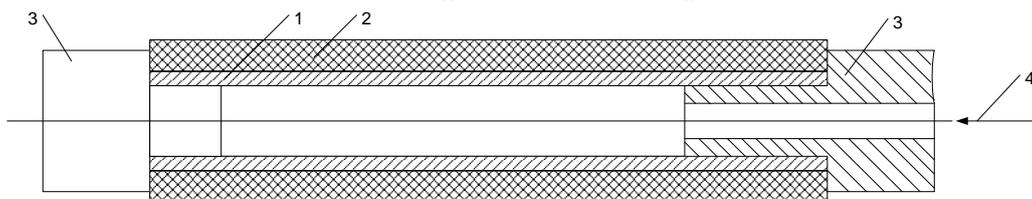


Рис. 12. Схема получения реплик с внутренней поверхности оболочек твэлов
1 – трубка из поливинилхлорида; 2- контролируемая оболочка; 3 втулки из фторопласта; 4 – подача аргона под давлением.

Тонкостенные трубы для оболочек ТВЭЛ применяемых в отечественных энергетических реакторах изготавливают по следующей схеме:

- заготовка под прессование;
- нагрев и горячее прессование;
- подготовка гиль под холодную прокатку (удаление окалины, обрезка концов, разрезка «в размер»);
- холодная прокатка на трубных станках;
- отделочные операции: травление с доведением до заданного размера по диаметру, промежуточный и окончательный отжиг. Отправление и приемка ОТК с контрольными обмерами диаметров, толщины стенок, кривизны; перископический контроль внутренней поверхности и поверхностных дефектов.

1.3. Snаряжение твэл топливом

Возможны два вида конструкций твэлов с диоксидом урана:

1. контейнерный, в котором топливный сердечник в виде столба из таблеток или стерженьков спрессованной и спеченной двуокиси урана помещают с некоторым зазором в трубу из материала оболочки;

2. монолитный, в котором в трубку засыпают порошок высокоплотной предварительно спеченной и затем размолотой двуокиси урана с последующим уплотнением различными методами.

Практическое применение в основном получили твэлы контейнерного типа. На рис. 13 представлен твэл реактора ВВЭР-1000. Особенности стержневых твэл контейнерного типа являются: радиальный зазор между топливом и оболочкой; свободный объем для сбора газообразных продуктов деления; оболочка, устойчивая по отношению к наружному давлению теплоносителя.

1.3.1. Технология сборки твэл с гарантированным зазором

Соединение сердечника с оболочкой должно предохранять ядерное топливо от коррозии при соприкосновении его с охлаждающей средой, задерживать продукты деления, препятствовать короблению сердечников во время эксплуатации (под облучением) и обеспечить относительно высокую теплопередачу от топливного элемента к охлаждающей среде.

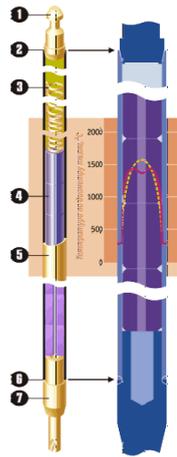


Рис. 13 Твэл реактора ВВЭР-1000

1 топливный сердечник; 2 фиксатор топлива; 3 трубчатая оболочка; 4 нижняя концевая заглушка; 5 верхняя концевая заглушка; 6 нижний сварочный шов; 7 верхний сварочный шов.

сборке Только в некоторых случаях можно получить вполне законченный твэл, который без дополнительной обработки может быть использован непосредственно при сборке. Чаще требуется дополнительная обработка, связанная с концевой заделкой (герметизацией) твэлов.

Герметизация твэл заключается в их сборке с концевыми пробками (заглушками). Сборку концевой пробки с оболочкой твэла выполняют различными методами. Выбор того или иного метода определяется конструктивным оформлением собираемых деталей и их материалом. Наиболее распространенным способом герметизации твэл является дуговая сварка в защитной атмосфере с использованием нерасходуемого электрода. Применяется также дуговая сварка в защитной атмосфере с использованием расходуемого электрода, сварка электронным пучком, ультразвуком и трением.

1.3.2. Контроль качества твэлов

К качеству твэлов, используемых в реакторе, предъявляются очень жесткие требования. Твэлы энергетических аппаратов должны быть тщательно обследованы и испытаны до установки, чтобы обеспечить правильную работу реактора, его безопасность и экономичность. Существует много методов испытаний твэлов перед их сборкой в ТВС. Каждый из этих методов выявляет определенные типы дефектов. Поэтому все существующие методы должны не заменять, а взаимно дополнять друг друга.

Дефекты, обнаружение которых является целью испытаний можно разделить на три группы:

1. первичные дефекты, возникшие в процессе производства сырьевого материала. К ним относятся изменения химического состава, поверхностные и внутренние трещины;

Зазор между сердечником и оболочкой заполняют жидким натрием, сплавом натрия с калием, расплавом металла или гелием. При сборке некоторых сердечников с оболочкой зазор не выдерживается с жестким допуском. Установлено, что возможны большие колебания радиального зазора между стержнем из UO_2 оболочкой, так как температура поверхности сердечника при исходном диаметре зазора 0,4 мм не более чем на $100^{\circ}C$ выше, чем в образцах с зазором диаметром 0,12 мм.

Герметизация твэлов при

2. дефекты, обусловленные технологическим процессом изготовления реакторных деталей (получение заготовки, механическая обработка и термообработка). К этим дефектам относятся: пористость, разрывы, трещины;

3. дефекты, возникшие при сборочных операциях: отсутствие сцепления между оболочкой и топливным сердечником, пористость, непровары в сварных швах.

1.4. Сборка твэл в ТВС

Для сборки ТВС используют неразъемные и разъемные соединения. Неразъемные соединения получают сваркой и пайкой, разъемные – креплением болтами, штифтами. На рис.13 показана ТВС реактора ВВЭР-1000 в сборе.

Способ соединения твэл в ТВС выбирается с учетом многих факторов: рабочей температуры внутри активной зоны, коррозионного действия теплоносителя на оболочки твэл в реакторе, влияние на твэлы облучения потоком нейтронов, конструкции, формы и конфигурации самих твэл. Соединение элементов посредством сварки, пайки или крепежа должно быть надежным.

1.4.1. Технологические методы сборки неразъемных соединений

Сварка и пайка – два основных процесса, применяемых в настоящее время для объединения твэл в сборки. Основной особенностью технологии сварки и пайки изделий, предназначенных для использования в ядерных реакторах, является учет ядерных свойств выбираемых припоев и присадочных материалов; при этом необходимо, чтобы сечения захвата нейтронов ядрами материалов, применяемых при пайке и сварке, удовлетворяли соответствующим требованиям.



Рис. 14. ТВС реактора ВВЭР-1000

Сварка: по соображениям прочности, жесткости и устойчивости при сборке ТВС сварка предпочтительнее. Сваркой в этом случае соединяют по существу только оболочки твэл. Наличие примесей в сварном шве нежелательно из-за регламентированных условий температуры, коррозии, радиации, действию которых подвержены части активной зоны реактора. Поэтому в большинстве случаев сварка твэл должна производиться в вакууме и в инертных средах. Сварку осуществляют дуговым методом в атмосфере инертного газа (аргона). Материалом электрода служит вольфрам. Для сварки циркония и его сплавов абсолютно исключен контакт нагретого металла с воздухом. Поэтому при сварке в инертном газе необходима надежная защита.

Пайка: паяные соединения не так прочны, как сварные, и применяются в конструкциях твэл только там, где сварка невозможна. При сборке многих блоков твэл сварка не может быть применена из-за сложности их конструкции и конфигурации. Сварка также может привести к короблению тонких секций или длинных стержней, пластин. Если конструкция твэлов не обеспечивает достаточной для сварки толщины слоя покрытия без прожога последнего, необходимо применять пайку. Различают пайку в печи и глубокую. Пайка в печи отличается высокой производительностью и характеризуется регулированием режимов для достижения заданного качества паяных соединений. Глубокая пайка дает возможность отводить тепло внутрь сложных тонкостенных блоков без перегрева их внешних поверхностей.

1.4.2. Технологические методы сборки разъемных соединений

Разъемные соединения твэлов выполняют креплением болтами, штифтами, зажимами. Однако во время сборки или после нее может потребоваться значительная механическая обработка твэлов. Для обеспечения плотных соединений между отдельными частями и сведения к минимуму возможности возникновения вибрации должны быть установлены жесткие допуски на размеры собираемых деталей и точность выполнения замыкающего звена при сборке. Другая трудность, которую необходимо учитывать при объединении твэл в сборки, состоит в том, что в местах стыковки отдельных частей может развиваться коррозия при эксплуатации в реакторе. Это еще одно обстоятельство, которое заставляет устанавливать жесткие допуски на разъемные соединения, приводящие к повышению стоимости сборки. Кроме того, необходимо применять болты, винты, штифты и зажимы из очень чистых, специальных материалов с возможно

меньшим сечением поглощения тепловых нейтронов, что также увеличивает стоимость сборки.

1.5. Безопасность при производстве твэлов и ТВС

При производстве твэлов и ТВС необходимо обеспечить требования ядерной и радиационной безопасности. Столь сложное производство может быть осуществлено лишь на заводе, где применяются в максимальной мере высококомеханизированные, а на многих операциях дистанционно управляемые и автоматизированные процессы (включая контроль) массового производства, гарантирующее высокое качество и стабильность каждой технологической операции и соответственно каждого выпускаемого изделия.

Завод по производству твэлов имеет жидкие и газообразные отходы, содержащие следующие нуклиды: U^{234} , U^{235} , U^{238} и Th^{234} . Данные по радиоактивным выбросам при производстве твэл сведены в таблице приведенной ниже.

Таблица 1.

Активность отходов при изготовлении топлива Бк [ГВт (эл.)*год]

Источник	Радионуклид	Газообразные отходы	Жидкие отходы
Завод по производству твэл	Th^{234}	$3,7 \cdot 10^6$	$8,9 \cdot 10^8$
	U^{234}	$3,0 \cdot 10^7$	$7,4 \cdot 10^9$
	U^{235}	$8,5 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^8$
	U^{238}	$3,7 \cdot 10^6$	$8,9 \cdot 10^8$

Промышленное производство энергетического топлива усложняется тем, что уран является одновременно и радиоактивным, и химически токсичным веществом. Кроме того, необходимо применять меры предосторожности против случайного возникновения ядерных цепных реакций. На практике контроль над безопасностью осуществляется дозиметрической службой и службой ядерной безопасности. Однако применительно к химическим и металлургическим процессам эти службы имеют много общих черт. К тому же высокая стоимость энергетического топлива вызывает необходимость жесткого материального контроля в процессе производства. Чтобы определять предусмотренные и неучтенные потери уранового топлива, снимают количественный материальный баланс не только при регулярных поставках урана от одной установки к другой, но даже при движении урана по стадиям одного процесса.