

ИГНАТЬЕВ П.П.



Энергия- ЭТО САМА ЖИЗНЬ

К 65-ЛЕТИЮ ОАО «НОВОСИБИРСКИЙ
ЗАВОД ХИМКОНЦЕНТРАТОВ»



НОВОСИБИРСК 2013

Игнатъев Пётр Поликарпович

Энергия – это сама жизнь

Новосибирск, 2013, – 87 стр.; 65 иллюстр.

Предисловие: Локтев И.И.

Дизайн макета и вёрстка, обработка

фото и иллюстраций: Демидов В.А.

Обложка: Демидов В.А.

Корректор: Аралова А.В.

Общая редакция: прессслужба

ОАО «НЗХК»

В книге использованы иллюстрации автора

и фотографии из собрания музея завода,

заводской газеты «Вперёд», а также

рекламно-информационных изданий

ОАО «НЗХК»

Книга издана к 65-летию ОАО «Новосибирский

завод химконцентратов»

Содержание

Предисловие	Чудес не бывает Игорь ЛОКТЕВ.	4
Вступление	Энергия – это сама жизнь	6
	Условная экскурсия в микромир атома	9
Глава I	Промышленные уран-графитовые реакторы	13
Глава II	Урановое производство НЗХК	16
	Извлечение из руд и глубокая химическая очистка урана	16
	Тонкая химическая технология	17
	Металлургия урана	18
	Рафинирование металла и выплавка сплавов	20
	Термомеханическая обработка урана.	23
	Токарная и гальваническая обработка	25
	Подготовка защитной оболочки	27
	Герметизация тепловыделяющих элементов	28
	Финишная обработка и контроль готовой продукции	29
Глава III	Водо-водяные энергетические реакторы ВВЭР-1000	32
	Ядерное топливо реактора «ВВЭР-1000»	37
	Подготовка топливной составляющей твэлов	39
	Сборка и герметизация твэлов	41
	Компоновка тепловыделяющей сборки	46
Глава IV	Исследовательские атомные реакторы	52
	Производство топливной металлокерамики	55
	Изготовление трехслойных трубчатых твэлов	58
	Тепловыделяющие кассеты.	64
	Некоторые проблемы и перспектива	66
Глава V	Литий в ядерной энергетике	72

Чудес не бывает

Пётр Поликарпович Игнатьев проработал на заводе 47 лет, 30 из них – в центральной научно-исследовательской лаборатории. В 1972 году сменил на посту начальника НИЛ Георгия Яковлевича Сальмана. Прежде чем стать начальником, он уже имел богатый производственный опыт – ещё работая в основном цехе, он занялся исследованиями и стал кандидатом наук. Сальман не мог не оказать на него влияния, как потом Игнатьев не мог не вызвать в нас, молодых специалистах, желания быть похожим на него. Хотя сам Пётр Поликарпович явно или непроизвольно копировал Курчатова. Он и был во многом похож на него – высокий, неторопливый, курил трубку, умел видеть во всём главное. Однажды, когда в цехе занимались планировкой и благоустройством прилегающей территории, он предложил поступить как Курчатов – размечать дорожки после того, как их протопчут люди.

Игнатьев сочетал в себе одновременно простоту общения и неординарность, мягкость и дружелюбие в отношении с подчинёнными и высокую требовательность к их работе, был немногословным, но всё, что он говорил, имело глубокий смысл. В движениях был медлительным, не суетился, всегда был спокоен и рассудителен. Однако всё успевал делать. Каждую неделю проводил совещания в лабораториях, дважды в месяц готовил директорскую диспетчерскую. Получалось, что каждый инженер периодически отчитывался по работе начальнику цеха и директору завода.

Казалось, для Игнатьева всё было ясным. Он обсуждал ход работ, давал советы. «Чудес не бывает», – любил он говорить. «Сложности бывают видимыми, начнёшь разбираться, всё становится понятно», – размышлял

он над причинами брака. Практически так всё и было. Зам. главного инженера завода Пётр Иванович Лавренюк, уже имеющий опыт работы с НИЛОм, сказал однажды при появлении очередной проблемы: «Ну, НИЛ конечно во всём разберётся, только дайте ему время».

Пётр Поликарпович как бы жил сразу набело, без черновиков. Он и обходился без них. Когда мы, молодые специалисты, приходили к нему, чтобы подписать рукописный отчёт о НИР в печать, он нам исписывал целые страницы своим чётким и ясным почерком без помарок, внося своё видение в данный вопрос. При этом текст выглядел так, как будто его переписали не один раз, только некоторые слова были аккуратно зачёркнуты и написаны другие.

Для любого начальника цеха важно разбираться в технике и технологии, уметь управлять людьми. Руководитель НИЛа должен был быть ещё и учёным. Игнатьеву удавалось на заводе представлять Науку, а вне завода – Производство, сочетать в организационном и практическом плане эти составляющие технического прогресса. По всем производствам, существующим на заводе, в любой момент надо было уметь ответить на самый неожиданный вопрос. Впрочем, вопросы иногда были и не связанные прямо с действующим производством. Однажды во время совещания Игнатьеву позвонил директор и спросил, может ли он в НИЛе получить пищевую щавелевую кислоту. В другой раз его попросили сделать особо чистые урановые стержни. А однажды НИЛ заставили сделать действующий химический источник тока с катодной массой из закиси-оксида урана. Спрашивать, зачем всё это нужно, тогда было не этично.

По натуре Пётр Поликарпович

был закрытым человеком, не обсуждал посторонние темы, не любил кампаний, возможно, потому, что основным смыслом в его жизни были наука и производство. Однажды он в сердцах высказался: «Половина страны поёт и пляшет», – в смысле, бездельничают. На своё пятидесятилетие он отправился в турне по северному морскому пути, но поздравительная телеграмма от цеха нашла его и там.

Будучи уже много лет начальником цеха, Игнатъев оставался инженером, учёным. Широкий профиль работ НИЛа и новая продукция за-

ставлял постоянно пополнять знания. Персональных компьютеров не было, и к любому публичному выступлению приходилось вручную готовить демонстрационный материал. Часто Поликарпыч этим занимался сам в своей чёткой основательной манере. Когда по состоянию здоровья он не смог дальше быть начальником НИЛа и ушёл работать в ПТО, он показал, что может многое сделать индивидуально, работая просто инженером, благодаря своей работоспособности, склонности к аналитике, глубоким знаниям.

Игорь ЛОКТЕВ

Энергия – это сама жизнь

Основу любого естественного процесса, явления или сознательного действия составляет энергия в каком-либо виде своего проявления. Процесс генерации и трансформации энергии в природе носит непрерывный стихийный характер, возникая и развиваясь естественным образом. В человеческом обществе он принимает, по возможности, определенный, управляемый и регулируемый характер.

Как в стихийном, так и в цивилизованном варианте, любой из известных видов энергии совершает равнозначно и созидательную, и разрушительную работу. Природные энергетические явления по своей силе и мощности многократно превосходят искусственные работы. Человек почти не знает способов прямого преобразования стихийной энергии в управляемую форму, а использует, в основном, ту ее часть, которая аккумулирована природой посредством развития органических процессов в углеводородах.

Всего ничтожная доля непрерывного природного энергетического потока поступает в среду нашего обитания через гидроэнергию и пищу. Приток энергии к Земле от Солнца в десятки тысяч раз превосходит текущую добычу и потребление энергоресурсов всего цивилизованного Мира. Очень легко и просто подсчитать, что на образование тучки для легкого летнего дождя природа расходует столько же тепловой энергии, сколько выделяется при взрыве атомной бомбы. Но даже та весьма ограниченная часть энергии, которая извлекается из природного оборота, требует колоссального труда и огромных усилий в борьбе за существование растительного и животного мира.

Сравнительно недавно, в сере-

дине двадцатого века, для нужд человека открылась новая кладовая энергии атомного ядра. Благодаря умеренной радиации, уран получил прочный статус ядерного топлива в атомной энергетике всего современного мира.

К концу прошлого столетия доля атомной электроэнергии, произведенной на АЭС, составляла в среднем около 17 процентов от общего объема, а по отдельным странам достигала 35, 50 и даже 75 процентов.

В составе атомной энергетической отрасли России функционирует «Корпорация ТВЭЛ» - производитель и поставщик ядерного топлива для атомных электростанций, силовых установок и ряда других преобразователей энергии.

В 2006 году Корпорация отметила свой десятилетний юбилей изданием монографии под собственным наименованием, посвященной итогам текущей деятельности и перспективам предстоящего развития. Одновременно, ежемесячный журнал атомной энергетики России «Росэнергоатом» посвятил данному событию специальный выпуск.

На сегодняшний день, Корпорация объединяет и регламентирует деятельность десятка промышленных предприятий с обобщенным поэтическим наименованием «Алмазы в короне ТВЭЛа». К числу этих драгоценных камней отнесен и «Новосибирский завод химконцентратов» с его полувековой биографией. Проведенная параллель с драгоценными камнями не лишена основания, поскольку действительная деятельность промышленных предприятий многогранна, а в ряде случаев блистательно яркая и радужная.

Основу практической деятельности Корпорации составляет переработка обширной группы редких

металлов и создание на их основе технических средств жизненного обеспечения, традиционным потребителем которых является атомная энергетика.

В современной практической атомной энергетике реальным природным источником энергии является уран, а именно его легкий изотоп - уран-235. К числу изученных и апробированных веществ аналогичного назначения относятся некоторые изотопы водорода и лития, которые можно рассматривать как резервный потенциал ближайшего будущего. В группу перспективных источников входит также целый ряд искусственных изотопов, таких как плутоний, уран-233 и сверхтяжелый водород – тритий.

Атомная энергетика, как и многие другие достижения человечества, начиналась с решения военных проблем. Соединенные Штаты Америки, используя новейшие научные достижения практически всего современного мира, завершили в 1945 году программу создания атомной бомбы, так называемый «Манхэттенский проект».

Как результат этого выдающегося труда, через два месяца после исторической победы над гитлеровской Германией, в Америке прогремел первый атомный взрыв плутониевой бомбы с эквивалентной мощностью в 20 тысяч тонн тринитротолуола. А не более чем через месяц после этого события еще два атомных заряда из урана и плутония прогремели над японскими городами Хиросимой и Нагасаки.

По определенному стечению обстоятельств приведенные сроки зловещих американских экспериментов стали датой рождения атомной промышленности нашей страны. История становления и развития новой отрасли, особенно в первые годы, была глубоко засекречена и отдельные «белые» пятна того времени сохраняются до сих пор.

Несомненным остается факт, что

всего через четыре года от даты рождения была создана и испытана отечественная советская плутониевая бомба.

Тогда на базе полученных и успешно апробированных научных достижений начала динамично развиваться новая отрасль человеческой деятельности – атомная энергетика и промышленность. В качестве основных энергоносителей получили равноправное признание, как уран-235, так и плутоний-239. Поэтому многие и организационные и технические проблемы решались практически по двум параллельным направлениям.

Одно из них включало создание промышленного цикла производства плутония путем нейтронного облучения природного металлического урана в атомных реакторах с графитовым замедлителем.

Второе направление предусматривало разделение природных изотопов урана с получением материала, обогащенного по урану-235 от исходных 0,715 процентов до более высоких концентраций, практически от 2-х до 90 процентов.

Такую раздвоенность можно объяснить индивидуальностью свойств каждого из энергоносителей, хотя по энергетической емкости уран и плутоний практически равны между собой и выделяют по 200 мегаэлектронвольт энергии на единичный акт деления ядра. Это очень большая величина, которая в переводе на единицы теплотехники соответствует нескольким десяткам миллионов килокалорий на грамм, что превосходит привычные тепловые эффекты горения органического топлива в миллионы раз.

В популярной литературе по физике можно встретить сравнительные данные о том, что один грамм разделившегося урана по количеству тепла заменяет две тонны нефти или три тысячи кубометров природного газа. И в этом нет никакого преувеличения.

Плутоний относится к разряду веществ с весьма высокой радиационной активностью альфа и гамма излучений. Он представляет серьезную биологическую опасность и работать с ним можно только при наличии гарантированных средств биологической защиты, дистанционного манипулирования и управления.

В число признаков практического превосходства плутония перед ураном входит его относительно низкая критическая масса, что позволяет создавать атомное оружие с большой мощностью взрыва при умеренном весе и габаритных размерах. Это весьма важные характеристики оружия, так как они определяют стратегические и тактические возможности, такие как ударная сила, дальность полета, средства транспортировки к цели, маневренность, маскировка и так далее.

Очевидно поэтому, плутоний прочно обосновался в оружейной сфере, а в силу высокой радиационной активности пока не нашел места в мирной атомной энергетике.

В отличие от плутония, уран можно относить к умеренно радиоактивным веществам. Уровень его радиационной активности почти в тридцать тысяч раз ниже, и при соблюдении элементарных правил промышленной гигиены и санитарии не наносит значительного ущерба человеческому организму. Для гарантированной безопасности при работе с ураном всех степеней обогащения вполне достаточно наличия остекленных боксов, индивидуальных средств защиты органов дыхания и кожного покрова, удобной рабочей одежды, а главное высокой дисциплины и аккуратности в работе.

Благоприятные свойства урана в сочетании с высоким уровнем организации производства позволили Новосибирскому заводу химконцентратов успешно работать в черте миллионного города без инци-

дентов и проявлений радиофобии на протяжении шести десятилетий со значительными объемами урана любой степени обогащения.

В первоначальный период, после создания и испытания отечественного ядерного оружия, приоритетное развитие обрела оборонная сфера, в силу создавшейся обстановки международного противостояния. Это развитие носило форму комплексного государственного плана, предусматривающего выполнение в сжатые сроки колоссальных объемов организационной и технической работы. Планы того времени включали фундаментальные и прикладные исследования и научные разработки, изыскательские работы, проектирование, строительство и оснащение рудников, заводов и целых городов в различных районах огромного государства и даже за его пределами.

С огромным напряжением велись интенсивные поиски и разработки рудных месторождений урана в большинстве союзных республик бывшего СССР и почти во всех «освобожденных» странах восточной Европы. Ускоренными темпами строились обогатительные фабрики и химико-металлургические заводы с полным циклом переработки урана. Создавались фантастические по размерам и потребляемой мощности промышленные каскады изотопного обогащения. Строились мощные уран-графитовые атомные реакторы для наработки плутония и радиохимические заводы для его извлечения и глубокой очистки от примесей. Создавались научные основы и производственные мощности по получению и обработке конструкционных материалов, химических элементов и веществ вспомогательного назначения, таких, как кальций, бериллий, ниобий, тантал, алюминий и много другого. Естественно, что была создана и сама весьма совершенная база по изготовлению ядерного оружия.

Следом за развитием основных промышленных комплексов и городов возникла, разрасталась и укрупнялась сфера вспомогательных и обслуживающих систем жизненно-го обеспечения.

В этой бурлящей круговерти сформировался и вырос Новосибирский завод химконцентратов (НЗХК), возник огромный жилой район города «Красная горка» или официально Калининский район.

В первоначальном профильном варианте нынешний НЗХК следовало бы называть «Урановым заводом». Но по условиям того времени подобные слова были глубоко засекречены и категорически запрещены, а их озвучивание могло привести в «места не столь отдаленные»: в Норильск, в Магадан или в другое подобное место.

Завод представлял промышленный комплекс переработки урана с полным технологическим циклом от руды до готовых изделий – тепло-выделяющих элементов активной зоны атомного реактора (твэлов).

Тепловыделяющие элементы первых поколений представляли простейшую конструкцию, составленную всего из двух деталей: ци-

линдрического уранового стержня-сердечника (не путать с людьми страдающими сердцем), заключенного в тонкостенную, герметичную оболочку из алюминия. Внешний диаметр оболочки составляет 36–38 мм, а высота твэла около 100 мм. На первый взгляд кажется, что проще не бывает. Но фактические физико-механические процессы в тепло-выделяющем элементе настолько сложны, загадочны и многогранны, что их трудно как описывать, так и воспринимать.

Условная экскурсия в микромир атома

В соответствии с законами природы, легкий изотоп уран-235 обладает способностью самопроизвольного деления атомного ядра. Независимо ни от каких внешних условий или воздействий, в любом фрагменте природного урана идет процесс так называемого спонтанного (самопроизвольного) деления.

В любом кусочке металлического урана, его химического соединения, как твердого, так и растворенного, идет непрерывный процесс радиоактивного распада. Атомное

1

Панорама «Новосибирского завода химконцентратов» с птичьего полета



ядро урана методично выбрасывает альфа-частицы, ядра атома гелия, испуская при этом гамма-лучи. Радиоактивный распад идет по определенной последовательной трассе, на каждом этапе которой образуются продукты распада урана, то есть более легкие радиоактивные элементы периодической системы: торий, радий, радон, полоний, висмут и в завершение - свинец.

Параллельно и независимо от распада урана протекает процесс спонтанного деления его легкого изотопа урана-235. Это ядро делится на два осколочных, преимущественно радиоактивных изотопа, соответствующих элементам средней части периодической системы, в общей сложности до двухсот наименований.

В процессе деления появляются также две или три элементарных частицы – нейтрона. Нейтроны обладают значительной кинетической энергией и перемещаются с огромными скоростями. Когда урановый материал имеет незначительные объемы и массу, нейтроны быстро покидают материнскую среду обитания и «погибают» во внешнем пространстве, превращаясь в обычный водород. В среднем в одном грамме урана за один час совершается около 20 актов самопроизвольного деления, не вызывающего заметного внешнего воздействия.

Однако если в природной смеси изотопов искусственно повысить концентрацию урана-235 и постепенно увеличивать общую массу материала, можно реально создать условия, при которых значительная часть нейтронов спонтанного деления сохранится внутри данного материала. При этих условиях часть первичных нейтронов поглощается атомами урана-235 и вызывает их аналогичное, но теперь принудительное деление.

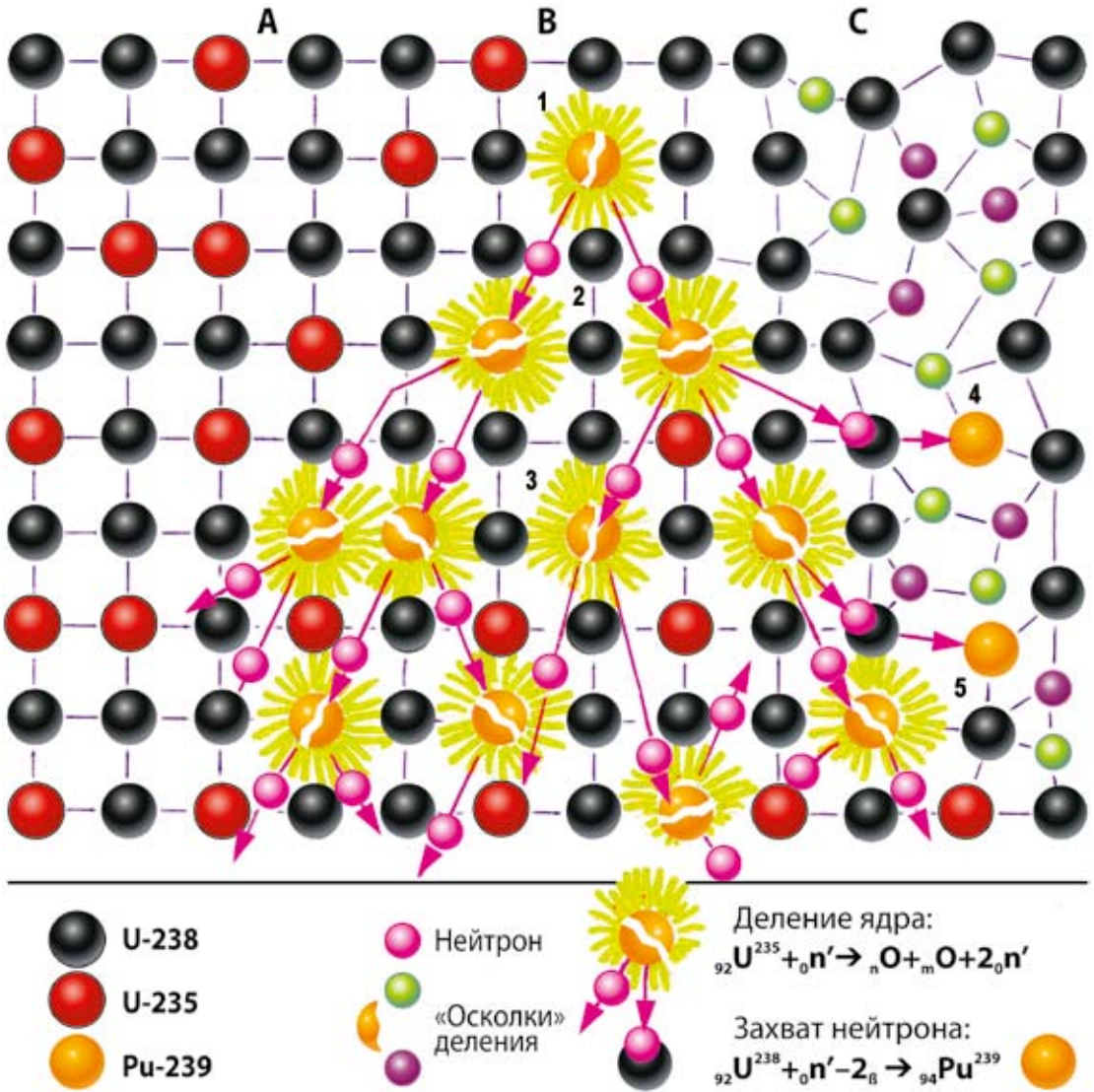
Проще и, возможно, понятнее представить эти явления в форме иллюстрации. На приведенном

схематичном рисунке №2 условно изображена структура металлического урана в виде правильной сетки, в узлах которой расположены атомы двух изотопов урана, зафиксированных межатомными силами. Условно эта область обозначена буквой «А». Такая организованная структура определяет и обеспечивает высокий уровень физико-механических характеристик материала. В таком состоянии металл обладает достаточно высокой прочностью и способностью выдерживать значительные внешние нагрузки без искажения своих размеров и потери формы.

Далее, гипотетически можно предположить, что один из атомов урана-235, условно расположенный на схеме в области «В» (точка 1), спонтанно разделится на два осколка и выбросил два свободных нейтрона.

Свободные нейтроны легко и просто поглощаются атомами многих элементов, и если они встречаются, как показано на рисунке, атомы урана-235, они вызывают вторичные акты деления ядра (точки 2) с образованием осколков и выбросом нейтронов. Далее процесс деления продолжается и развивается. Так, если при первичном акте деления освободилось два нейтрона, то во вторичном их может выделиться уже четыре, на следующей стадии (точки 3) восемь и так далее. Если учесть, что период данного процесса не превышает 0,2 секунды, то за одну секунду единичный акт спонтанного деления способен вызвать до 150-ти единичных актов ядерного деления. Так происходит расширение и стихийное развитие процесса.

Кинетическая энергия движения осколков деления и нейтронов по законам физики превращается в тепловую, что вызывает в начале локальный, а в итоге общий разогрев делящегося материала до весьма высоких температур за короткий промежуток времени.



Процесс деления способен вызывать существенные нарушения в структуре материала. Под ударами осколков деления и нейтронов нарушаются межатомные связи, смещаются атомы, искажается форма и геометрические параметры кристаллической решетки. В результате структурных изменений происходит потеря прочности и пластичности материала, а в целом искажаются размеры и форма изделий. Особенно четко эти последствия проявляются в металлическом ура-

не. Пример такого искажения приведен на рисунке №2 в области «С». Микроструктура облученного урана становится настолько хаотичной, что может образно сравниваться с теми уличными беспорядками, которые остаются после криминальных погромов на улицах некоторых городов в виде разбитых витрин, сожженных и искореженных автомобилей, разбросанных булыжников и бутылок. Избыточная часть нейтронов выполняет вполне определенную за-

Схема процесса ядерного деления.

2

дачу. Тяжелый изотоп уран-238 обладает способностью захватывать нейтроны без последующего деления. Атом урана, поглотивший нейтрон, через две ступени радиоактивного распада превращается в новый, самостоятельный химический элемент – плутоний-239 (точки 4 и 5).

Если гипотетически представить этот процесс масштабным, то самопроизвольное деление будет приводить к интенсивному спонтанному разогреву вещества, а в финале к его взрыву. Однако природа сама позаботилась о нашей безопасности и ограничила содержание делящегося изотопа в уране естественным барьером в 0,715 процента, оставив основную массу в виде неделящегося изотопа, урана-238. При таком природном изотопном составе эффект спонтанного деления практически незаметен.

Но человек самостоятельно научился обходить этот природный барьер путем искусственного обогащения урана делящимся изотопом с 0,715 до 90-95 процентов, и создавать возможность генерации тепловой энергии, а при желании осуществлять взрыв.

Создавая определенные условия, а именно собирая обогащенный уран воедино, достигают так называемую критическую массу. Под критической массой подразумевается такое количество вещества, при котором суммарный эффект спонтанного деления ядер становится значительным, способ-

ным поддерживать расширенное воспроизводство. Практически для формирования критической массы изготавливают и используют отдельные фрагменты из рабочего вещества.

Стихийное течение цепной реакции ядерного деления используется во взрывных устройствах. Для других технических целей эту реакцию необходимо вводить в режим управления, регулирования и затухания. Такие условия создаются путем определенного отбора из системы избыточной части нейтронов путем их поглощения. К числу весьма активных поглотителей нейтронов относятся бор, кадмий, литий и ряд металлов из группы редкоземельных элементов.

Вводя и выводя из объема критической массы регулирующее устройство, содержащее поглотитель нейтронов, можно четко регулировать процесс деления урана и сколь угодно долго поддерживать его в необходимом диапазоне развития. Такая управляемая цепная реакция лежит в основе бесчисленного множества энергетических систем с атомными реакторами.

Первые атомные реакторы Соединенных Штатов, Советского Союза, а затем и всех других ядерных держав, предназначались исключительно для решения одной задачи, а именно производства искусственного делящегося изотопа – плутония-239 путем нейтронной бомбардировки ядер урана-238.

Промышленные уран-графитовые реакторы

Для масштабного производства плутония используются уран-графитовые ядерные реакторы. По принятой терминологии это наименование означает, что рабочим веществом агрегата является металлический уран, а в качестве замедлителя нейтронов использован графит.

Конструктивно главный рабочий орган или «активная зона» представляет цилиндр диаметром около двенадцати и высотой порядка десяти метров, набранный из блоков искусственного графита. При таких габаритах масса графита составляет около двух тысяч тонн. Графитовая кладка пронизана системой сквозных вертикальных отверстий, расположенных по узлам прямоугольной сетки с определенными интервалами. В этих отверстиях размещены трубы, объединенные в верхней и нижней области коллекторами, соединенными с водоводами. Эта комбинация в целом представляет систему охлаждения активной зоны, включающей по две тысячи вертикальных труб в реакторах первого поколения и по три тысячи в последующих модификациях.

Определенная незначительная часть вертикальных труб предназначена для размещения в них датчиков средств контроля, рабочих органов систем управления и защиты реактора. Основная же группа, называемая технологическими каналами, служит для размещения топливных элементов. В каждом технологическом канале располагается в виде вертикального столба с радиальным кольцевым зазором до нескольких десятков твэлов.

В рабочем режиме, то есть при критическом состоянии активной зоны, под воздействием нейтронного потока твэлы генерируют

тепловую энергию, вызывающую саморазогрев урана. Тепловая энергия деления снимается потоком охлаждающей воды, движущимся сверху вниз по кольцевому зазору между стенкой трубы и оболочкой твэлов и выходящим по коллекторам на сброс.

Каждый тепловыделяющий элемент работает как генератор тепловой энергии мощностью до 20 киловатт. В этих условиях температура разогрева металла в его центральной части достигает 600-650 градусов, а тепловой поток через стенку защитной оболочки составляет до миллиона килокалорий на квадратный метр. Такая тепловая напряженность не встречается ни в одной современной тепловой машине.

Огромный перепад температуры по радиусу твэла и гигантский тепловой поток создают в металле высокий уровень внутренних напряжений и тяжелые режимы работы оболочки в охлаждающей среде. В этих условиях существует непрерывная угроза механического и коррозионного разрушения элементов с тяжелыми последствиями для работоспособности всей активной зоны реактора. Поэтому долговременная устойчивость твэлов в реальных условиях ядерного реактора является главным критерием их качества.

Облученные твэлы в начальный период после выгрузки из реакторов обладают высокой радиационной активностью распадающихся осколков деления. В результате процесса интенсивного радиационного распада в начальный период выдержки под многометровым слоем воды возникает самопроизвольное свечение, называемое в физике эффектом Черенкова. Элементарные частицы радиоактивного распада



Христианские храмы и здания ядерных реакторов Сибирской АЭС

3

распространяются в воде со скоростью, превышающей скорость света в данной среде. В результате возникает свечение от желтого до голубого, холодного, безжизненного на взгляд цвета.

Неделящиеся материалы многих рабочих узлов реактора: загрузочных, разгрузочных, измерительных и регулирующих устройств, элементов крепежа и других устройств и приспособлений под воздей-

ствием нейтронного потока приобретают наведенную радиационную активность. За счет структурных изменений и образования радиоактивных изотопов вспомогательные материалы, как и сам уран, теряют прочность, охрупчиваются, утрачивают форму и выходят из размеров.

Отечественные уран-графитовые реакторы первых поколений действовали в проточном одноцелевом режиме, нарабатывая плутоний. Охлаждающая вода, нагреваемая почти до порога кипения, сбрасывалась в природные водоемы – озера и реки. Учитывая, что каждый реактор генерирует энергию соразмерно с крупной современной ТЭЦ мощностью в миллион киловатт, последующие модели реакторов выполнялись с учетом утилизации тепла.

С этой целью трубопроводы первого контура охлаждения активной зоны замыкались на теплообменники, а температура выходящей воды повышалась до двухсот градусов. В результате ядерный реактор превращался в тепловую и электрическую энергетическую установку, сохраняя свои основные функции. Всего за период с 1958 по 1964 год в нашей стране было создано 6 подобных реакторов, получивших собирательное наименование, как «Сибирская АЭС».

На рисунке №3 приведена перепечатанная из газеты «АиФ» фотография храмов Дивеевского монастыря, расположенного поблизости от одного из крупнейших объектов ядерной энергетики, Российского Федерального Ядерного Центра – «Арзамас-1б». Здесь же помещена панорама зданий реакторов АЭС города Северска в Томской области. По архитектурному признаку, размаху и величию реакторные здания аналогичны с христианскими храмами, не хватает только золотых куполов и православных крестов.

Но частично это различие было стерто в девяностые годы прошед-

шего века. На уран-графитовые реакторы был поставлен крест, но не торжественный и величественный, а жирный бюрократический. В упомянутый период большинство таких реакторов было остановлено и выработка плутония полностью прекращена. Сегодня они – памятники двойной значимости. С одной стороны, они символы мудрости российской науки и гимн человеческому труду, а с другой – кляксы бесхозяйственности и равнодушия.

Действительно, остановленные атомные реакторы сложно и дорого демонтировать и обезвредить, но думать и решать сложные задачи наш народ умеет не хуже других. При настоящей хозяйской озабоченности на месте остывших уран-графитовых реакторов уже давно можно было построить современные электрические и теплофикационные станции. Благо, что в этих городах есть не только техническая база и потребители энергии, но были и чудесные высококвалифицированные кадры специалистов атомной техники.

Многие из числа сибирских атомщиков уже мигрировали в европейскую Россию и успешно трудились на Ленинградской, Курской и Ново-Воронежской АЭС. Но значительная часть специалистов этого редкого и тонкого профиля осталась «не у дел» и практически ушла в небытие, не передав новому поколению своего бесценного опыта и богатейших знаний.

Сегодня Россия имеет за Уралом мощнейший сектор атомной промышленности по добыче руды и ее первичной переработке, по изотопному обогащению урана и производству ядерного топлива для атомных электростанций. Однако на всю обширную азиатскую часть, страна имеет всего одну Билибинскую АЭС мощностью в 48 мегаватт, что в 20 раз меньше мощности современного энергетического реактора «ВВЭР-1000», которых в советское время только на Украине построено 11 блоков. Таким образом, по атомной энерговооруженности Сибирь уступает Украине более чем в 200 раз.

В период своего промышленного расцвета атомные реакторы оборонного сектора потребляли огромное количество, до десятка тысяч тонн, металлического урана природного изотопного состава. В первый период развития в сфере производства и обработки металлического урана действовало три российских завода, но в ходе развития и реорганизации переработка урана была сосредоточена на Новосибирском заводе химконцентратов, который снабжал ядерным топливом данного класса все отечественные реакторы в течение почти двадцати лет.

Поэтому последовательно и синхронно с остановкой реакторов в промышленном секторе НЗХК проходило эквивалентное сокращение объемов производства.

Урановое производство НХЗК

Ядерный топливный цикл представляет яркую страницу в истории развития атомной энергетики, но в силу специфических обстоятельств она многие годы оставалась закрытой. И теперь, когда реакторы по производству плутония остановлены практически на вечные времена, необходимо понять и оценить вклад прошедшего периода в текущую научную, техническую сферу и перспективу дальнейшего развития в реальном масштабе данного предприятия.

Технологические основы производства формируются на потребительских свойствах продукции, а именно на ее стоимости и качестве, а точнее на эффективности и эксплуатационной надежности ядерного топлива. В соответствии с этими условиями, производственный цикл включал наиболее передовые технологии своего времени и формировался из ряда последовательных процессов, включая:

- вскрытие руды и извлечение урана в раствор;
- физико-химическую очистку от сопутствующих примесей;
- тонкую химическую технологию;
- металлургию урана;
- рафинирование металла и выплавку сплавов;
- горячую и холодную термическую и механическую обработку;
- изготовление комплектующих деталей и герметизацию твэлов;
- комплексный операционный и выходной контроль продукции и параметров ее изготовления.

Извлечение из руд и глубокая химическая очистка урана

На момент зарождения атомной промышленности Советский Союз практически не располагал не только элементарной промышлен-

ной базой, но и не имел разведанных урановых месторождений. Обозначив проблему, свалилась, как снег на голову.

Только для запуска первого атомного реактора требовались сотни тонн урана в металлическом состоянии и с высокой степенью чистоты по содержанию примесей. Поэтому в первые послевоенные годы урановые руды и концентраты их первичной обработки в массовом порядке поставлялись из освобожденных стран восточной Европы, откуда ввозились и некоторые технологические основы вместе с их авторами.

Правда, к чести нашей страны, заграничные технологические корни быстро обрусели и приобрели исконно наш национальный характер – простоту и надежность.

Вскрытие урановых руд осуществляется проведением ряда традиционных операций, включающего тонкий помол и кислотную или содовую обработку при участии реагентов, окисляющих уран до шестивалентного состояния. В качестве растворителя в условиях НХЗК использовалась серная кислота, а роль окислителя выполняла азотная кислота или диоксид марганца. Последующая обработка рудной пульпы проводилась с целью извлечения урана и последовательной очистки от примесей до уровня ядерной чистоты, которая оценивается сотыми и тысячными долями процента.

К числу универсальных отечественных процессов следует отнести сорбционную технологию избирательного извлечения урана из пульпы, получаемой при кислотной обработке руд и полупродуктов от растворения концентратов. При контакте рудных пульп и «грязных» растворов с синтетическими смолами – сорбентами уран переходит

на активную поверхность сорбента, оставляя в водной среде все твердые составляющие. При последующем отделении смолы уран избирательно выводится из системы, а песок, шлам и гидратированные осадки примесей совместно с жидкой фазой уходят в отвалы. Далее следуют операции десорбции, перевод урана в водный раствор и возвращение смолы в замкнутый цикл.

Последующая, более глубокая очистка урана от примесей, достигается с помощью процессов экстракции, основанных на взаимодействии некоторых его химических соединений с органическими реагентами.

Гидратированный нитрат урана способен образовывать комплексное соединение с трибутилфосфатом, легко растворимое в органических жидкостях, например, в керосине и нерастворимое в воде. С помощью такого реагента уран избирательно экстрагируется органической фазой, оставляя примеси в водном растворе. На последующей стадии реэкстракции свободный от примесей уран снова переводится в водный раствор, из которого затем извлекается в форме осадка нерастворимого соединения.

На конечных стадиях рудного передела уран концентрируется в форме аммонийных солей: диураната аммония $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ и аммоний-уранил-трикарбоната $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$, которые, в зависимости от назначения, легко перерабатываются последующими потребителями в оксиды.

В аппаратурном оформлении технологических процессов, наряду с традиционным оборудованием: мельницами, классификаторами, химическими реакторами, фильтрами, насосами, разрабатывались и применялись оригинальные для того времени модели оборудования, как гидроциклоны, сорбционные колонны, центробежные экстракторы.



Каскад центробежных экстракторов

4

Многие технологические принципы и технические решения того времени действуют и теперь в процессах переработки исходного сырья, оборотов и отходов обогащенного урана в цикле производства энергетического топлива.

Тонкая химическая технология

К разряду тонкой химической технологии относятся процессы получения определенных соединений урана с комплексом заданных физико-химических свойств. В данном случае сюда отнесены технологии получения двуоксида и тетрафторида урана.

Продукты первичной переработки уранового сырья – аммонийная и углеаммонийная соль урана относятся к разряду неустойчивых соединений. При нагревании до 700-800 градусов они диссоциируют, разлагаясь на твердые окислы и газообразные продукты: аммиак NH_3 и двуокись углерода CO_2 . В свою очередь под воздействием температуры аммиак диссоциирует на азот и водород, а последний восстанавливает уран до низшей валентности с образованием его диоксида UO_2 .

Диоксид урана обладает максимальным из окислов содержанием урана, высокой плотностью, температурой плавления и теплопро-

*Вращающаяся
трубчатая печь для
получения двуокси
урана путем терми-
ческого разложения
диураната аммония*

5



водностью. Благодаря удачному сочетанию указанных свойств, он используется в качестве основного рабочего материала во многих модификациях тепловыделяющих элементов атомной техники. В частности, на НЗХК диоксид применяется в массовом производстве рабочих таблеток твэлов реактора «ВВЭР-1000», а также как составляющий компонент металлокерамического ядерного топлива. Поэтому многие первичные технологические операции и образцы промышленной аппаратуры вошли в состав современного производства ядерного топлива.

Диоксид урана широко используется также и в качестве передельного продукта в процессе производства тетрафторида урана для металлургии и изотопного обогащения.

Данный процесс основан на реакции взаимодействия диоксида с газообразным фтористым водородом или его водным раствором

(плавиковой кислотой) по реакции:
$$\text{UO}_2 + 4\text{HF} = \text{UF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$$

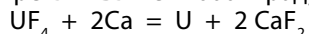
Процесс фторирования в водной среде длительное время использовался на НЗХК в технологии производства сырья для собственной металлургии урана и поставок заводам, производящим и обогащающим гексафторид урана.

Металлургия урана

Металлургия урана, как любая другая естественная наука, имеет собственные теоретические основы, термодинамику и кинетику со сложными обоснованиями. В данном же случае, вполне достаточно ограничиться упрощенным толкованием.

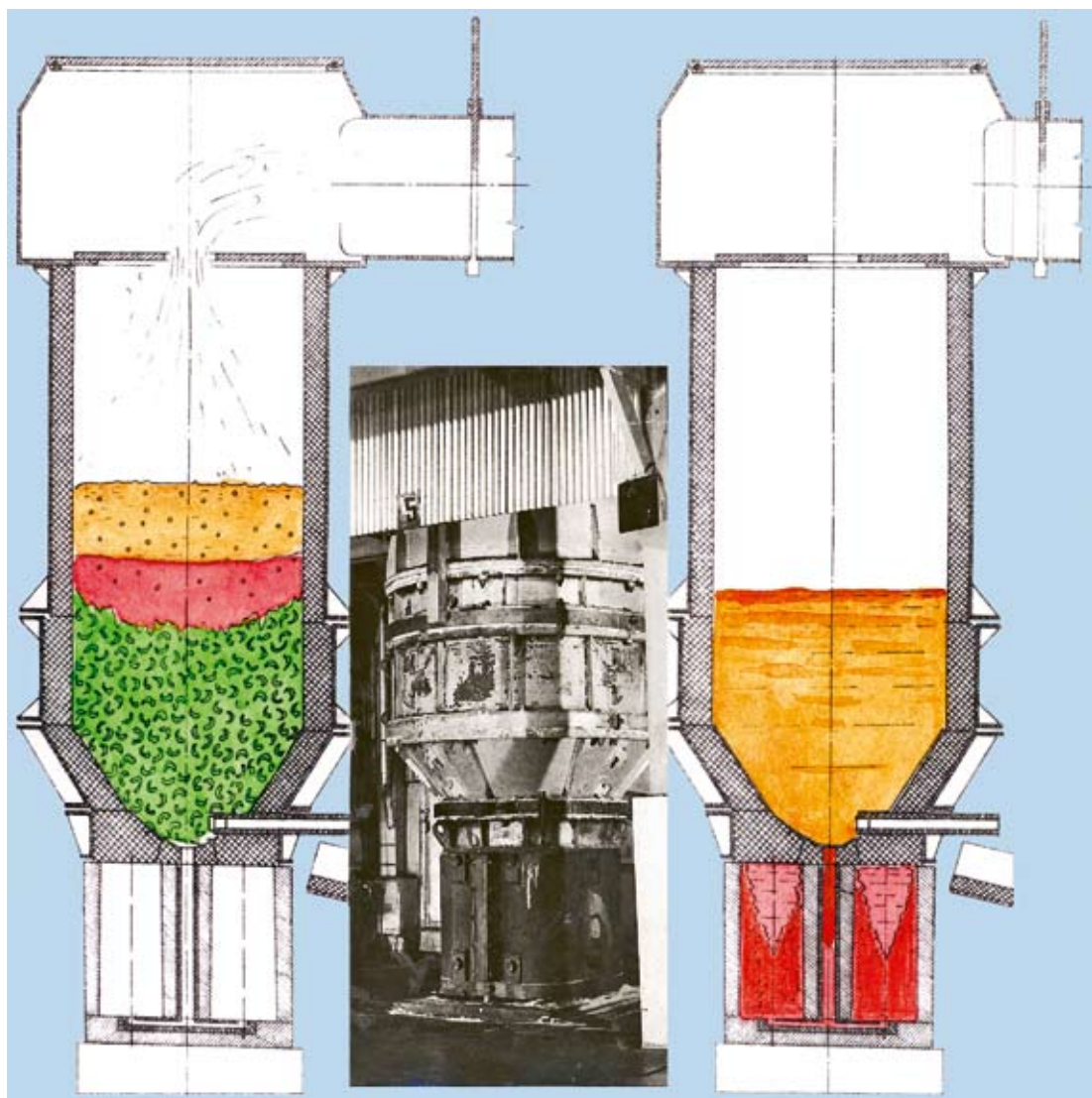
Металлический уран в промышленности получают преимущественно путем металлотермического восстановления тетрафторида кальцием.

При локальном нагреве смеси этих компонентов до оплавления возбуждается реакция взаимодействия с выделением тепла. Под воздействием саморазогрева процесс распространяется по всему объему исходной смеси и заканчивается образованием двух расплавленных фаз: урана (металла) и фтористого кальция (шлака), разогретых выше 2000 градусов:



Вследствие высокой температуры наряду с основной реакцией развиваются побочные процессы взаимодействия с атмосферой и материалами аппаратуры. В результате идет образование окислов, нитридов, карбидов и гидридов урана и кальция, загрязняющих и металлический уран, и шлак. Одновременно в состав металла переходит большинство примесей исходных реагентов и продуктов побочного взаимодействия.

На рисунке №6 приведена фотография действовавшей промышленной шахтной печи для едино-



Фрагмент промышленной шахтной печи для восстановительной плавки урана и схемы развития процесса:

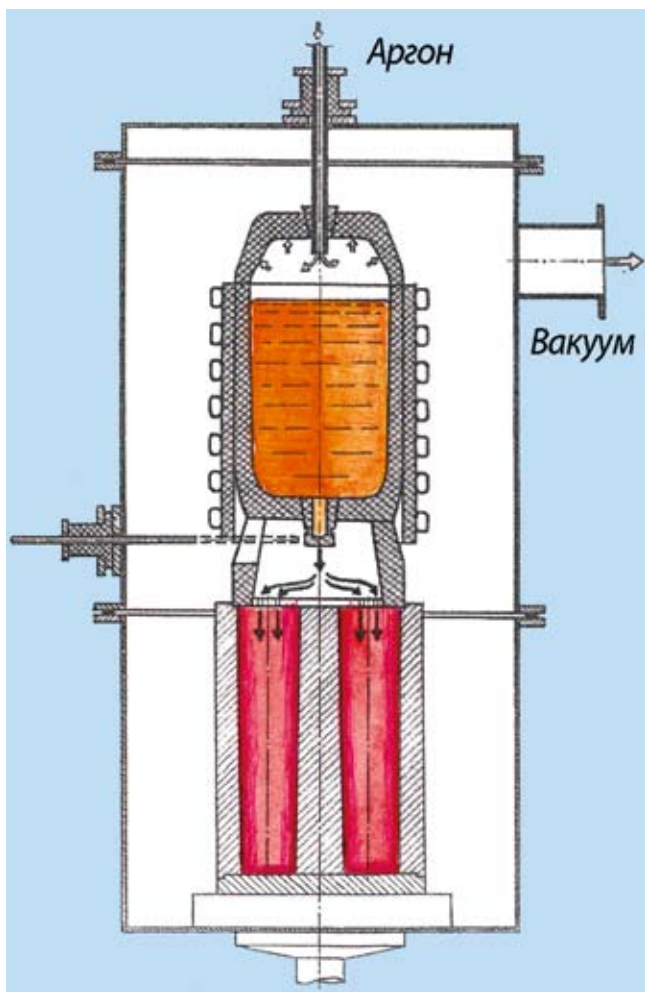
зеленый цвет – смесь тетрафторида урана со стружкой металлического кальция;
красный цвет – расплавленный металл;
оранжевый цвет – жидкий шлак.

6

временного восстановления шести тонн урана и изображена схема процесса восстановительной плавки. Стадия «А» соответствует развитию реакции восстановления с одновременным разделением расплава на две фазы: металл и шлак. На стадии «В» зафиксировано со-

стояние системы после заполнения металлоприемника расплавом через центральный и боковые литниковые каналы перед предстоящим выпуском шлака.

В настоящее время, в связи с установкой уран-графитовых реакторов, металлургия на НЗХК была



Индукционная, вакуумная рафинировочная печь: оранжевый – расплав; красный – металлические слитки

7

остановлена, но не потеряла своей практической ценности. Богатейший многолетний опыт металлургической практики был использован при освоении нового вида продукции на основе обогащенного металлического урана средних степеней изотопного обогащения.

Рафинирование металла и выплавка сплавов

В предыдущем разделе отмечалось, что уран, полученный восстановительной плавкой, или иначе черновой металл, загрязнен целым рядом побочных неметаллических примесей, шлаковых включений и растворенных газов. Поэтому для

повышения степени чистоты черновой металл подвергают последующей рафинирующей переплавке в индукционных вакуумных электропечах. Такая печь, схематично представленная на рисунке, состоит из герметичного разъемного корпуса с индуктором высокочастотного нагрева, внутри которого устанавливается графитовый плавильный тигель, опирающийся на литниковое устройство металлоприемника.

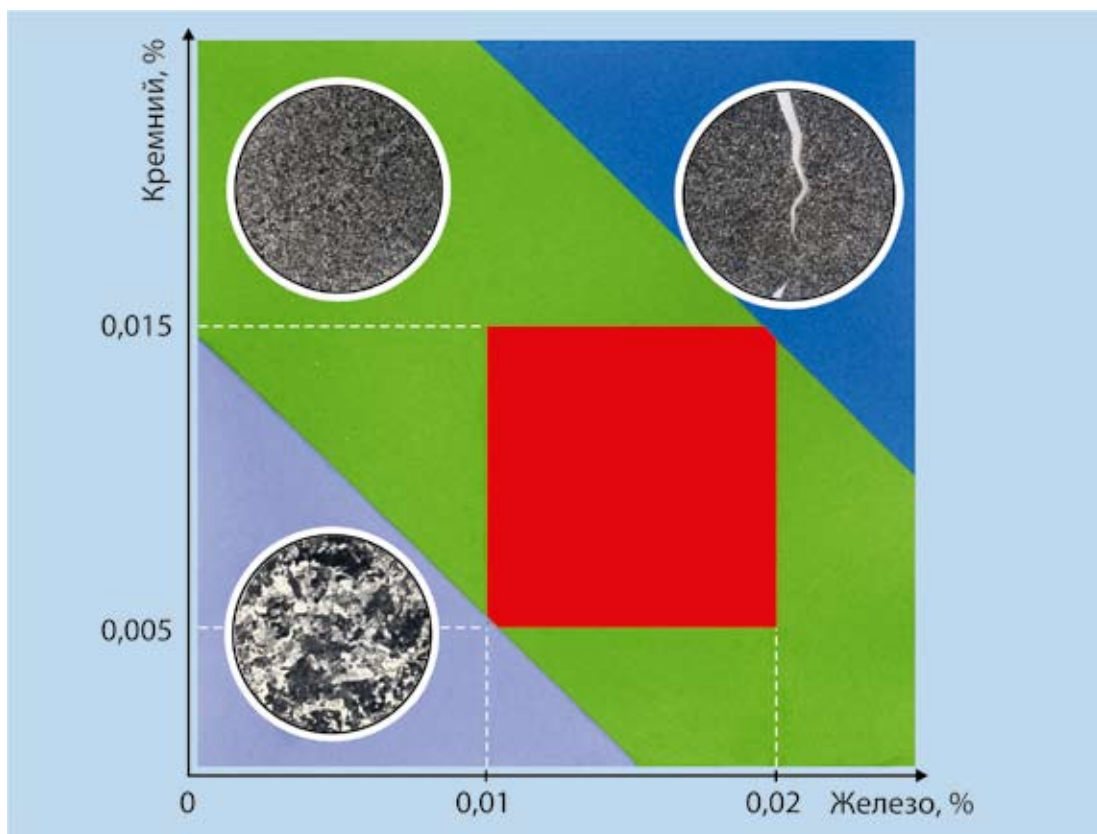
В процессе рафинировочной переплавки металл нагревается до 1350-1400 градусов и выдерживается в течение нескольких часов. Неметаллические примеси при этом коагулируют и, всплывая на поверхность расплава, концентрируются в шлаковую фазу, где происходит их разложение и возгонка. За счет глубокого вакуума резко падает предел растворимости газов, особенно водорода, который выделяется в виде пузырьков, барботирующих в разреженное пространство.

Совместно с рафинированием при индукционной переплавке урана проводится его легирование нужными компонентами или корректировка состава, обеспечивающего необходимое сочетание свойств. Готовый расплав сливается через донное отверстие плавильного тигля и кристаллизуется в цилиндрических каналах металлоприемника.

Далее, слитки поступают на стадии последующей обработки в технологический цикл производственного процесса.

По строгому научному определению к разряду металлов относятся элементы, имеющие кристаллическое строение и электронную проводимость. Сочетание этих признаков характерно только для металлических материалов.

При определенных условиях наблюдения, даже без помощи оптических усилителей, можно увидеть, что металлы состоят из множества миниатюрных частиц, называемых



монокристаллами. В свою очередь, каждый такой кристаллит выстроен из атомов, расположенных в определенном порядке чередования через строго постоянные интервалы. Именно этот порядок определяет основные физические свойства и главные особенности поведения металлов под механической, тепловой нагрузкой и агрессивным воздействием химических средств.

Любые структурные перемены в микромире металла сопровождаются существенными внешними и скрытыми эффектами, выражающимися в изменении прочностных свойств, внешнего вида, состояния открытых поверхностей, искажении линейных размеров и формы. Изучением этих явлений и решением связанных с ними проблем занимается важный раздел науки – материаловедение, в котором за

последнее время сформировался новый самостоятельный сектор, названный реакторным материаловедением.

По рекомендациям этой науки, свойствами реакторного металлического урана можно управлять путем регулирования ее состава, легирования необходимыми добавками в сочетании с определенными условиями термической и механической обработки.

Среди основных легирующих компонентов урана, при изготовлении твэлов для уран-графитовых реакторов, наибольшую практическую ценность представляют железо и кремний. Характер их влияния иллюстрируется диаграммой, приведенной на прилагаемом рисунке. В качестве критерия оценки принята характеристика макроструктуры металла, закаленного из

Диаграмма железо-кремний. Зависимость структуры закаленного урана от степени его легирования.

8

температурного интервала 850-950 градусов. Создавая определенную организованную структуру металла, возможно эффективно локализовать многие разрушительные эффекты, происходящие при нейтронном облучении урана.

В зависимости от изменения содержания железа и кремния резко меняется характер его микроструктуры, в зависимости от которого концентрационное поле диаграммы можно условно разделить на три характерные зоны.

Металл первой зоны (левый угол серого цвета), соответствующей минимальному содержанию добавок, имеет грубозернистую структуру с размером монокристаллов до нескольких миллиметров. Изделия из такого материала при облучении в реакторе быстро теряют свою первоначальную форму, а их внешняя поверхность покрывается грубыми вздутиями, препятствующими проходу охлаждающей воды, что в итоге приводит к перегреву и выходу твэлов из рабочего режима. Фотографии реальных дефектных изделий, рядом с нормальными образцами продукции высокой стойкости приведены на рисунке.

С повышением степени легирования урана его структура стано-

вится мелкозернистой и более однородной (средняя зона диаграммы зеленого цвета). Одновременно с этим на 20-30 процентов повышается прочность и пластичность металла и, как следствие, достигается необходимая эксплуатационная стойкость твэлов.

Однако благоприятное воздействие легирования очень быстро сменяется на свою противоположность. Дальнейшее повышение концентрации как железа, так и кремния (синяя зона диаграммы) вызывает эффект охрупчивания урана, что приводит к растрескиванию твэлов под воздействием внутренних напряжений при работе в реакторе.

Таким образом, поле допустимых концентраций легирующих компонентов замыкается в весьма узких пределах, ограничивающих содержание железа от 0,01 до 0,02 процента и кремния от 0,005 до 0,015 процента. Эта область концентраций на диаграмме выделена в виде квадрата красного цвета.

Принцип легирования широко используется в сфере производства конструкционных металлов и сплавов. Так при получении дюралюминия в алюминий вводится до 5 процентов меди, а чтобы сталь сделать нержавеющей, к железу добавляют почти 10 процентов никеля и 16 процентов хрома. И только самые вреднейшие примеси железа – фосфор и сера составляют в сталях три-четыре сотых доли процента, что в два раза выше, чем легирующих элементов в промышленном уране.

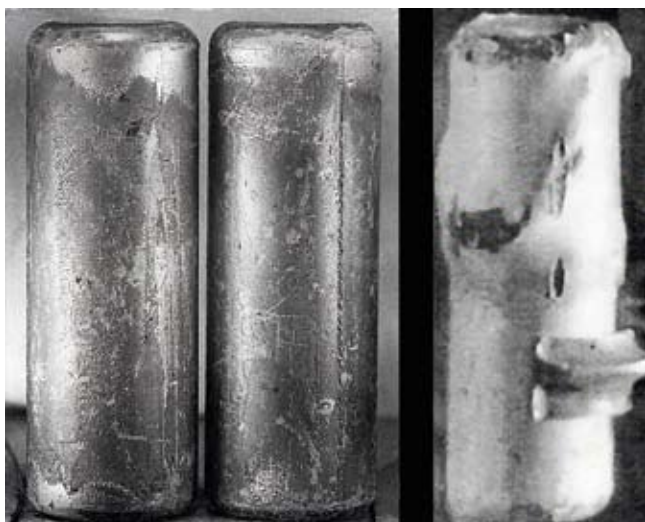
Весьма узкий реальный диапазон концентраций железа и кремния в сплавах создает существенные трудности в достижении равномерности состава во всех микрообъемах тепловыделяющих элементов. Образно говоря, при легировании сплавляется пудовая гирия тяжелоатлета с канцелярской кнопкой, то есть несколько тонн урана с граммами железа.

9

Урановые твэлы после облучения в реакторе.

Слева – образцы, прошедшие полный рабочий цикл.

Справа – досрочно выгруженные в связи с распуханием.



Практически эта проблема решается путем использования промежуточных сплавов – лигатур. Например, при необходимости легирования урана на 0,01 процента, предварительно выплавляют лигатуру с содержанием железа в один процент, а затем при проведении основной плавки на каждую тонну загрузки исходного урана добавляя по 10 килограмм лигатуры.

Технология металлургического цикла заканчивается получением металлического урана, заданного химического состава в виде слитков определенного веса, формы и размеров. Обычно это цилиндрические стержни диаметром около 200 миллиметров и весом до 500 килограмм.

Термомеханическая обработка урана

На стадии горячей механической обработки слитки нагреваются до температур пластического состояния индукционными токами и подвергаются обработке прокаткой в интервале 900-1000 градусов в полосы круглого сечения диаметром около 40 миллиметров.

Деформация слитков осуществляется путем непрерывной последовательной прокатки через «ручьи» двенадцати двухвалковых прокатных клетей, калиброванных по системе «овал-круг». При этом поперечное сечение полосы уменьшается по площади в 25 раз и, соответственно, длина прокатанной полосы возрастает от одного до 25-30 метров.

Уран относится к разряду химически активных элементов, на воздухе он интенсивно окисляется и даже горит. Поэтому все операции высокотемпературной обработки ведутся с применением средств максимально возможной защиты металла от влияния кислорода атмосферного воздуха.

Нагревание слитков под прокатку проводится в герметичных каме-

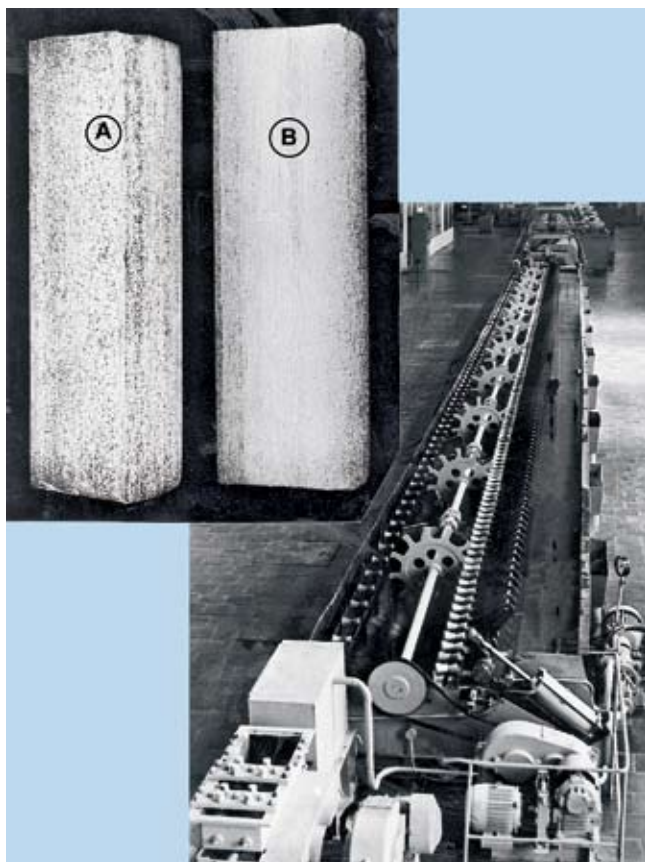
рах, а на поверхность металла пульверизацией наносится покрытие из смеси хлористых солей, которые, расплавляясь, образуют жидкую защитную пленку. Общее время обработки сокращено до возможного минимума путем совмещения обжатия одновременно в нескольких клетях без пауз промежуточной передачи. После выхода из последней калибровочной клетки стана прокатанная полоса мгновенно охлаждается погружением в воду.

Общий вид узла охлаждения на выходе из цикла непрерывной прокатки приведен на рисунке №10. Здесь же помещены фотографии внешнего вида проката, полученного обработкой на открытом воздухе (А) и под пленкой расплава солей (В). На снимке можно увидеть, что защита от окисления заметно повышает качество обработки поверхности, что в свою очередь, улучшает условия последующей обработки металла.

Последняя операция данного цикла, а именно охлаждение в воде, выполняет еще одну важнейшую функцию обработки – закалку. При ускоренном охлаждении урана, предварительно легированного железом и кремнием, формируется равномерная мелкозернистая структура с размером кристаллов в пределах 100-500 микрон. Ранее, в разделе выплавки сплавов, описаны некоторые структурные особенности урана и обозначена их роль в обеспечении эксплуатационной надежности твэлов.

В итоге весь процесс обработки урана складывается в простейший ряд, включая выплавку, легирование, прокатку и закалку металла. Кажется, проще не бывает.

Но эта простота достигалась огромными усилиями ученых и производственников атомной отрасли. Именно четкость, простота и надежность стали результатом тончайших исследований в лабораториях, сложных и даже опасных экспери-



Финишный агрегат непрерывного прокатного стана – закалочная ванна и заготовки прокатанного урана.

10

ментов на ядерных реакторах, многочисленных стендовых испытаний, технологических и конструкторских разработок.

В данном случае возникает простая аналогия с булатом. В многочисленных сказаниях Ближнего и Дальнего Востока повествуется о чудесных достоинствах булатного оружия и секретах его происхождения. Историю булата непременно сопровождает многовековая тайна, как достояние избранных. Булату приписывают экзотический состав и свойства, чудесное магическое происхождение, фантастические способы и секреты изготовления.

Однако современными научными исследованиями неоспоримо доказано, что булат – это простейший двойной сплав железа с углеродом, прошедший регламентиро-

ванную механическую и термическую обработку. В итоге возникает параллель с технологией урана – в том и другом случае выстраивается одинаковый ряд операций: выплавка сплава, ковка или прокатка, закалка и финишная обработка.

Секрет уникальности свойств булата заключается в знании и умении регулирования химического состава, выборе исходных компонентов, условий выплавки, кристаллизации и охлаждения. Огромную роль играют условия ковки и термической обработки. Не даром в легендах говорится, что булатный клинок нагревают, куют и отдают в руки всаднику, который затем мчится на скакуне и охлаждает изделие встречным ветром. Из других сказаний можно узнать, что булатный меч закалывают кровью, погружая нагретый клинок в тело раба.

Но все эти сказки не досужие, забавные вымыслы. В своем изложении они содержат аналогии специфических условий обработки, которые можно воспринимать и как температурные режимы нагрева, закалки, отпуска, и как свойства охлаждающей среды. В свое время все эти условия требовали высокого мастерства и даже искусства их исполнителей, во многом были непонятными, а потому и таинственными. И даже сегодня, несмотря на кажущуюся простоту, трудно найти в среде сталеваров и термистов людей высшей квалификации, способных выплавить и обработать булат.

Урановая технология также требует высокой квалификации, культуры производства и уровня подготовки персонала, но она не замкнута только на человеческий опыт, а надежно гарантирована техническими средствами. Все научные и технические данные, заложенные в основы производственных процессов, тщательно изучены и учтены в принципах работы исполнительных механизмов, управляющих и контролирующих устройств, способов и

систем оценки конечных результатов и качества готовой продукции.

Прокатанные и закаленные полосы разделяются на заготовки длиной около ста миллиметров, которые поступают на последующие переделы изготовления рабочих сердечников тепловыделяющего элемента.

Токарная и гальваническая обработка

Технология обработки урановых заготовок при изготовлении рабочих сердечников для тепловыделяющих элементов представляет серию простейших токарных операций обточки по всей поверхности. Она выполняется путем резания обычным твердосплавным инструментом под прикрытием обильного потока воды, предотвращающего возгорание металлической стружки.

Техническое оснащение в самый начальный период представляли серийные токарные станки марки «ДИП». Со временем был создан специализированный токарный парк в виде последовательной линии автоматов пооперационной обработки, связанных транспортирующим устройством. А в третьем поколении, как современный вариант, разработаны станки с программным управлением, позволяющие с одной установки обтачивать цилиндрические поверхности, торцевать до заданной высоты изделия и выводить радиусы по кромкам.

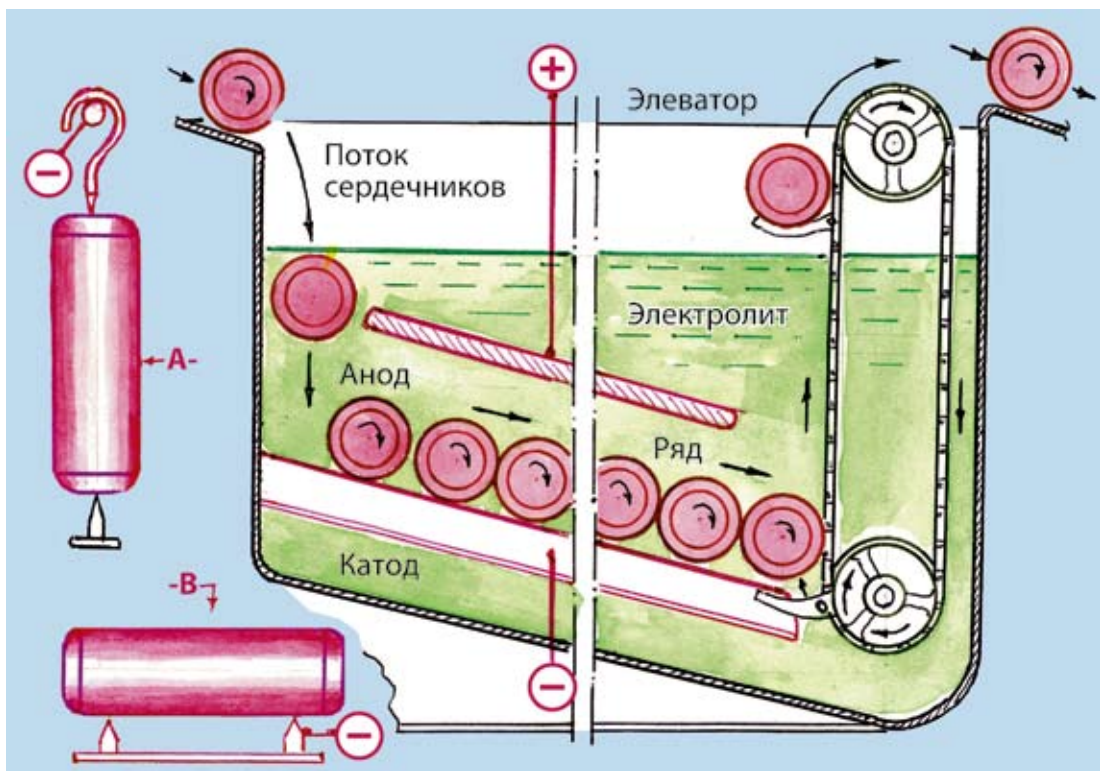
Последующая гальваническая обработка представляет процесс электрохимического никелирования в водном растворе сульфата никеля с целью защиты всей поверхности сердечника плотной пленкой металлического никеля толщиной в 3-5 микрон. Никелевая пленка служит своеобразным подслоем алюминиевой оболочки, и ее роль будет раскрыта в следующем разделе данного изложения.

К числу особых требований по качеству никелевого покрытия от-

носится, прежде всего, сплошность и отсутствие дефектов даже точечного размера. А такая задача сопряжена с определенными сложностями. Прежде всего, любому никелируемому изделию требуется опора, крепление и электрический контакт, в месте расположения которых затрудняется процесс осаждения никеля и сохраняются непокрытые участки поверхности. Пример такого крепления, принятого в первичном варианте, изображен на рисунке №11(А). Никелируемое изделие закрепляется в вертикальном положении между двух заостренных стержней, один из которых выполняет роль токового контакта, и в таком положении изделие проходит весь цикл обработки, включающий травление, промывку, собственно никелирование, нейтрализацию и сушку. В результате вся поверхность покрывается однородным слоем, но в местах контакта с игольчатыми опорами остаются точечные островки открытой поверхности урана, роль которых проявляется в процессе работы твэла в реакторе не самым желательным образом.

Со временем этот недостаток был устранен путем обработки изделий в движущемся, точнее, катящемся потоке. Схема этого процесса представлена на том же рисунке №11.

Для обработки сердечники представляющие мерные цилиндры единой длины, располагаются горизонтальными рядами по 40-60 штук на наклонных направляющих металлических линейках, смонтированных в электролизной ванне. В процессе работы на разгрузочной стороне ванны с помощью элеватора производится регулярное поштучное удаление изделий. При этом весь наклонный ряд перекачивается на расстояние одного диаметра удаленного изделия, поворачиваясь на одну треть оборота, а на освободившееся место с другой стороны ванны производится такая же ритмичная подгрузка следующих



11

Схема никелирования урановых сердечников методом «качения»:
 А – положение изделия при никелировании на подвесках;
 В – положение при никелировании «качением»

деталей. В итоге создается непрерывно движущийся поток обрабатываемых сердечников, которые, продвигаясь по ванне, вращаются, делая несколько оборотов вокруг своей оси, равное примерно одной трети от количества изделий в ряду.

Полюс катодного напряжения в системе создается путем включения в сеть постоянного тока через линейки направляющего аппарата. Анод в виде никелевой пластины крепится выше и параллельно катодному ряду, поэтому процесс осаждения никеля идет на верхней открытой цилиндрической поверхности и на торцевых плоскостях изделий. Поскольку за период прохода через ванну изделие делает 15-20 полных равномерных оборотов, на цилиндрической поверхности формируется однородный слой ни-

келя заданной толщины. При этом слой никеля на торцевых, не экранированных поверхностях формируется в полтора - два раза толще, что оказывает определенный положительный эффект.

По такому же принципу конструктивно оформлены все подготовительные и заключительные операции процесса: предварительное травление, промывка, нейтрализация электролита и сушка. Отдельные агрегаты скомпонованы последовательно и связаны передающими устройствами в единую, стройную технологическую линию.

Параметры процессов каждой стадии обработки, такие как концентрация растворов, температура, плотность рабочего тока и другие контролируются и выдерживаются на заданных уровнях единой сис-

темой автоматического управления и регулирования. В целом процесс, от загрузки исходных полуфабрикатов до выдачи никелированных изделий, осуществляется практически без участия персонала, что гарантирует полную идентичность и высокую стабильность как по уровню качества обработки, так и по производительности.

Подготовка защитной оболочки

В качестве теплоносителей для съема и транспортировки тепловой энергии деления урана в атомных реакторах используются жидкости или газы. В большинстве типов энергетических аппаратов роль теплоносителя выполняет вода или паро-водянная смесь.

При этом ядерное топливо и теплоноситель преимущественно изолируются один от другого с целью защиты первого от механического и химического разрушения, а второго – от радиоактивного загрязнения. Как правило, данную роль выполняют внешние защитные оболочки теплоделяющих элементов.

Традиционными материалами защитной оболочки твэлов с металлическим ураном считаются алюминий и его сплавы.

Алюминий обладает ничтожным захватом нейтронов, не образует долгоживущих изотопов и не подвержен наведенной радиоактивности. Кроме того, он обладает высокой коррозионной стойкостью в водной среде, достаточной прочностью при повышенных температурах, а также технологичностью в обработке.

Первоначально для оболочек твэлов данного класса использовался технически чистый алюминий. Но при внедрении в практику реакторов с энергетическим циклом, когда максимальная температура охлаждающей воды повысилась до 200 градусов, технический алюминий утратил работоспособность и

оказался непригодным. В новых условиях оболочка быстро разрушалась, твэлы теряли герметичность и выходили из строя.

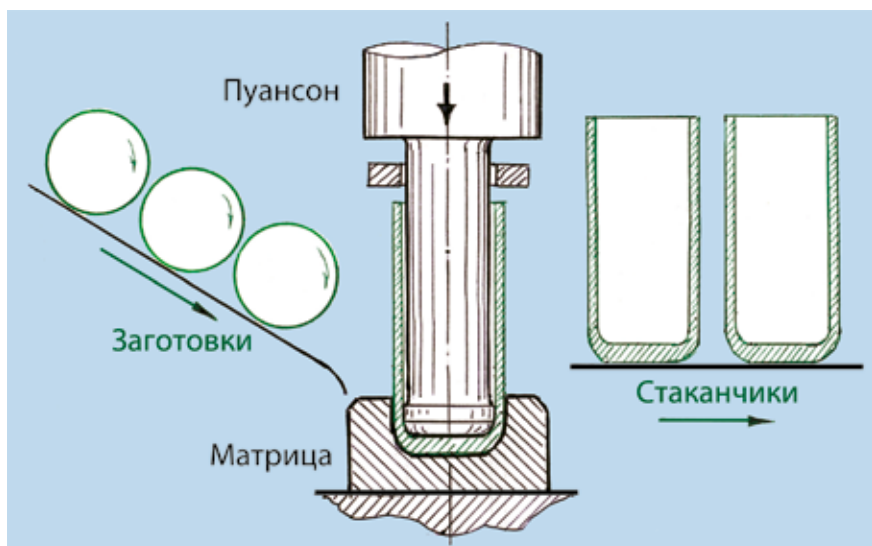
Поддерживая новое направление развития реакторной техники, наука разработала более стойкие сплавы алюминия, легированного железом, кремнием и титаном, получившие маркировку «Б-1» и «Б-1Т». Коррозионная стойкость этих сплавов обеспечила многолетний период работы реакторов, вплоть до окончания эпохи их эксплуатации.

Оболочка твэла представляет всестороннее покрытие уранового сердечника равномерным слоем толщиной в один миллиметр по цилиндру с утолщением до двух миллиметров на торцевых плоскостях. Заготовки оболочек, поступающих на операцию сборки, имеют форму стаканов, получаемых методом обратного выдавливания из цилиндрических заготовок. Схема этого процесса изображена на рисунке №12.

Выплавка алюминиевых сплавов, первоначальная их обработка прессованием в полосы и разделка на заготовки осуществляется на Челябинском механическом заводе.

На НЗХК действует производственный цех, специализированный на обработке алюминия при изготовлении полуфабрикатов и заготовок для основных производителей твэлов широкой номенклатуры. Для твэлов данного класса этот цех является поставщиком заготовок оболочки в виде пресованных стаканчиков, прошедших цикл термической и химической обработки: отжиг, травление, промывку и комплекс контрольных операций.

Аппаратурное оформление техно-логического процесса представляет поточную высоко механизированную линию, включающую быстроходные кривошипные прессы, термические печи, агрегаты для обработки в растворах, промывки и сушки.



Герметизация тепловыделяющих элементов

На данной стадии осуществляется сборка в единую конструкцию никелированных урановых сердечников и алюминиевых стаканов, последующая размерная калибровка оболочки, закатка открытого торца и газовое обжатие в нагретом состоянии. После обжатия закатанный торец оболочки протачивается и дополнительно герметизируется центральным точечным швом путем электронно-лучевой сварки.

Из этого несложного набора последовательных операций особого внимания требует процесс газового обжатия. Он включает нагрев изделий в несколько сот градусов с последующей обработкой в автоклавах сжатым воздухом под давлением более 100 атмосфер. При этих условиях развиваются и протекают процессы диффузионного взаимодействия между тремя компонентами системы: ураном сердечника, алюминием оболочки и промежуточным никелевым подслоем. Упрощенно, но достаточно достоверно, процесс и его результаты отображены на рисунке №13.

При наличии сплошного и однородного никелевого подслоя по

всей поверхности сердечника никель, с одной стороны, взаимодействует с ураном, образуя интерметаллическое соединение UNi_5 , а со стороны алюминия - $NiAl_3$. Эти две промежуточные прослойки создают сплошное и прочное сцепление оболочки с сердечником, гарантируя надежную теплопередачу в течение всего периода работы твэла в активной зоне реактора. К концу кампании эксплуатации толщина интерметаллических прослоек возрастает, но утонченный защитный слой никеля сохраняется.

При наличии просветов или утончений в никелевом подслое, при герметизации между ураном и алюминием возникает непосредственный контакт с образованием соединения типа $UA14$ - рыхлого кристаллического вещества (А). Будучи незаметным в микроскопическом исходном размере, интерметаллид продолжает свое развитие позднее, по ходу процесса работы твэла в реакторе. Он рыхлой массой прорастает через всю толщу оболочки и, выходя на открытую поверхность, размывается потоком воды, образуя каверны (В). Аналогичные паразитные процессы возникают, развиваются и приводят к тяжелым пос-

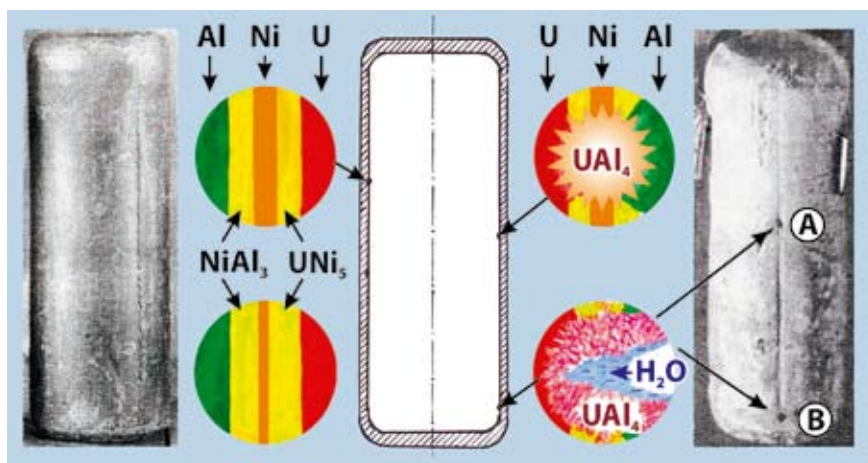


Схема взаимодействия на границе сердечника и оболочки твэла в процессе газового обжаривания и его последствия при работе твэлов в реакторе. Внешний вид дефектного твэла, выгруженного из реактора.

13

ледствиям в большинстве случаев нарушения условий теплопередачи через оболочку твэла. Например, при локальном, даже точечном отслоении оболочки от поверхности сердечника, возрастает тепловое сопротивление, вызывающее местный, очаговый перегрев контактирующих металлов. Перегрев активизирует процессы взаимодействия, что приводит к образованию уран-алюминиевых интерметаллических соединений и, в конечном итоге, к разрушению с образованием сквозных дефектов оболочки.

Финишная обработка и контроль готовой продукции

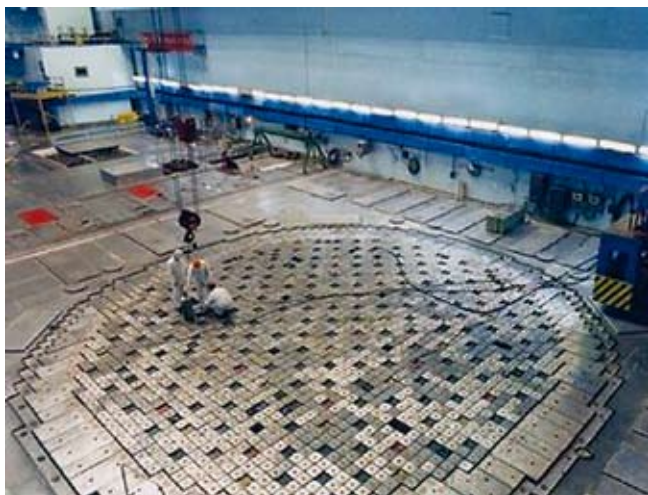
Завершающая обработка герметичных твэлов включает обезжиривание оболочки, щелочное травление и формирование поверхностного покрытия плотным слоем оксида алюминия, так называемой анодной пленкой. В процессе такой обработки достигается необходимая фактура изделий и создается защитный барьер, сохраняющий оболочку от механических повреждений при перегрузках и транспортировке.

Весь технологический цикл финишной обработки скомпонован в едином агрегате непрерывного действия по заданной программе.

Изделия, установленные в групповые подвески, последовательно проходят ванны щелочного травления, электрохимического анодирования в серной кислоте, кипячение, отмывку и окончательную сушку. В таком состоянии они поступают на стадию конечного контроля.

Выходной контроль представляет комплексную оценку основных показателей качества, включающую визуальные, ручные и приборные определения. Изделия проходят оценку геометрической точности, внешнего вида, проверяются на наличие открытых дефектов и состояние поверхности. С помощью ультразвуковой техники проводится оценка надежности сцепления оболочки с сердечником, осуществляется поиск очагов диффузионного взаимодействия урана с алюминием и проверяется сплошность сварочных соединений. Приборами токовихревого принципа замеряется толщина оболочек и фиксируется отсутствие скрытых дефектов алюминия.

Параллельно с массовым контролем действует система выборочной оценки с разрушением образцов-свидетелей. При этом количественно определяется прочность сцепления диффузионного слоя, фиксируется его состояние и структура сварочных швов.



Общий вид центрального зала, палаты реактора.

14

Качество урановых сердечников оценивается по металлографическим шлифам макро и микроструктуры, по уровню прочности на разрыв, относительному удлинению образцов и ударной вязкости. Одновременно отбираются пробы для анализа химического состава металла.

В общую систему обеспечения качества, наряду с отделами технического контроля и центральной лабораторией, входят и определенные средства научно-исследовательской лаборатории. Эта работа включает отслеживание динамики поведения продукции в эксплуатации в сопоставлении с техническим развитием производства. Особое внимание акцентируется на внедрении новых технологий, оборудования и технических средств обеспечения качества, а также на всех внештатных ситуациях работы изготовителя и переработчиков продукции. Аналитическая программа включает также системный подбор статистических данных и их сопоставление с текущими результатами эксплуатации тепловыделяющих элементов. На этой базе возникают новые пути повышения качества и создаются современные программы регулирования и управления технологиями производства.

В целом, на протяжении многих лет, учеными и производственниками создавалось современное производство твэлов, обладающих практической абсолютной эксплуатационной надежностью. В начальный период, вплоть до шестидесятых годов, количество аварийных «зависаний» исчислялось десятками на один реактор в год, что приносило не только экономический ущерб, но и создавало вполне определенную радиационную опасность. По мере совершенствования физических характеристик и технических свойств твэлов разработки и внедрения новой техники и технологии ритмично возрастало качество и воспроизводимость результатов эксплуатации твэлов в реакторах. За счет этого уже к середине шестидесятых годов количество аварийных случаев сократилось до единичных значений. Реакторы вошли в стабильный ритм работы и обрели реальную возможность для наращивания мощности и повышения эффективности.

За последующий многолетний период удельные нагрузки на топливные элементы возросли в полтора и даже в два раза, что значительно ускорило процессы выработки целевого продукта, увеличило объемы и сократило затраты на его производство.

На рисунке №14 приведена фотография центрального рабочего зала уран-графитового атомного реактора. Под «шахматным» узором тяжелых чугунных плит на глубину более 30 метров под землей простирается машина конструкций реактора с его колоссальной активной зоной, коммуникациями, системами контроля, средствами управления и защиты. В двух тысячах технологических каналов реактора одновременно работает около 200 тысяч тепловыделяющих элементов, и от надежности каждого из них зависит работоспособность всей системы в целом. Длительная, продуктивная и безопасная работа твэла – это глав-



Старейшие промышленные корпуса завода. Слева – бывший цех металлургии урана и производства твэлов, теперь опытно – промышленная база предприятия. Справа – первый опытно-промышленный цех пускового периода, теперь цех обработки металлического урана и производства твэлов на его основе.

15

ное условие и требование к производителям ядерного топлива.

На сегодняшний день эта надежность такова, что внеплановые остановки стали редчайшими событиями. Только один твэл из миллиона переработанных изделий, преимущественно в слабой степени, проявляет свое несовершенство. В область предания отошли времена, когда вспыхивал яркий всплеск аварийной сигнализации, сопровождаемый тоскливым, душераздирающим подвыванием сирены.

Но, к сожалению, эпоха уран-графитовых реакторов подходит к концу. Им на смену пришла новая, более совершенная, экономичная и безопасная техника, занявшая свое

прочное место в ядерной энергетике. Недалеко то время, когда мощный, слаженный, всесторонне развитый производственный комплекс прекратит свою повседневную работу, но не потеряет своей значимости. На протяжении многих лет он был кузницей кадров для всего завода и источником лучших традиций Новосибирского завода химконцентратов.

Комплекс научных и конструкторских разработок, обеспечивших успешное развитие и совершенствование промышленного производства тепловыделяющих элементов на основе металлического урана был отмечен Государственной Премией СССР в 1979 году.

Водо-водяные энергетические реакторы ВВЭР-1000

В середине семидесятых годов на предприятии была начата работа по созданию крупного промышленного комплекса для масштабного производства тепловыделяющих элементов и кассет активной зоны энергетического атомного реактора «ВВЭР-1000».

По своему техническому уровню атомные электростанции с реакторами «ВВЭР-1000» представляли наиболее совершенные и экономичные энергетические установки, на использование которых и было сориентировано развитие отечественной атомной энергетики того времени. При этом Новосибирский завод химконцентратов планировалось развивать, как основного поставщика ядерного топлива для нового поколения ядерных реакторов.

Принципиально энергетический реактор «ВВЭР-1000» представляет ядерный генератор тепловой энергии, конструкция которого включает активную зону с системами ее управления, охлаждения и защиты.

Активная зона реактора размещается в нижней области стального, толстостенного цилиндрического корпуса диаметром около четырех и высотой до двенадцати метров. В средней по высоте части расположены рабочие органы – поглощающие стержни системы управления и защиты, а выше и за пределами корпуса смонтированы приводы их перемещения. В средней боковой стенке корпуса расположены патрубки, объединяющие корпус с замкнутым контуром системы охлаждения реактора, в котором циркулирует вода под давлением 160 атмосфер, при температуре в 300-320 градусов.

В комплект рабочей зоны реактора входит 163 тепловыделяющих сборки (ТВС), которые на заводс-

ком жаргоне именуется ядерным топливом и представляют главную тему данного изложения, как товарная продукция НЗХК.

На рисунке №16 изображена принципиальная схема атомной энергетической установки, приведен общий вид реактора и план его активной зоны, а также единичная тепловыделяющая сборка или кассета, основная перспективная номенклатура продукции НЗХК.

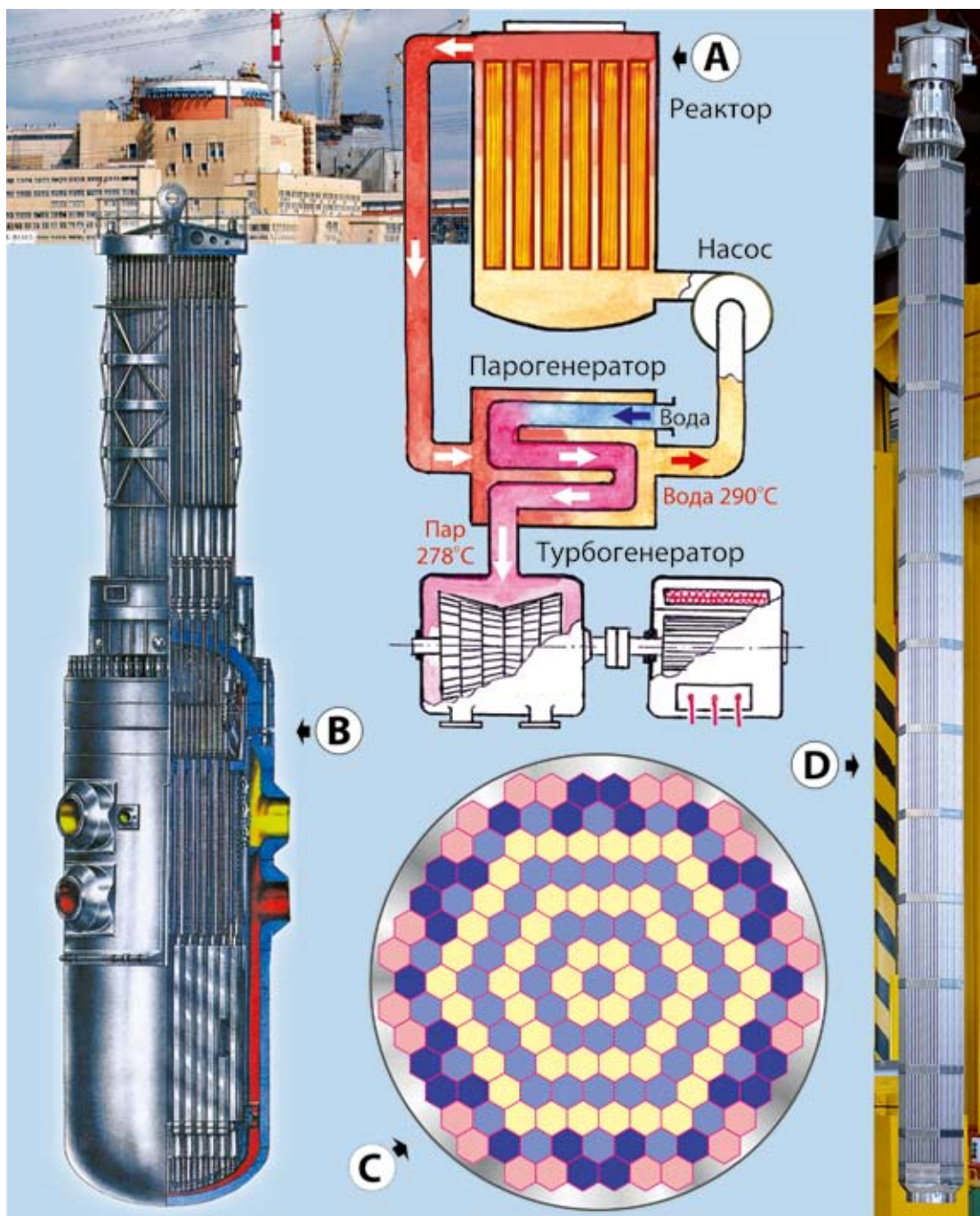
Первый или главный контур охлаждения реактора включает циркуляционные насосы и парогенераторы, передающие тепловую энергию в систему второго парового контура. Второй контур объединяет парогенераторы с турбинами в систему генерации электроэнергии. В целом, данный комплекс связанных систем представляет атомную электростанцию (АЭС).

В первом контуре циркулирует теплоноситель – вода под давлением, которая при прохождении активной зоны реактора контактирует с тепловыделяющими сборками и нагревается от 290 градусов на входе до 320 градусов на выходе из реактора.

Далее поток нагретой воды поступает в многотрубные теплообменники, где тепловая энергия через стенки труб передается теплоносителю второго контура, испаряет воду и перегревает пар до температуры 278,5 градуса.

Тепловая мощность активной зоны реактора составляет 3 миллиона киловатт, которая при потоке теплоносителя в 85 тысяч кубических метров в час обеспечивает часовую выработку перегретого пара до 1500 тонн.

К началу проектирования и строительства производственного комплекса для массового выпуска нового типа ядерного топлива



A – Принципиальная схема ядерной энергетической установки;
B – Энергетический атомный реактор «ВВЭР-1000»;
C – Активная зона реактора из 163 тепловыделяющих кассет;
D – Тепловыделяющая сборка ТВС (кассета).

практически отсутствовал опыт его реальной промышленной эксплуатации. Поэтому перед прикладной отечественной наукой и практикой стояли проблемы разработки принципиально новой конструкции твэлов, создания технологии их изготовления и испытания.

Во второй половине семидесятых годов был осуществлен целый комплекс научных исследований, на основе которых разработан современный технологический процесс, спроектированы и испытаны головные образцы промышленных агрегатов, приборов контроля, систем автоматического управления процессами и средств контроля качества продукции. На основе ряда новых научных достижений, современных способов и средств был сформирован оптимальный технологический цикл.

Начиная со второй половины семидесятых годов, в Советском Союзе стартовала обширная программа развития атомной энергетики, включающая строительство и ввод в действие атомных электростанций с единичной мощностью энергоблоков в один миллион киловатт. По прогнозам исходного планирования, к концу двадцатого столетия, то есть к 2000-му году, должно действовать около сотни таких энергетических систем, суммарная установленная мощность которых будет составлять более 100 миллионов киловатт.

Результаты первого же десятилетия на практике подтвердили полную реальность этого прогноза. К моменту зарождения программы, а именно по состоянию на конец 1975 года, суммарная установленная мощность атомной энергетики СССР не превышала 4 миллиона киловатт и занимала в балансе производства электроэнергии около одного процента. По мере реализации программы уже во второй половине восьмидесятых годов мощность действующих АЭС возросла более

чем в девять раз и составляла по абсолютному значению 37,5 миллионов киловатт. По отдельным республикам, ставшим после 1991 года самостоятельными государствами, доля атомной энергии значительно возросла и достигла по России - 9,5 процентов, по Украине - 25, а в Литве – более 90 процентов.

Динамика этого процесса, на примере строительства четырех атомных электростанций, отображена графически на рисунке №17.

Полный цикл процесса возведения атомной электростанции включает сооружение фундаментов, строительство основных и вспомогательных зданий, монтаж, обкатку оборудования и завершающие пуско-наладочные работы. Как показала практика, весь период, начиная с котлована и заканчивая включением в силовую сеть, занимал четыре с половиной года. При этом строительство носило поточный характер со сдвигом во времени от одного до двух лет. В таком же ритме повторялись события ввода новых энергоблоков АЭС в режим эксплуатации.

Поскольку в этот период одновременно строилось несколько крупных блочных атомных электростанций, при установившемся режиме ежегодно в строй действующих входило по два-три блока-миллионника. Так что прогнозы и первичная ориентация НЗХК были не утопией, а вполне реальной расчетной величиной. Однако в ночь 26-го апреля 1986 года произошел взрыв четвертого блока Чернобыльской атомной электростанции, который внес существенные коррективы в развитие атомной энергетики в нашей стране и во всем Мире.

В первые годы после катастрофы советское Правительство тщательно скрывало истинный характер данного происшествия. Официальная версия трактовала это событие, как взрыв сепараторов водяного

Фрагмент динамики развития атомной энергетики СССР с 1978 по 1994 год.



17

Фазы создания АЭС

- Котлован, фундамент
- Здания и сооружения
- Монтаж оборудования
- Наладка
- Паузы, отсрочки

пара. В этом ключе выступала и периодическая пресса, и отдельные авторы монографий.

Но несмотря на любые фантазии в толковании, последствия катастрофы носили действительно трагический характер. Свертывалось и замирало строительство АЭС и производство энергетического оборудования, остановилось и развитие топливной базы атомной энергетики. Руководство страны и большинство населения было поражено радиофобией, которая дословно

означает панический страх перед радиацией. Это эпидемическое заболевание общества способно распространяться со скоростью человеческого общения, утраиваться и даже удваиваться за считанные часы в зависимости от числа слушателей у конкретного паникера.

Трагическая реальность этого времени иллюстрируется диаграммой, приведенной на рисунке №17. На ней представлена динамика строительства блоков четырех

Одна из крупнейших атомных электростанций российского варианта – Балаковская АЭС

18



Самая мощная атомная электростанция Европы – Запорожская АЭС с суммарной мощностью шести энергоблоков «ВВЭР-1000» в 6 миллионов киловатт

19



крупнейших АЭС в России: Калининской и Балаковской, на Украине: Южно-Украинской и Запорожской.

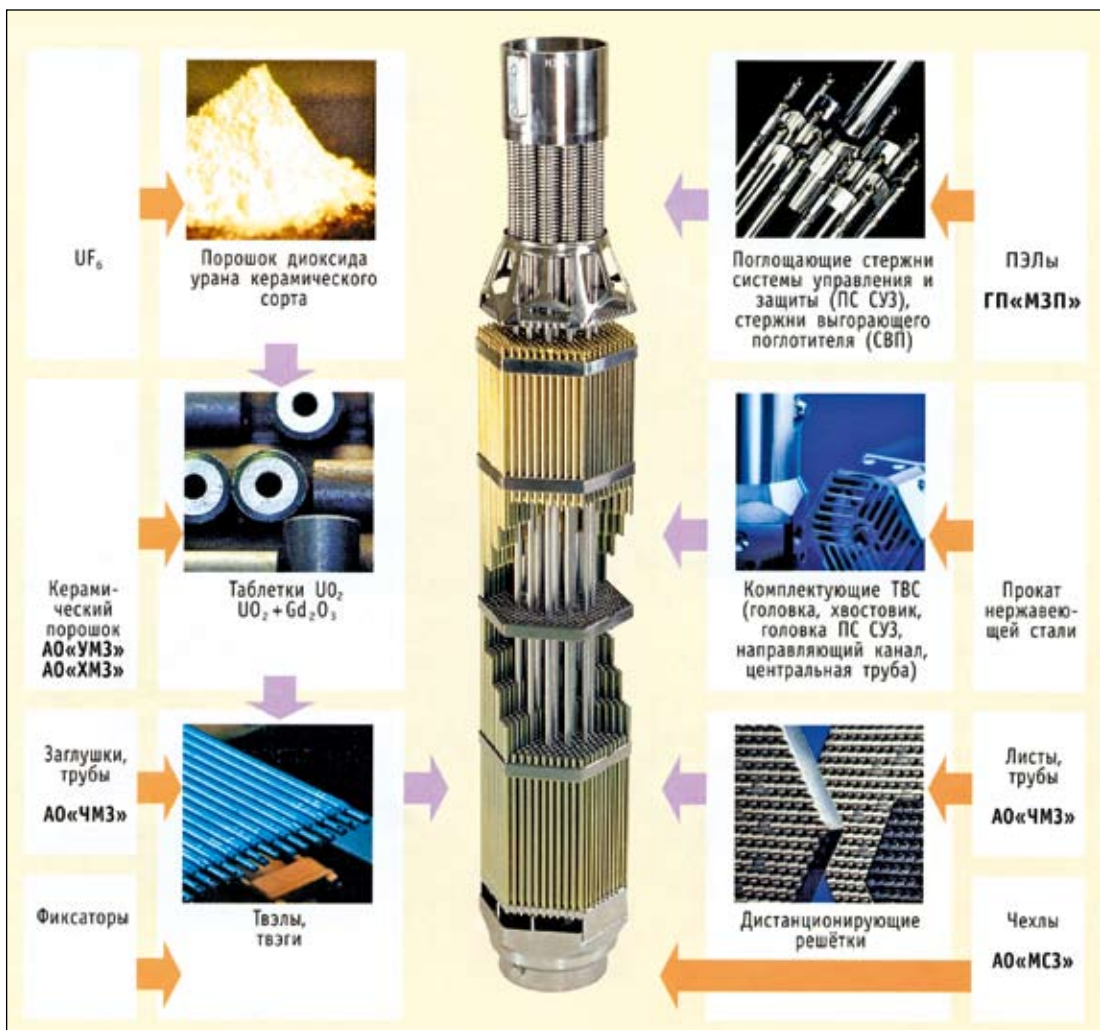
Отдельные стройки высокой готовности, такие как Балаковская-3 и Запорожская-4, были своевременно завершены и введены в действие. Но ряд объектов, находившихся на стадиях строительства, таких как Калининская-3, Балаковская-4, Южно-Украинская-3, Запорожская-5 и 6 оказались в полной неопределенности, и были достроены с опозданием от одного до пятнадцати лет.

Сложно восстановить, сколько проектов атомных электростанций было заморожено на этапах изыс-

кания, сооружения котлованов, фундаментов и других ранних стадиях развития. Естественно, что о закладке и дальнейшем строительстве АЭС не могло быть и речи в течение почти двадцати лет, и только в начале 21-го века на правительственном уровне появились предложения по дальнейшему развитию атомной энергетики России.

Масштабы ущерба, нанесенного стране, несравнимы ни с какими тайфунами и цунами. Еще большие потери понесли предприятия атомной промышленности и наука.

Тем не менее на сегодняшний день только в России, на Украине



и в Болгарии успешно работают 24 энергетических блока с атомными реакторами «ВВЭР-1000». В Иране, Китае и Индии, на базе российских проектов, создаются новые атомные электростанции. Провозглашенная в России политика удвоения атомной энергетики к 2025-му году также укрепляет оптимистический взгляд на данную проблему.

Ядерное топливо реактора «ВВЭР-1000»

Текущую деятельность атомной электростанции обеспечивает генерация тепла в активной зоне ядерного реактора, которая в вари-

анте «ВВЭР-1000» скомпонована из 163-х тепловыделяющих сборок – кассет (ТВС).

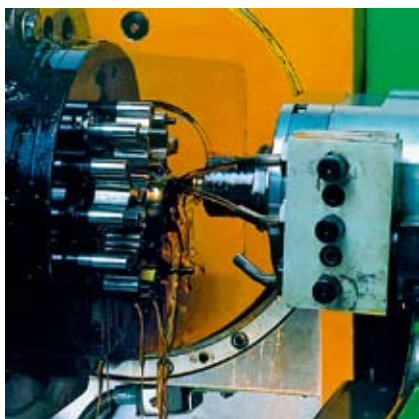
ТВС представляет комбинированное устройство в виде шестигранной призмы с размером «под ключ» 235 миллиметров и габаритной высотой более четырех метров.

Принципиальное устройство ТВС, ее основные составляющие и последовательность изготовления изображены на рисунке №20.

В состав конструкции ТВС входит набор из 312 тепловыделяющих элементов и 18 стержней исполнительного органа системы управления (СУЗ), объединенных несущим

Тепловыделяющая сборка реактора «ВВЭР-1000» и ее составляющие элементы

20

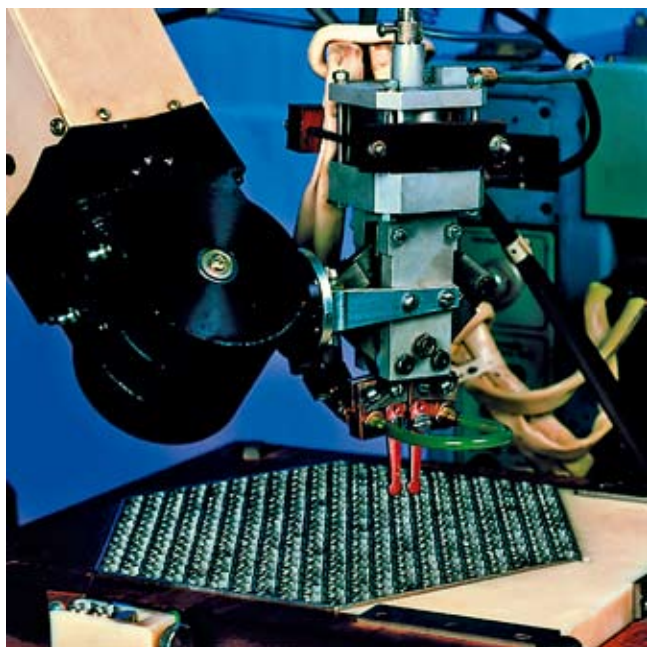


Обработка головки СУЗ

21

Роботизированный модуль сварки дистанционирующих решеток

22



23

Станки с программным управлением на изготовлении концевых узлов кассеты

каркасом. Каркас составляют 15 дистанционирующих и одна опорная решетка, связанные по вертикали трубами 18-ти направляющих каналов. На верхнем торце ТВС закреплена головка – пружинный компенсатор теплового расширения и радиационного роста, а на нижнем установлен хвостовик или фиксатор положения кассеты в корпусе реактора.

Из приведенной иллюстрации вполне очевидно, что большинство работ по изготовлению деталей и узлов кассеты базируется на традиционных способах обработки металлических материалов.

Специфические особенности имеет, в основном, технология рабочих тепловыделяющих элементов.

Конструктивно тепловыделяющий элемент представляет цилиндрический топливный стержень, набранный из таблеток диоксида урана в длину 3,5 метра и размещенный в герметичной защитной оболочке диаметром 9,15 миллиметра, выполненной в форме тонкостенной (0,6 мм.) трубки из циркония с двумя концевыми заглушками.

Промышленная технология тепловыделяющего элемента включает последовательный ряд операций подготовки топливной составляющей, изготовления деталей оболочки, их сборку, герметизацию, финишную обработку внешней поверхности, а также контрольную проверку и оценку технических характеристик.



Производство металлического циркония, выплавка сплавов, их пресование, прокатка, механическая и термическая обработка осуществляются на специализированном предприятии – Чепецком механическом заводе. На НЗХК поступают, главным образом, заготовки в форме листового, полосового и трубного проката и некоторые детали высокой степени готовности, такие как тонкостенные трубки и концевые заглушки оболочек.

Подготовка топливной составляющей твэлов

Собственный производственный процесс НЗХК берет начало с переработки исходного сырья – гексафторида обогащенного урана – UF_6 .

Гексафторид, поступающий с предприятий обогащения урана в баллонах, переводится из газообразного состояния в водный раствор азотной кислоты путем гидролиза, который объединяется с продуктами растворения оборотов и направляется на экстракционную обработку в форме: $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$

Контактируя с органической фазой, содержащей в своем составе трибутилфосфат, нитрат уранила взаимодействует с экстрагентом и приобретает формулу соединения $UO_2(NO_3)_2 \cdot ТБФ$, нерастворимого в воде и переходящего в органическую фазу, оставляя примеси в исходном растворе. Затем очищенный от примесей уран путем центробежной промывки переводится в водный раствор.

Из водного раствора уран осаждается в форме диураната аммония $(NH_4)_2U_2O_7$, который разлагается путем прокалки с последующим восстановлением водородом в диоксид урана. На заключительном этапе цикла химической переработки осуществляется усреднение состава и физического состояния порошка путем промежуточного прессования, дробления уплотненного материала и отсева по фракциям.



Узел подготовки растворов к экстракции

24



Каскад центробежных экстракторов

25

При осаждении из растворов, диуранат аммония кристаллизуется в форме дисперсного осадка, термическая обработка которого гарантирует наследственность мелкозернистой микроструктуры двуокиси урана вплоть до окончательной ее переработки в топливные таблетки. В свою очередь, такой характер структуры обеспечивает высокую стойкость и стабильность поведения таблеток под воздействием радиации.

Это подтверждают результаты обследования облученного топли-



Смеситель порошков.

26

Автоматизированный агрегат пресования таблеток

27



Конвейерная электрическая печь спекания топливных таблеток

28

Внешний вид готовых таблеток

29

ва НЗХК, регулярно проводимые в лабораториях радиационного материаловедения института «НИИАР». Из отчетов института следует, что размеры и форма топливных таблеток, вплоть до выгорания 45-50 мегаваттсуток на килограмм урана, сохраняют высокую стабильность.

Размер зерна вблизи оболочки, в средней и центральной части таблетки сохраняется на уровне 6-7 микрон, что указывает на стабильность технологии производства и отсутствие переформирования зерен в процессе эксплуатации. Газо-



выделение из топлива не превышает 2-3 процента от общего объема осколочных газов и давление гелия под оболочкой повышается от исходного уровня только на 7-8 процентов, что не ограничивает работоспособность твэлов и при более высоких выгораниях.

Последующая технология топливных таблеток включает смешивание порошков регламентированного фракционного состава с пластификаторами, что исключает их коагуляцию и придает необходимую текучесть. Они точно дози-

руются, легко и просто транспортируются перетоком на стадию пресования.

Прессование таблеток осуществляется на ротационных прессах в автоматическом режиме, включающем дозировку, раздачу по формам, уплотнение и выдачу компактных изделий.

Последующее высокотемпературное спекание осуществляется при нагреве и выдержке около 1600 градусов в атмосфере водорода. Спеченные таблетки подвергаются шлифованию по цилиндрической поверхности до заданной степени чистоты обработки и необходимых размеров.

В целом, технологические основы и аппаратное оформление процесса обеспечивают высокую производительность, точность изготовления, достижение заданных уровней качественных характеристик и четкую воспроизводимость всех конечных результатов.

Сборка и герметизация твэлов

Сборка, герметизация, внешняя обработка и контрольная оценка технических характеристик тепловыделяющих элементов представляют единый технологический поток. Он берет свое начало от слияния источников изготовления таблеток и обработки циркониевых деталей оболочки.

На начальной стадии процесса производится химическое травление трубчатых заготовок и концевых заглушек, которые затем устанавливаются и привариваются кольцевым швом к одному из торцов оболочки. Далее, оболочка поступает на стадию ее заполнения топливными таблетками.

Процесс снаряжения твэла включает программную дозировку таблеток, ориентацию и предварительный набор топливного столба длиной в 3,53 метра на ложементе. Затем топливный столб вибро-



Агрегат снаряжения твэлов топливными таблетками

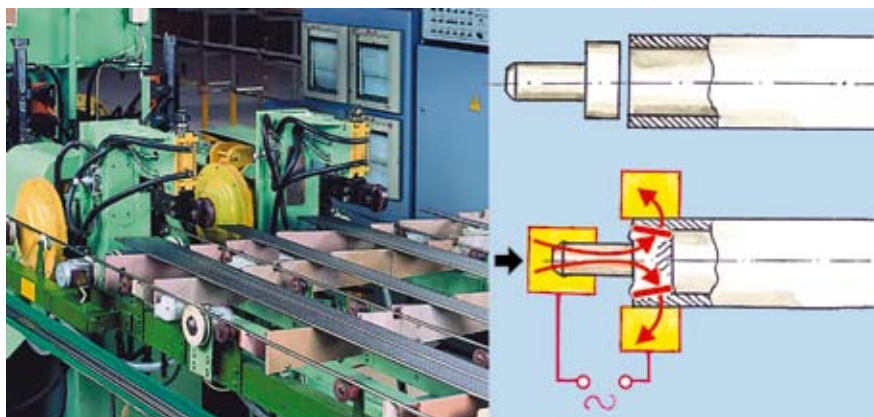
30

транспортером перегружается во внутреннюю полость оболочки и закрепляется в ней пружинным фиксатором. После снаряжения топливом оцениваются весовые характеристики твэла и он передается на следующий этап.

Заключительный этап процесса герметизации твэла, включающий несколько операций, проводится практически в едином автоматизированном агрегате. В рабочей камере этого аппарата последовательно осуществляется вакуумирование, заполнение оболочки гелием под давлением в 20 атмосфер и герметизация открытого торца оболочки заглушкой. Соединение заглушки с трубчатой частью достигается путем контактно-стыковой сварки, сущность которой состоит в следующем.

Заглушка в виде цилиндрической пробки, имеющая диаметр несколько больший, чем канал трубки, запрессовывается в него под осевым давлением с одновременным пропуском электрического тока через зону контакта свариваемых деталей. При этом контактирующие поверхности сопряженных деталей нагреваются до оплавления, а после снятия токовой нагрузки и кристаллизации металла образуют единый монолит.

Далее, скомпонованные твэлы



проходят цикл обработки внешней поверхности оболочки, которая включает химическое обезжиривание, травление, электрохимическое анодирование, промывку и сушку. Этот технологический цикл аппаратно оформлен в виде автоматической линии, включающей ряд агрегатов, последовательно связанных транспортером.

Заключительным аккордом данного передела является выходной контроль качества, который включает:

- оценку сплошности сварных соединений;
- измерение геометрических параметров;
- проверку состояния топливного столба по положению таблеток и фиксаторов, сплошности топливного столба, наличия сколов и осколков;

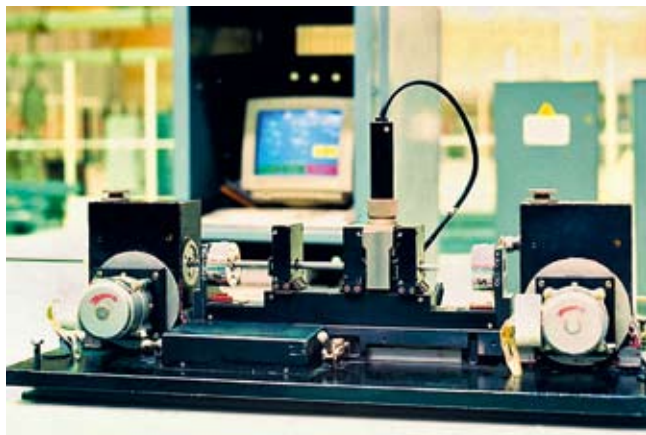
– визуальную оценку внешнего вида.

В данной работе используются технические средства, разработанные на основе новейших достижений в области дефектоскопии, метрологии, электроники, схемотехники и систематики.

Характеризуя современное состояние производства, вполне уместно вспомнить некоторые особенности предыдущего периода на пути развития конструкции, технологии и их практического воплощения.

Прототипом топливных элементов являлись аналоги уже действующего в то время энергетического водо-водяного реактора «ВВЭР-440», который использовался на ряде действующих АЭС России и стран восточной Европы. При разработке последующей модели учитывались показатели эксплуатации и устанавливалась их зависимость от конструктивных и технологических особенностей. Наибольшее внимание уделялось не только конструктивным особенностям, но и качественным показателям их исполнения. При этом учитывались и такие характеристики процесса, как сложность, длительность и трудоемкость операций, новизна технического исполнения, а также доля, форма и роль прямого человеческого труда, именуемая уровнем механизации и автоматизации.

В начале семидесятых годов при



эксплуатации топлива в реакторах ВВЭР-440 участились случаи нарушения герметичности твэлов в результате образования сквозных каверн в оболочке. При детальном обследовании облученных изделий в Курчатовском институте была обнаружена конкретная причина этого опасного явления и установлено, что плотность топливных таблеток этого периода составляла всего 80-90 процентов от ее теоретического значения. Было доказано, что повышенная открытая пористость диоксида урана способствует интенсивной сорбции влаги из атмосферного воздуха в период снаряжения твэлов и подготовки к герметизации.

В процессе работы твэла в реакторе при повышенной температуре топлива влага испаряется, а далее, контактируя с внутренней поверхностью оболочки, окисляет цирконий. Выделяющийся при этом водород взаимодействует с цирконием, образуя гидрид, который отслаивается и выкрашивается из стенки трубы за счет объемного расширения, и в результате образуются сквозные каверны.

Как средство исключения гидридного разрушения была введена в технологию вакуумная термическая сушка твэлов перед их окончательной герметизацией.

Практическая реализация такой операции требовала огромного парка вакуумных печей, была сопряжена со сложной и трудоемкой процедурой перегрузки и транспортировки изделий, а также значительно удлиняла суммарную продолжительность процесса.

Поэтому не проходила потребность в поиске других, более реальных, альтернативных решений. Исследованиями механизма сорбции атмосферной влаги было установлено, что с уменьшением открытой пористости спеченного диоксида урана, процесс поглощения влаги замедляется и, по достижении плотности материала



выше 90 процентов затухает практически полностью.

Таким образом, повышение плотности топливных таблеток выше 10,2 грамма на кубический сантиметр могло полностью устранить опасность гидридной коррозии, исключить вероятность разгерметизации твэлов в реакторах и значительно сократить время и трудоемкость процесса их изготовления. Но для этого требовалась реальная гарантия достижения требуемой плотности в полном объеме производства. Такая работа была выполнена, что обеспечило комплексное решение данной проблемы.

В перечень главных задач изготовителя ядерного топлива, наряду с исключением паразитных процессов, входят проблемы повышения эффективности топлива путем продления периода его работы в реакторе. Для выполнения этого условия, прежде всего, необходимо увеличение запаса делящегося изотопа в каждом отдельном тепловыделяющем элементе. Самым простым и единственным путем решения данной задачи являет-

*Оценка состояния
топливного столба*

33

ся повышение степени обогащения урана.

Однако простое увеличение концентрации значительно осложняет режим работы твэла, а именно в начальный период создается повышенная удельная нагрузка, ускоряющая «старение» твэла и преждевременную потерю работоспособности. Поэтому для компенсации энергетического всплеска к урановому топливу добавляются поглотители нейтронов. При этом поглотитель должен эффективно действовать на первых этапах работы и постепенно, по мере выгорания урана, снижать свою активность.

Такой особенностью обладает так называемый «выгорающий» поглотитель нейтронов - изотоп редкоземельного элемента гадолиний-157. При исходном содержании гадолиния в топливной смеси от трех до восьми процентов начальная степень обогащения урана может быть повышена с четырех до пяти процентов. При этом в начале кампании гадолиний замедляет скорость выгорания урана, поглощая значительную часть нейтронного потока. С течением времени, гадолиний выгорает, превращаясь в менее активный изотоп, а сохраненный исходный избыток урана включается в основной процесс деления.

Использование оригинальной особенности гадолиния явилось одним из главных условий перевода ядерного топлива с трех - на четырехгодичную кампанию его эксплуатации.

Следующая проблема в технологии твэлов была связана с необходимостью сокращения цикла герметизации защитной оболочки. Оболочка первых модификаций твэлов выполнялась в так называемом четырех-шовном варианте.

Для улучшения условий теплопередачи от топливного столба к оболочке свободное пространство полости твэла заполняется гели-

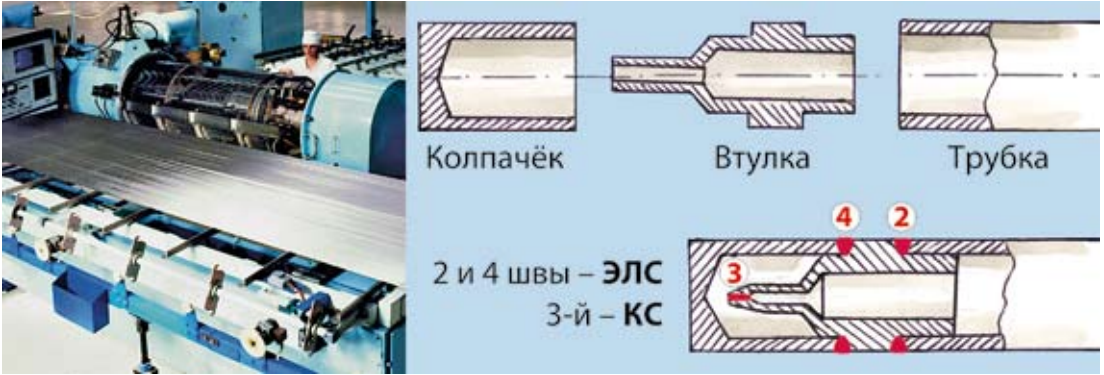
ем под давлением в 20 атмосфер. Процесс наполнения инертным газом проводится перед конечной стадией герметизации оболочки. С этой целью в открытый конец циркониевой трубки впрессовывают и электронным лучом приваривают ступенчатую переходную втулку.

Затем, после вакуумирования и наполнения оболочки гелием подводящий патрубок переходной втулки пережимается с одновременным пропусканием электрического тока через зону деформации. При этом стенки осевого канала патрубка оплавляются и монолитно свариваются.

В целом, данная процедура складывается из четырех основных рабочих операций и многочисленных вспомогательных действий, связанных с загрузкой, выгрузкой и транспортировкой изделий между тремя технологическими агрегатами: двумя машинами электронно-лучевой и агрегатом контактной сварки.

Таким образом, в окончательном виде защитная оболочка твэла первоначально имела четыре сварных соединения: первый кольцевой шов на стыке трубки с нижней заглушкой, второй кольцевой на границе трубки с переходной втулкой, третий точечный на патрубке и четвертый кольцевой на стыке втулки и защитного колпачка.

Разработанная во ВНИИНМ технология и оборудование контактно-стыковой сварки послужили основанием к упрощению и значительному сокращению технологического цикла герметизации обновленной конструкции твэлов двухшовного варианта. Но даже двухшовная конструкция твэла имеет суммарную протяженность сварочного соединения около 6 сантиметров на одной оболочке. Если условно сложить и подсчитать суммарную протяженность швов на твэлах годичного выпуска, то получится внушительная величина, около 25 километров.



А для четырехшовного варианта она составляла 50 километров.

И на всем этом внушительном расстоянии практически не встречаются даже мелкие, микроскопические трещинки, раковинки или шлаковинки. Наверное, на пятидесяти километровом перегоне самой лучшей современной российской автомобильной трассы, можно насчитать большее число выбоин, ухабов, промоин и кочек. Современная атомная промышленность работает намного аккуратнее и ответственнее, чем любая дорожная служба.

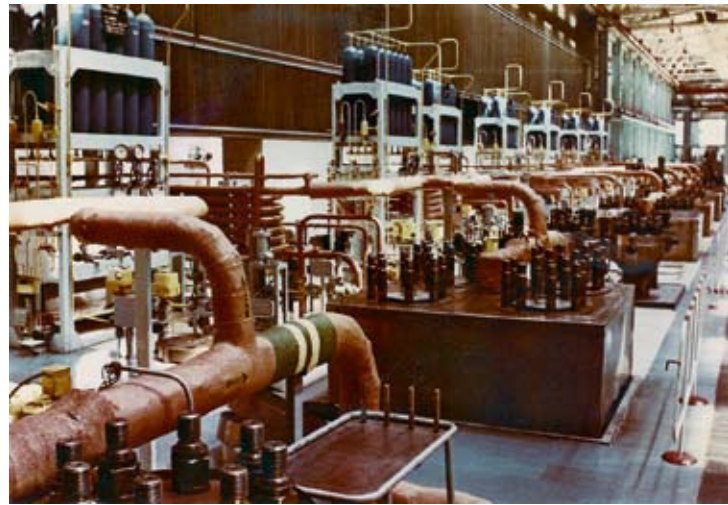
В число наиболее громоздких и трудоёмких этапов производственного процесса входила технология гидротермального оксидирования оболочки твэлов. Она проводилась путем многочасовой выдержки изделий в воде высоких параметров, а именно при нагреве до 350-ти градусов под давлением в 160 атмосфер. При этих условиях за время обработки в течение 70-ти часов на поверхности металлического циркония формировалась пленка двуокиси циркония толщиной в 5-10 микрон.

Обладая высокой твердостью и исключительной химической стойкостью, плотное оксидное покрытие защищает оболочку твэла как от механических повреждений в процессе монтажа и транспортировки кассет, так и от коррозионного разрушения при работе в активной зоне ядерного реактора.

Именно для обеспечения высокой надежности и защищенности твэлов создавался громоздкий по оснащению, обширный по площади, по простиранию в высоту и глубину передел обработки в автоклавах, представленных на рисунке №35. Комплекс работ по обслуживанию передела состоял из бесчисленного множества операций транспортировки, перегрузки, герметизации

Схема герметизации оболочки твэла четырех-шовной конструкции и агрегат электроно-лучевой сварки кольцевым швом.

34



и вскрытия автоклавов, набора и сброса газового давления и ряда других действий аналогичного характера, требующих огромных затрат труда и времени персонала.

Проведя комплексные исследования строения и свойств оксидных пленок различного формирования, металловеды обнаружили,

Прежний участок автоклавной обработки твэлов

35

что идентичным и равноценным качеством обладают оксидные покрытия циркония, полученные методом электрохимического оксидирования. Именно эта простая технология была реализована взамен трудоемкой гидротермальной обработки.

Компоновка тепловыделяющей сборки

Процесс изготовления собственно тепловыделяющей сборки складывается из ряда последовательных этапов, включая комплектацию несущего каркаса, формирование пучка тепловыделяющих элементов, установку концевых узлов и группной поглощающих стержней системы управления.

Несущий каркас кассеты состоит из пятнадцати дистанционирующих решеток, закрепленных с постоянным шагом на центральной трубе и восемнадцати трубчатых направляющих каналах, зафиксированных в нижней опорной решетке.

Топливный пучок комплектуется из 312 твэлов, центрируемых упругими ячейками дистанционирующих решеток и зафиксированных конечниками в гнездах опорной решетки. Установка твэлов в ячейки дистанционирующих решеток осуществляется путем последовательного проталкивания, поэтому для предотвращения задигов на поверхности оболочки она предварительно покрывается слоем органической смазки – поливинилового спирта.

После набора пучка на нижнем торце кассеты крепится хвостовик – конструктивный узел, обеспечивающий центровку и фиксацию кассеты в корпусе реактора. На верхнем торце устанавливается пружинная головка – компенсатор теплового удлинения деталей конструкции и комплект регулирующих стержней.

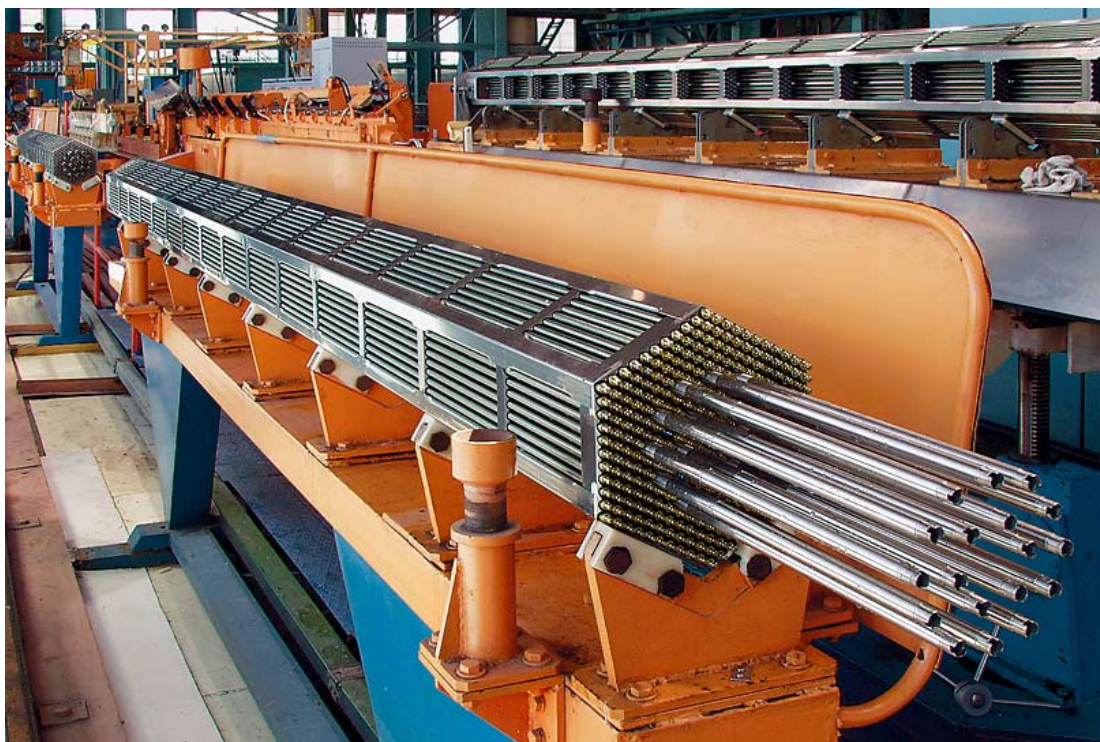
Эффективность ядерного топлива обеспечивается многими факторами, в числе которых ведущую

роль занимает длительность эксплуатационного периода и глубина выгорания рабочего изотопа. Ряд способов решения данной задачи уже излагался в предыдущих разделах. К ним были отнесены меры по повышению обогащения за счет использования выгорающих поглотителей, повышение надежности герметизации оболочки твэлов, улучшение структуры и свойств топливных таблеток и некоторые другие.

Конструктивные особенности самой тепловыделяющей сборки также играют немаловажную роль в достижении главного итогового результата, поэтому первичная конструкция ТВС за истекший период была подвержена целому комплексу изменений и усовершенствований.

Каркас первой модели ТВС выполнялся из нержавеющей стали, главные компоненты которой – железо, никель, хром и титан обладают весьма значительными коэффициентами захвата тепловых нейтронов и являются паразитными по отношению к цели основного процесса. Со временем, а именно с 1992 года, материал всех узлов каркаса был заменен на цирконий – металл с незначительным показателем поглощения нейтронов и более высокой коррозионной стойкостью. В сочетании с выгорающим поглотителем и рядом других усовершенствований, эта мера обеспечила последовательное и ритмичное освоение четырехгодичной кампании эксплуатации топлива взамен 2 – 3 годичной предыдущей конструкции ТВС.

Существенную роль в проблеме сохранения длительной работоспособности кассеты выполняют такие характеристики, как прочность, геометрическая стабильность и виброустойчивость всех элементов конструкции. Так даже незначительные искривления направляющих каналов в миллиметры на метр длины повышают сопротивление падению



стержней аварийной защиты и создают реальную угрозу перегрева активной зоны. Изменения величины зазоров и шага расположения твэлов приводят к возмущению потока теплоносителя, искривлению температурных полей и создают условия для развития локальных дефектов со значительными и весьма опасными последствиями.

Применение единого материала в конструкции кассеты частично локализует подобные явления, но не дает полных гарантий. Проблема «живучести» кассеты практически неисчерпаема, она неотрывно преследует процесс развития на всех его стадиях. Поэтому и проблема совершенствования ядерного топлива имеет непрерывный характер.

В данном направлении конструкторская мысль только за последние годы предложила и реализовала несколько новых модификаций. Наиболее интересными и полезными вариантами из данной серии разработок являются два

решения, получившие ничего не говорящие наименования «ТВСА» и «ТВС-2».

Основная отличительная особенность этих модификаций выражена в жесткости несущего каркаса. В варианте кассеты «ТВСА» повышенная жесткость, как средство сопротивления деформирующим нагрузкам и внутренним напряжениям, обеспечивается применением шести дополнительных продольных угловых ребер, приваренных к обечайкам дистанционирующих решеток.

Второй вариант конструктивного решения, именуемый «ТВС-2», в отличие от «ТВСА», не содержит дополнительных крепежных деталей. Повышение его жесткости достигается за счет сварки ячеек дистанционирующих решеток с центральной трубой каркаса и стенками труб направляющих каналов.

Новые научные разработки, исследования и испытания являются постоянными спутниками действующего производства. В противном

Кассета повышенной жесткости «ТВСА» в стадии монтажа

36



Каркас кассеты «ТВС-2» в процессе сварки

37

38

Динамика роста кампании эксплуатации топлива по мере ввода и освоения АЭС с реактором «ВВЭР-1000»

случае оно быстро стареет морально, утрачивая свою эффективность и экономическую привлекательность.

За период, истекший со времени пуска первого блока с реактором «ВВЭР-1000» на Ново-Воронежской АЭС в 1980 году, проведен значительный комплекс работ по обеспечению эффективности и конкурентной способности данного направления атомной электроэнергетики. В качестве примера на рисунке №38 приведено графическое отображение динамики роста кампании эксплуатации ядерного топлива, как коренного показателя. Следуя канонам освоения новой техники,

пуск реакторов и ввод в режим промышленной эксплуатации начинался с минимальной, двухгодичной кампании с поэтапным переходом на более длительные режимы. При этом условии переход единичного реактора с двух до четырехлетнего режима составляет всего пять лет. Для большой группы последовательно вводимых агрегатов, которая превысила 20 единиц, суммарное время полного освоения затягивается на более длительный период.

В нашем конкретном случае, для полного освоения четырехлетней кампании затрачено около 20 лет. Практический период освоения, начатый в 1980, завершился только в 2000-м году с пуском первого блока Волгодонской АЭС непосредственно в режиме четырехгодичной эксплуатации.

Степень полезности ядерного топлива по количеству вырабатываемой энергии принято называть «выгоранием» и выражать в мегаваттсутках на килограмм использованного горючего. В переводе на привычные единицы мегаваттсутки равны 24-м тысячам киловатт-часов и соответствуют расходу электроэнергии на полное обеспечение одного американца за два года,





россиянина за три с половиной года, китайца за 41 год, а индуса почти всю жизнь.

Вполне очевидно, что с ростом «выгорания» сокращаются удельные расходы топлива при производстве энергии и соответственно затраты природного урана, конструкционных материалов: циркония и нержавеющей стали, а также труда.

Так последовательно, шаг за шагом, а отдельные шаги, особенно сопряженные с проверкой и реакторными испытаниями, занимали годы, создавалась, развивалась и совершенствовалась технология промышленного производства.

Сегодня реакторы «ВВЭР-1000» еще молодые, с максимальным сроком работы 20-25 лет, но с течением времени они постареют и морально и физически.

Под влиянием жестких условий работы начнут изменяться размеры и будет искажаться форма ответственных узлов активной зоны. При этом возникнет деформация корпуса реактора, увеличится гидравлическое сопротивление водоводов и арматуры главного контура, снизится четкость замера рабочих параметров исполнительных механизмов и приводов систем управления.

Все подобные отклонения оказывают прямое влияние на надежность и устойчивость работы тепловыделяющих элементов и сборок. Традиционно, большинство отклонений и неполадок в активной зоне списывается на топливо. Поэтому со старением реакторов будут возрастать нагрузки не только на технику, но и на производителей топлива, органы контроля качества, а также исследователей, разработчиков и конструкторов кассет и технологий их производства.

Обычно первая половина гарантийного срока службы новых моделей ядерных установок изобилует непрерывным рядом достижений. Ритмично возрастает мощность и продолжительность рабочей кампании, увеличивается выгорание топлива и сокращаются его удельные расходы с параллельным снижением технических неполадок и внеплановых остановок.

С течением времени достигается уровень апогея, соответствующий заложенному в основу принципу действия и предельным возможностям всей материальной основы, а затем проявляются уже перечисленные эффекты возрастного старения. В этой ситуации основные усилия будут затрачиваться не на

Производство ТВС ВВЭР-1000



Динамика развития производства ТВС

40

возрастание, а на текущую поддержку ранее достигнутого уровня.

Как уже отмечалось ранее, начиная с 1980-го атомная энергетика нашей страны стала набирать значительные темпы строительства и освоения АЭС с реакторами «ВВЭР-1000». Через четыре-пять лет, необходимых для проведения строительства и монтажа блока, ежегодный пуск новых агрегатов достиг трех единиц в год. Последствия Чернобыльской аварии вызвали длительную отсрочку в этой важнейшей хозяйственной сфере, но с учетом достройки к 1995 году действовало уже 20 блоков в России, на Украине и в Болгарии.

Параллельно со строительством АЭС развивались мощности по производству ядерного топлива. Представленная графически на рисунке №40 динамика производства показывает, что в течение десятилетия Новосибирский завод химконцентратов достиг годовой производительности почти в 2000 ТВС. Этот выпуск превосходил все текущие потребности, и значительная часть готовых кассет хранилась как гарантийный государственный резерв.

На рубеже девяностых годов, в период провозглашения независимости бывших Союзных республик

СССР, в собственности Украины, осталась значительная часть стратегического вооружения, в том числе и атомного. Вскоре Украина произвела демонтаж атомных бомб и продала России извлеченный из них оружейный уран высокого обогащения. Объемы, цены и условия этой сделки в печати не публиковались, но по некоторым косвенным признакам это была крупная торговая операция. Как было принято в то кризисное время, взаимные расчеты проводились на бартерной основе. В качестве валюты за оружейный уран Россия расплатилась с Украиной ядерным топливом, а конкретно тепловыделяющими сборками «ВВЭР-1000» государственного резерва, изготовленными ранее на НЗХК. В это время из двадцати действующих блоков «ВВЭР-1000» на Украине работало десять и, получив такое наследство, украинская сторона стала полностью обеспеченной ядерным топливом на ближайшую пятилетку и прекратила договорные сделки с 1990-го по 1995-й год.

На приведенной диаграмме рисунка №40 этот период виден как огромный провал в деятельности нашего предприятия. Текущее производство ограничилось только

потребностями собственных АЭС и атомной энергетикой Болгарии. И только спустя пять лет тяжелейшего экономического кризиса, объемы производства начали подниматься до среднего уровня. И этот уровень сохраняет свою стабильность вот уже больше десятилетия из-за длительного застоя в развитии атомной энергетике всего Мира после Чернобыльской аварии.

За прошедший полувековой период своего развития атомная энергетика обрела высочайший уровень развития техники и технологии, достигла превосходной степени экономической эффективности. Поэтому в последние годы возродился и непрерывно возрастает во всем Мире интерес к этому богатейшему источнику энергии. Авторитетные прогнозы последнего времени обосновывают значительный прирост мощности атомных электростанций в ближайшие годы.

В том числе и Россия, являясь богатейшим обладателем природных ресурсов органического топлива, планирует дальнейшее интенсивное развитие собственной ядерной энергетике и активное участие в международных проектах. В этих условиях, естественно, возрастут потребности ядерного топлива, а с ними и значимость топливного цикла.

На основе непрерывного многолетнего творческого труда технологов, научных работников, конструкторов, изобретателей, организаторов и руководителей производства, на Новосибирском заводе химконцентратов создан современный промышленный потенциал перспективного развития топливной базы.

Комплекс научных и конструкторских разработок, обеспечивших успешное создание, развитие и совершенствование промышленного производства тепловыделяющих элементов и ТВС реактора «ВВЭР-1000» был отмечен Государственной Премией СССР в 1988 году.



Производственная база энергетического топлива

41



Фасад промышленного комплекса по производству ядерного топлива энергетических реакторов «ВВЭР»

42

Исследовательские атомные реакторы

43

Исследовательский ядерный реактор «ИРТ» в сочетании с аппаратурой текущих физических экспериментов

В начале шестидесятых годов начали формироваться новые производственные подразделения, специализированные на выпуске продукции для нужд развивающейся атомной энергетики. В то время на базе достижений отечественной

науки и практики разрабатывались и проектировались атомные электростанции большой мощности. Широким фронтом велись исследования принципиально новых схем энергетических установок. Осуществлялась разработка и проверка надежных конструкций тепловыделяющих элементов, средств управления и защиты атомных реакторов, поиск и испытания новых реакторных материалов.

Для проведения комплексных прикладных исследований по атомной энергетике создавались специализированные исследовательские атомные реакторы. В активных зонах этих уникальных инструментов проводились радиационные испытания образцов новых материалов и изделий, изучались физико-химические явления в сложных условиях облучения, термического и механического воздействия под радиацией.

Принципиально исследовательский реактор представляет генератор интенсивного нейтронного потока, который является главным рабочим средством исследователя. Наряду со специализированными научными работами по материаловедению и ядерной физике, исследовательские реакторы используются учеными в области медицины, биологии, агротехники, а также в технических областях дефектоскопии, метрологии и целом ряде других научных направлений.

Обычно такой реактор содержит водоохлаждаемую критическую активную зону, собираемую по определенной схеме из тепловыделяющих элементов и их комбинаций, называемых тепловыделяющими сборками (ТВС).

Изготовление рабочих твэлов и тепловыделяющих сборок для большой группы исследователь-



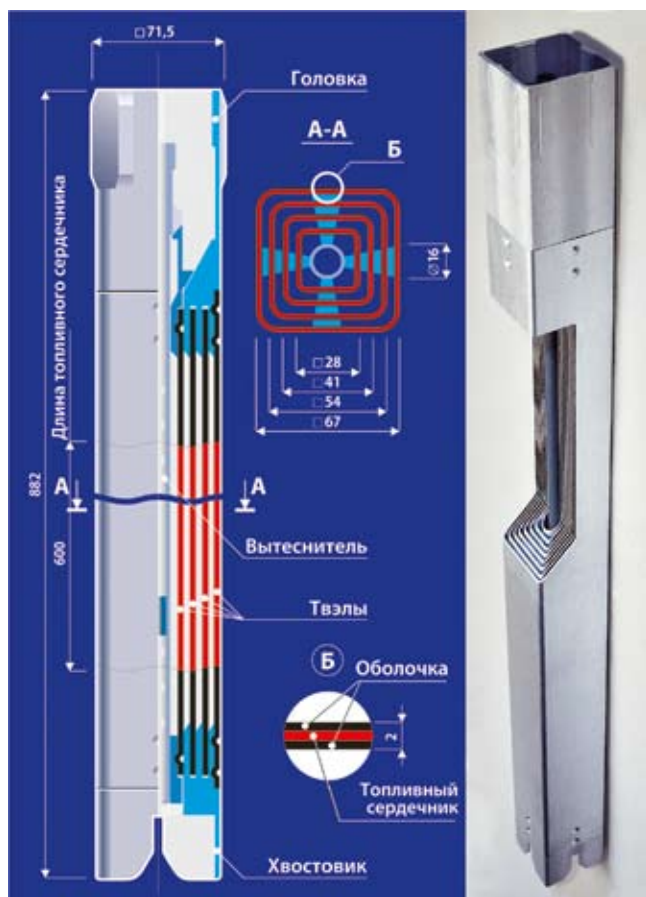
ских реакторов отечественной конструкции было организовано в первой половине шестидесятых годов на базе НЗХК. В указанный период такие системы исследовали во всех крупных ядерных научных центрах России, во многих столицах союзных республик, почти во всех социалистических странах восточной Европы, в ряде стран Азии и Ближнего Востока.

Исследовательский реактор, как инструмент ученого должен обладать широким регулируемым спектром физических характеристик нейтронного потока и обеспечивать возможность проведения оригинальных научных экспериментов, зачастую в сложных и необычных условиях.

От активной зоны реактора требуются высокие уровни удельной мощности, широкий диапазон регулирования параметров, стабильность работы и полная гарантия безопасности. Именно эти условия, прежде всего, должны обеспечиваться свойствами и качественными характеристиками применяемого ядерного топлива. В соответствии с целями и задачами ядерных исследований, выбор топлива базируется на композиционных материалах с высокой концентрацией рабочего вещества.

Активная зона исследовательского реактора представляет систему тепловыделяющих сборок, составленных из коаксиального набора трубчатых тепловыделяющих элементов, скрепленного дистанционирующими деталями и установочными приспособлениями. Одна из разновидностей тепловыделяющих сборок для исследовательского реактора «ИРТ» приведена на рисунке № 44, где изображен четырехтрубный пакет твэлов, установленных с зазорами для прохода потоков охлаждающей воды.

Каждый единичный тепловыделяющий элемент любой ТВС реак-



торов данного класса представляет трубу круглого или многогранного сечения с трехслойной стенкой, состоящей из среднего активного слоя и двух внешних покрытий, образующих защитную оболочку.

При работе реактора в активном объеме твэла, содержащем уран-235, развивается процесс ядерного деления с формированием потока нейтронов, образованием осколочных элементов и выделением тепла. В данном случае и накопление радиоактивных осколков и тепловыделение представляют неизбежные побочные явления, требующие локализации. Именно эту роль и выполняют защитные оболочки, задерживающие осколочные элементы и отводящие тепловую энергию, сохраняя активную зону от перегрева.

Схематичный чертеж и общий вид с разрезом тепловыделяющей сборки реактора «ИРТ»

На основе конкретных условий работы и их конечного результата разрабатывается конструкция твэлов и осуществляется подбор материалов для их практического исполнения. Из реальных условий следует, что защитные оболочки должны обладать надежной герметичностью, высокой теплопроводностью, достаточной прочностью и коррозионной стойкостью, а также определенными ядерно-физическими свойствами. Таким условиям в наибольшей степени отвечают алюминиевые сплавы, легированные железом, кремнием, титаном и рядом других компонентов, которые нашли свое применение и используются на протяжении уже многих лет.

Более богатую и разнообразную биографию имеют топливные материалы, поскольку на их основе базируются главные рабочие характеристики реакторов и конечные результаты научной деятельности.

В начальный период развития экспериментальной техники данного класса в качестве топлива были разработаны и применены сплавы обогащенного урана с алюминием.

Бинарные сплавы данной системы, содержащие до 30-35 весовых процента урана, по многим ядерно-физическим показателям отвечают требованиям реакторной техники и обладают достаточно высокой технологичностью в процессе их получения и обработки. Высокая радиационная стабильность и коррозионная стойкость обеспечивают длительную, надежную и безопасную работу в реакторе.

Тем не менее, на определенном этапе развития сплавы исчерпали главные ресурсы своих возможностей, что вызвало необходимость поиска других, еще более совершенных материалов данного класса.

В начале семидесятых годов, исходя из практического опыта испытания, производства и применения ядерного топлива, пред-

почтение в выборе было отдано композиционному металлокерамическому материалу. Этот опыт базировался на основах эксплуатации металлического урана в уран-графитовых реакторах и керамического топлива ядерных, энергетических установок.

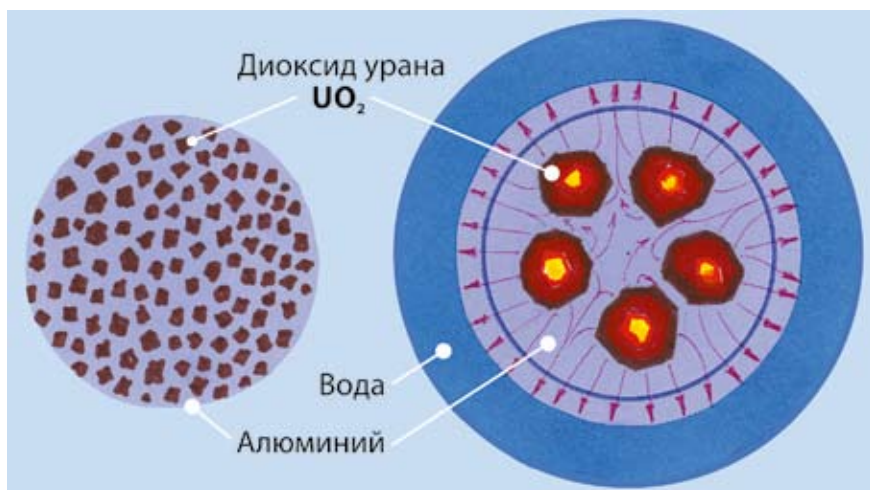
Металлы обладают относительно высокой прочностью в сочетании с пластичностью и, как правило, хорошей теплопроводностью. Однако их рабочий температурный диапазон бывает зачастую ограниченным из-за фазовых переходов и оплавления. Кроме того, металлы, содержащие в своем составе уран, быстро и глубоко поражаются эффектами ядерного деления, теряя прочность, форму и плоскость.

В аналогичных условиях многие керамические материалы отличаются тугоплавкостью, высокой структурной четкостью и геометрической стабильностью. Но они в свою очередь, как правило, твердые, хрупкие и менее теплопроводные, чем металлы.

Исходя из противоречивости свойств, и создавались композиционные материалы для сочетания полезных характеристик компонентов и максимальной локализации их недостатков.

Металлокерамики по своему строению, представляют механические дисперсные смеси, подобранные и обработанные с целью сочетания нужных благоприятных характеристик их компонентов. В качестве топливной композиции твэлов для исследовательских реакторов российской конструкции была разработана и принята металлокерамика на основе механической смеси двуокиси урана и металлического алюминия.

На рисунке №45 изображена в увеличенном масштабе двухфазная структура материала, полученного смешиванием и спеканием дисперсной крупки диоксида урана с порошком металлического алюминия.



Структура металлокерамического ядерного топлива и схема теплопередачи в процессе ядерного деления

45

Производство топливной металлокерамики

Процесс переработки урана берет начало от гидролиза гексафторида и проходит путь до превращения в оксидную форму в полном соответствии с изложенной ранее технологией энергетического топлива. Аналогично, уран проходит стадии экстракционной очистки от примесей, реэкстракцию, осаждение полиуранатов и их прокалку с переводом в оксидное состояние.

Далее, пути этих двух аналогов приобретают определенную индивидуальность. Энергетическое топливо в виде дисперсной двуокиси смешивается с пластификаторами и перепрессовывается в таблетки, которые после высокотемпературного спекания и шлифования поступают на снаряжение твэлов.

В отличие от этого варианта, для получения металлокерамики спрессованная в гранулы и спеченная двуокись урана подвергается дроблению на крупку и рассеивается на фракции по крупности. Далее, дробленая двуокись с заданной крупностью в пределах от 60 до 200 микрон проходит ряд дополнительных операций подготовки к смешиванию с алюминием.

Непосредственно перед подготовкой шихтовой смеси, урановая

составляющая подвергается регламентированному окислению. При нагревании на воздухе до температуры в 200-250 градусов поверхностные слои дисперсных частиц окисляются до промежуточного состояния по содержанию кислорода, соответствующего химической формуле $UO_{2,05-2,15}$ вместо стехиометрического состава UO_2 .

Необходимость такой обработки продиктована химическими свойствами компонентов металлокерамики. При повышенных рабочих температурах твэла возможно развитие процесса химического взаимодействия между двуокисью урана и металлическим алюминием, приводящего к восстановлению урана с образованием интерметаллических соединений: UAl_2 , UAl_3 и UAl_4 . Этот процесс сопровождается резким местным изменением объема, что может приводить к разрыхлению топлива с образованием трещин и вздутий, выходящих на открытую поверхность.

Как следствие, вызываемые этим нарушения геометрической стабильности затрудняют условия охлаждения и ведут к перегреву и прогару твэлов. А далее, в разрушительный процесс включается химическая агрессия теплоносителя, выводящая систему из рабочего состояния.

При наличии избытка кислорода, межфазное взаимодействие компонентов системы по реакции: $UO_{2,15} + 0,1 Al = UO_2 + 0,05 Al_2O_3$ заканчивается образованием на границах фаз тонкой и плотной пленки оксидов алюминия и урана со структурой типа шпинели, которая предотвращает дальнейшее развитие этого разрушительного процесса.

На следующих этапах технологического процесса крупка двуокиси урана смешивается с расчетным количеством алюминиевого порошка. Смесь пропитывается раствором органического пластификатора и спрессовывается в цилиндрическое втулочное шашки. Затем в условиях термовакuumной обработки проводится отгонка компонентов технологической смазки и спекание до монолитного состояния.

На данной и ряде последующих стадий формирования и обработки металлокерамики существенную роль приобретают некоторые побочные явления. Технические порошки металлического алюминия имеют развитую поверхность, покрытую тончайшим слоем окислов. Оксид алюминия при контакте с водой или водяными парами взаимодействует, образуя кристаллогидраты типа $Al_2O_3 \cdot nH_2O$, термически устойчивые при нагревании вплоть до 600 градусов. Поэтому для достижения необходимой степени дегазации при спекании прессованных порошков процесс проводится при прогреве почти до порога плавления алюминия, а именно до 620-640 градусов.

В таких экстремальных температурных условиях и глубоком вакууме удаляется не только гигроскопическая влага, но и летучие продукты разложения органических пластификаторов, кристаллогидратов, а также водорода, растворенного в металле.

Глубокая дегазация материалов является непременным условием качества твэлов, определяющая их

работоспособность. В любом случае накопления газов в активном объеме твэлов как химического разложения (водород), так и осколочного происхождения (аргон, ксенон) повышается внутреннее давление под защитной оболочкой. При проявлении на оболочке вздутий нарушаются условия теплопередачи одновременно и через стенку оболочки, и с ее поверхности к теплоносителю, возникают местные перегревы с тяжелыми последствиями.

Металлокерамика на алюминиевой основе, прошедшая самую жесткую термическую обработку в глубоком вакууме, сохраняет повышенную химическую активность по отношению к воде в любой из форм ее проявления. Существенную опасность создает и обычная сырость, и влажность технологических смазок, и водяные пары окружающей атмосферы. Например, металлокерамика весьма чувствительно реагирует на обычные природные изменения атмосферной влажности.

В воздухе морозных зимних периодов содержание паров воды составляет 2-4 грамма на кубический метр, а в жаркие летние месяцы это значение возрастает до 40-45 граммов. Такие колебания влажности воздуха четко отслеживаются металлокерамикой, что создает дополнительные трудности в работе летнего периода. При наличии даже небольших остатков кристаллизационной воды, при нагревании герметичного твэла, как в процессе его производства, так и при эксплуатации в реакторе, влага взаимодействует с алюминием, окисляя его по реакции: $2Al + 3H_2O = Al_2O_3 + 3H_2$ с выделением газообразного водорода.

В свою очередь, водород, диффундируя из металлокерамики, концентрируется под оболочкой, образуя пузыри и вздутия. В процессе производства это явление, зачастую, приводит к браку, а при эксплуатации твэлов к ее прекращению.

Таким образом, обогащенный уран, получаемый с переделов химической технологии в форме двуокиси, в дальнейшем проходит еще несколько последовательных этапов физико-механической обработки.

По целевому признаку, первый этап заключается в формировании «крупки» двуокиси урана с заданными физическими параметрами по форме, плотности, крупности и состоянию открытой поверхности. В его состав входит усреднение состава, смешивание с пластификаторами, грануляция, спекание, дробление и рассев на фракции по крупности.

На следующем этапе осуществляется изготовление собственно металлокерамики путем смешивания крупки двуокиси урана с порошком металлического алюминия аналогичной крупности. Образованная шихтовая смесь спрессовывается, дегазируется, спекается и подвергается окончательному уплотнению путем горячего прессования под высоким давлением в форму цилиндрических шашек.

Далее по ходу технологического процесса металлокерамика, полученная в виде спеченных и глубоко дегазированных втулочных шашек подвергается горячей деформации прессованием в толстостенные трубы. Затем трубы разрезаются на мерные втулки, которые путем токарной обработки, травления и очередной высокотемпературной вакуумной дегазации превращаются в «активные заготовки».

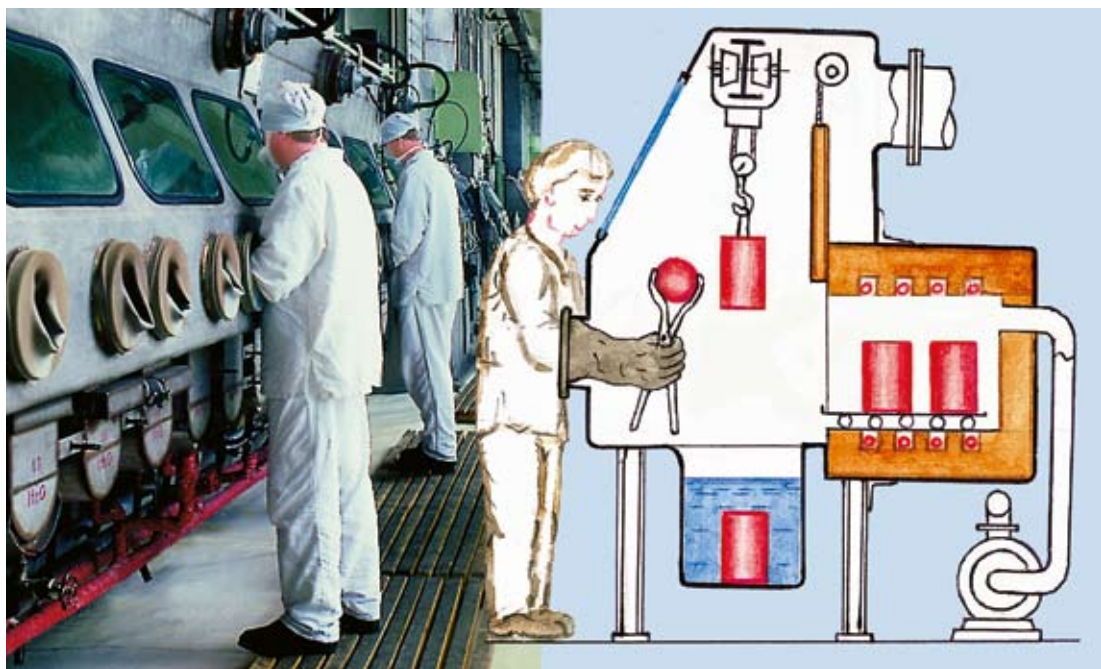
Все рабочие операции, связанные с переработкой обогащенного урана в любой форме, начиная от подготовки композиционных материалов до изготовления полуфабрикатов и изделий, проводятся в специализированных боксах, изолирующих обрабатываемые предметы от исполнителя. Каждый индивидуальный бокс представляет герметичную камеру, снабженную системами наблюдения, контро-

ля, управления процессом, а также средствами исполнения ручных операций. Для наблюдения и проведения работ в боксах предусмотрены смотровые застекленные окна и контрольная аппаратура с выводом информации на показывающие приборы и системы автоматического управления. Непосредственное участие человека в технологическом процессе осуществляется только с помощью перчаточных манипуляторов или средств дистанционного управления всеми исполнительными механизмами.

Индивидуальные боксы обычно выстраиваются в виде линий, соответствующих технологическим процессам и объединяются, образуя рабочую зону. Параллельно и изолированно от нее располагается операторская зона, из которой осуществляется вся работа по управлению производственными процессами. Также параллельно, но с другой стороны рабочей зоны, располагается все основное технологическое оборудование таким образом, что рабочие органы всех агрегатов входят в боксированное пространство.

В боксы герметично встраиваются загрузочные люки термических печей, рабочие цилиндры и опорные столы прессов, суппорты и патроны токарных и фрезерных станков и исполнительные органы целого ряда других машин и механизмов. Простое и малогабаритное оборудование, как дробилки, сита, тельферы, химические емкости, весы, измерительные приборы и многие нестандартные устройства, зачастую, целиком размещаются в полости боксов. При этом кинематическая связь рабочих органов с приводными механизмами осуществляется посредством валов или штоков, проходящих через уплотнительные устройства в стенках боксов.

Для перемещения материалов по операциям процесса на стыках боксов предусмотрены шлюзовые



Общий вид операторской зоны боксовой технологической линии.

Справа: бокс термической обработки с нагревательной печью, ванной охлаждения и подъемным тельфером

46

камеры. Загрузка в рабочую зону материалов, химикатов и инструментов, а также их выгрузка осуществляется через торцевые форкамеры. Технологические растворы, газы, вода и другие жидкости подаются в рабочую зону по трубопроводам. Аналогично осуществляется и вывод отработанных жидкостей на утилизацию.

В зависимости от условий технологических процессов каждый бокс обеспечивается средствами вентиляции, регулирования состава атмосферы и теплового режима, а также системами освещения и безопасности.

Вид типичной боксовой технологической линии со стороны операторской зоны и схематичный чертеж поперечного разреза рабочей установки приведен на фотографии рисунка №46.

Изготовление трехслойных трубчатых твэлов

Ранее уже упоминалось о том, что каждый единичный тепловыделяющий элемент любой ТВС реак-

торов данного класса представляет трубу круглого или многогранного сечения с трехслойной стенкой, состоящей из среднего активного слоя и двух внешних покрытий, образующих защитную оболочку. Различия между элементами индивидуальных ТВС составляет форма и размеры сечения, общая длина и протяженность активного слоя, суммарная толщина стенок трубы и каждого из ее слоев.

Несколько опережая последовательность изложения, следует сказать, что основным способом изготовления трубчатых трехслойных твэлов является горячее прессование трехслойных же заготовок путем ламинарного истечения через фильеры. Типичная заготовка под прессование труб и ее комплектующие детали представлены на рисунке №47.

Каждая единичная заготовка трехслойной трубы собирается из трех - четырех деталей различной формы. А, учитывая, что в комплект каждой из десятков разновидностей ТВС, входит от четырех до восьми твэлов,

потребное число комплектующих деталей только для трехслойных заготовок исчисляется сотнями типоразмеров. Число и разнообразие комплектующих деталей возрастает на всех последующих передлах производства ТВС за счет крепежных, дистанционирующих изделий, установочных и концевых узлов тепловыделяющих сборок.

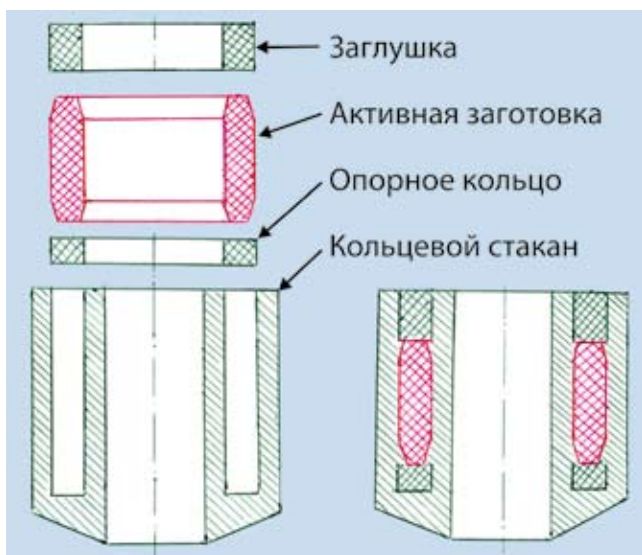
Для изготовления обширного перечня металлических изделий с использованием разнообразных и сложных способов обработки необходим парк соответствующего металлообрабатывающего оборудования и инструмента.

Технология пластической обработки алюминия и его сплавов включает процессы прокатки, волочения, холодного и горячего прессования, прямого и обратного выдавливания, штамповки и целого ряда других способов. Определенная группа изделий сложной конфигурации производится методами литья под давлением, обработкой резанием и путем разнообразных комбинаций.

На упомянутых стадиях обработки применяются прокатные и волочильные станы, гидравлические и механические прессы, литейные машины. Для нагрева заготовок и термической обработки используются преимущественно электрические печи и высокочастотные индукторы.

Значительный объем подготовительных и заключительных операций выполняется путем обработки резанием. Она осуществляется как на обычных металлорежущих станках, так и на автоматах с программным управлением.

Неотъемлемую часть технологии алюминия составляет финишная химическая обработка, включающая обезжиривание, размерное травление и, в ряде случаев, анодное оксидирование. Для проведения жидкостной обработки традиционно создаются поточные линии с после-



довательно расположенными ваннами, объединенными транспортной системой. Все режимы обработки и контроль ее параметров обеспечивает автоматическая система приборов и средств регулирования.

В свою очередь, для производства и обработки алюминиевых деталей, а также и твэлов, требуется соответствующий принятым условиям рабочий инструмент и технологическая оснастка. Обеспечение этих потребностей возложено на специализированное подразделение завода – инструментальное производство. По своему профилю, оснащению и организационной структуре оно отвечает запросам всех заводских потребителей инстру-

Сборная заготовка под прессование трехслойного трубчатого твэла и ее составляющие

47

48

Технологическая линия станков с программным управлением в инструментальном цехе





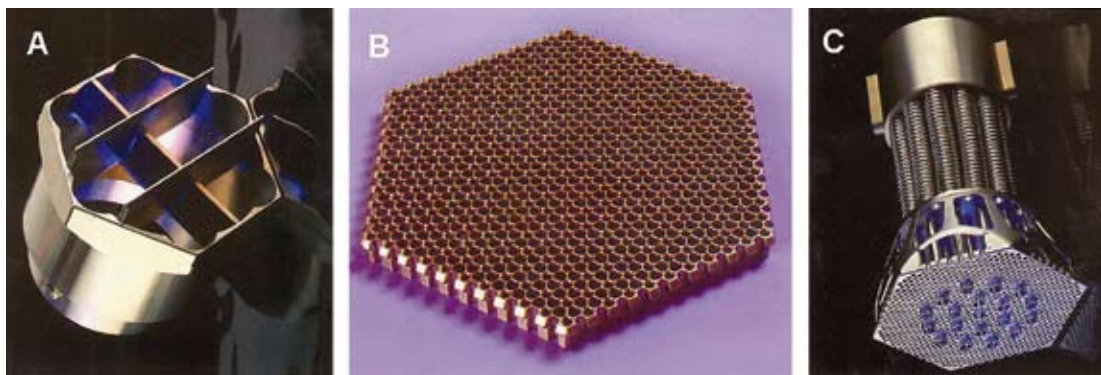
ментов, оснастки и приспособлений, а в первую очередь производителей основной продукции, тепловыделяющих элементов и топливных сборок различного назначения.

Инструментальное производство располагает самой совершенной технической базой, включающей оборудование, способы и средства обработки металлов с достижением любых заданных свойств своей продукции. В частности, наряду с традиционными приемами, освоены, технически оформлены и систематически применяются методы лазерной, плазменной, ионной, гидроабразивной обработки, обеспечивающих достижение высокой точности, прочности и износостойкости инструментов и приспособлений. Гарантированно высокий уровень

качественных характеристик инструмента способствует стабильной надежности в работе производителей основной продукции.

Деловое сотрудничество основного цеха по производству ТВС исследовательских реакторов с изготовителями алюминиевых полуфабрикатов и инструментов схематически представлено на рисунке №49.

В составе широкого перечня продукции инструментального цеха приоритетная роль принадлежит металлообрабатывающему инструменту. Сюда входит обширная группа безззорных вырубных, гибочных штампов и пресс-форм для точного литья алюминия и пластических масс. Особую категорию представляют инструменты для прессования и волочения ме-



таллических изделий и профилей, а также уплотнения, формования и шлифования керамических материалов и изделий.

Большие объемы производства и применения составляют режущие и измерительные инструменты, от специализированных резцов и фрез до комплексных калибров и шаблонов.

Производственные возможности цеха не ограничены только инструментом. На его базе организовано также изготовление и обработка наиболее точных изделий сложного геометрического построения для некоторых видов топливных сборок основных номенклатур. В качестве примера, на рисунке №50 приведены концевые узлы тепловыделяющей кассеты «ВВЭР-1000», изготовленные в инструментальном цехе.

Таким образом, изготовление главного рабочего органа активной зоны реактора – твэла обеспечивается совместными усилиями трех упомянутых подразделений завода.

На головных переделах технологии обогащенного урана создается и обрабатывается металлокерамическое топливо до активных заготовок заданных размеров и формы.

Цех алюминиевых полуфабрикатов производит и поставляет заготовки и детали для оболочки твэлов и несущих узлов кассеты.

Инструментальный цех, в свою оче-

редь, обеспечивает инструментом и технологической оснасткой обе ветви твэльного производства.

Как уже упоминалось, процесс первичной обработки металлокерамики завершается формированием сборной трехслойной заготовки (рисунок №47) в герметичном исполнении, позволяющем проводить последующие операции открыто, без использования средств специализированной защиты.

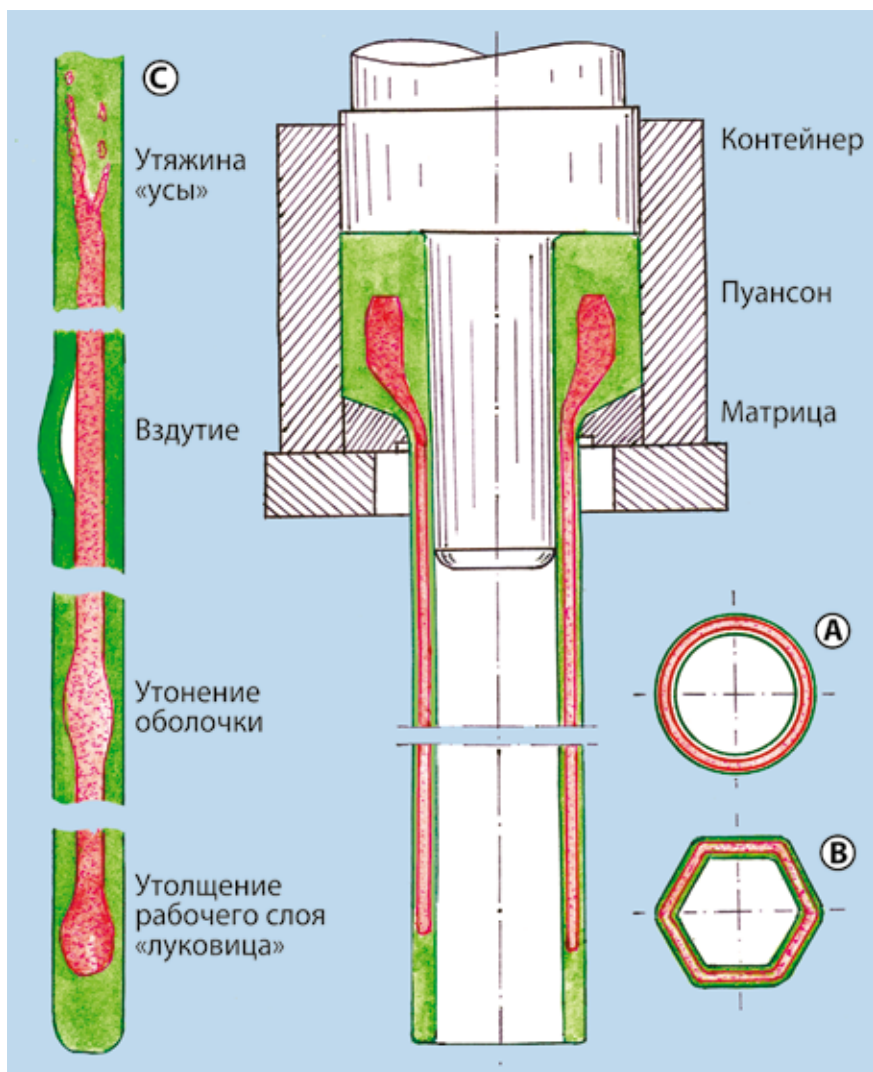
В дальнейшем сборные заготовки подвергаются калибровке, устраняющей внутренние зазоры и горячему прессованию в трехслойные цилиндрические трубы заданных размеров.

Процесс деформации трехслойных заготовок представлен на рисунке №51. Прессование осуществляется путем прямого выдавливания трубы через кольцевой зазор между пуансоном и матрицей штампа, образующими очаг деформации.

Степень обжатия материала при истечении через матрицу, как соотношение площадей поперечного сечения заготовки и трубы, составляет для различных типов изделия от 10 до 20 крат. При таком весьма значительном обжатии для достижения геометрической точности изделия необходим строго согласованный режим ламинарного истечения всех трех компонентов системы. Высокие степени деформации и значительные температуры

Хвостовик (А), опорная решетка (В) и пружинная головка (С) кассеты «ВВЭР-1000»

50



51

Схема деформации трехслойной заготовки в процессе прессования трубчатых твэлов для исследовательских реакторов.
 А – поперечное сечение отпрессованной трубы.
 В – поперечное сечение после формовки волочением.
 С – типичные аномалии формообразования

нагрева обеспечивают необходимые условия для интенсивного развития процесса взаимной диффузии в пограничных зонах, в результате которого достигается прочный сварочный контакт по плоскостям контакта оболочек твэла с металлической матрицей активного среднего слоя.

В свою очередь, режим исте-

чения носит многофакторную зависимость от комплекса свойств прессуемых материалов, а также целого ряда условий и параметров обработки. Эти условия включают температуру обработки и равномерность нагрева, скорость деформации, состояние поверхностей обрабатывающих инструментов, их свойства и геометрическую точность, качество

технологических смазок и вспомогательных материалов, а также надежность управления и стабильность работы прессового оборудования.

В качестве наглядного примера на рисунке №51 приведена часть наиболее вероятных дефектов прессованной трубы, вызывающих геометрические аномалии в структуре твэла.

Дефекты на начальной и конечной границах активного топливного слоя, названные «луковицей» и «усами», возникают при несоответствии твердости металлокерамики и материала концевых деталей оболочки: опорного кольца и заглушки. При этом происходит уширение активного слоя в начале прессования и его утяжка в конце. Поэтому для повышения равномерности активного слоя необходимо для изготовления концевых деталей использовать материал, упруго-пластические свойства которого близки к свойствам рабочей металлокерамики при заданных условиях обработки.

Частично эта задача решается применением сплавов алюминия, легированных железом, никелем или титаном. Однако управление свойствами таких сплавов составляет весьма сложную и кропотливую проблему. Наиболее надежные и устойчиво повторяемые результаты были достигнуты при использовании металлокерамики на основе алюминия с присадками оксидов алюминия, магния, кремния и циркония. Практически путем простейших комбинаций этих составляющих можно управлять свойствами данного материала в достаточно широком диапазоне.

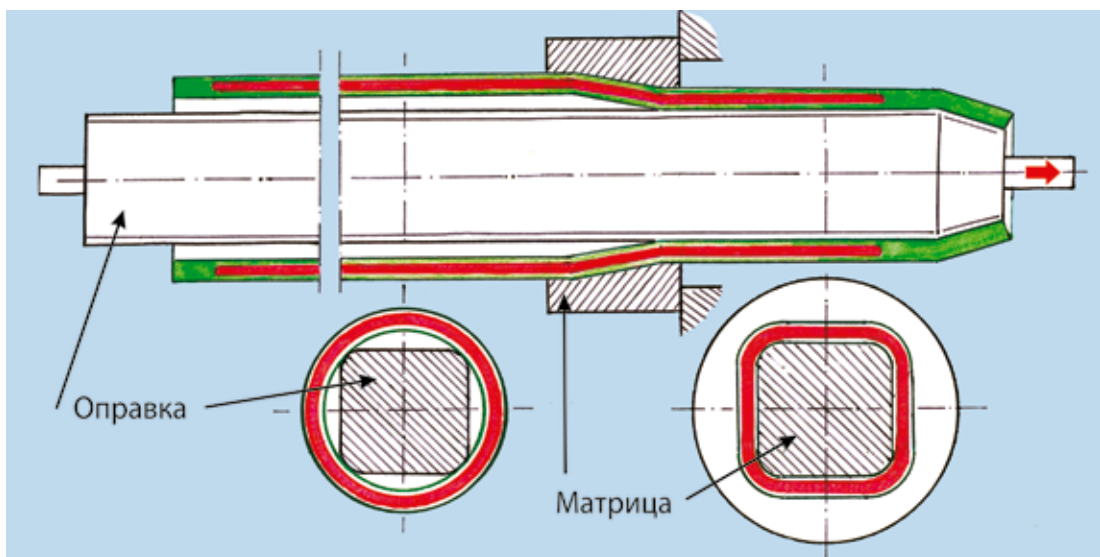
При правильном подборе состава материала концевых деталей сборной заготовки в сочетании с незначительным профилированием кромок активной заготовки, дефекты утолщения и утяжки активного слоя локализуются практически полностью.

Ранее, в разделе производства металлокерамики отмечалось отрицательное влияние воды практически на всех стадиях изготовления активных заготовок. Этот фактор сопровождает производственный процесс и далее, вплоть до полной герметизации сборной заготовки. Поэтому заключительной стадией подготовки всех исходных деталей является глубокая многочасовая дегазация в глубоком вакууме при критической для алюминия температуре в 600-620 градусов. В случае неполного удаления даже следов кристаллизационной влаги оксида алюминия или вторичного поглощения воды перед сборкой, в процессе горячего прессования твэла происходит отслоение оболочек, и происходит вздутие с образованием скрытых и даже видимых пузырьков.

К числу наиболее вероятных аномалий прессования относятся также разбросы по толщинам активного слоя и оболочек твэла, разнообразные утонения и утолщения, возникающие как результат целого ряда свойств материалов и условий обработки. Здесь проявляется и неоднородность механических свойств всех компонентов системы, и искажения температурных полей, и неравномерность смазки, и механические импульсы в работе оборудования, и так далее.

При существующих весьма высоких рабочих уровнях тепловой напряженности твэлов практически каждый из рассмотренных дефектов представляет роковую опасность для работоспособности активной зоны реактора. Как правило она проявляется в форме местных перегревов с полной потерей герметичности оболочек и со всеми последствиями радиационного загрязнения.

Но несмотря на очевидную сложность проблемы, промышленная технология отработана и обеспечена всеми необходимыми услови-



Финишная обработка ТВЭЛов
волочением

52

ями для массового производства продукции высокого, стабильного качества, отвечающего самым жестким условиям эксплуатации ядерного топлива атомных реакторов.

Для достижения окончательной заданной формы поперечного сечения и необходимой длины, цилиндрические пресованные трубы подвергаются обработке путем холодного волочения на калибрующих оправках. Путем протяжки через фильеры сечению трубы придается преимущественно квадратная или шестигранная форма и достигается окончательная толщина ее стенок, а также оформляются переходные радиусы углов и выравниваются внешние поверхности.

Калиброванные трубы проходят рентгеноскопическое просвечивание, по результатам которого оценивается однородность активного слоя, фиксируются его границы и делается разметка для обрезки концов под заданную габаритную длину элемента. Далее, производится обезжиривание, травление, осветление, промывка и сушка внешней поверхности.

В заключение, каждое практически готовое изделие проходит визуальную проверку и комплекс-

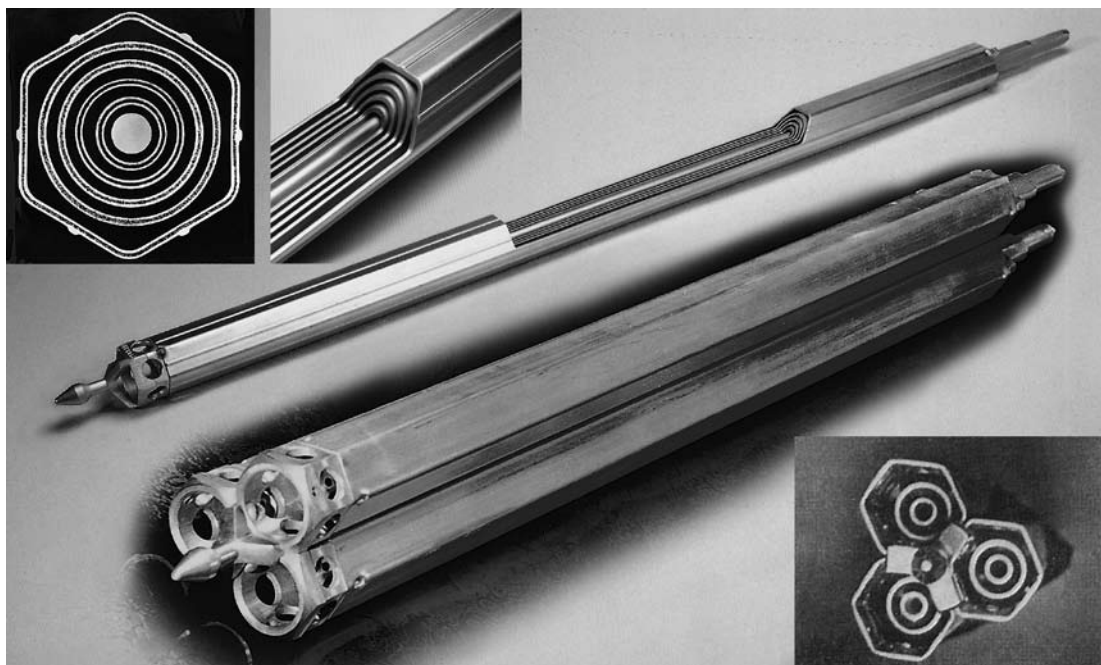
ный приборный контроль на соответствие всех заданных параметров качества.

Для оценки качества ТВЭЛов используются специализированные приборы и дефектоскопы, работающие на принципах ультразвукового и токовихревого зондирования, радиационного и рентгеновского просвечивания и ряда других современных методов.

Многие параметры контроля имеют сугубо профессиональные трактовки и поэтому их перечисление, в данном случае, просто излишне.

Тепловыделяющие кассеты

Тепловыделяющая сборка, или сокращенно ТВС, как нагревательное устройство получила наименование по заключительной стадии ее изготовления, когда несколько ТВЭЛов и крепежных узлов объединяются в конструктивный комплекс. Более точное название, а именно «кассета», употребляется в литературе, и особенно в практической сфере производства, значительно реже. В данном же случае, во избежание созвучия наименований изделия и способа его формирования, как «сборка



– сборки», принято второе наименование – кассета.

В комплект тепловыделяющей кассеты практически для любого типа исследовательского реактора российской конструкции входит от трех до восьми твэлов, располагаемых коаксиально по отношению друг к другу. Габаритные размеры поперечного сечения рассчитываются таким образом, что между ними в едином пакете образуются равномерные сквозные зазоры по всей высоте, предназначенные для протока охлаждающей воды. Ширина зазоров фиксируется дистанционирующими решетками или пуклевками на «холостых» концах твэлов.

По торцам кассеты укрепляются так называемые концевые узлы или детали. Нижний узел предназначен для строгой фиксации и крепления кассеты по положению в активной зоне реактора. Верхний концевой узел имеет дополнительное назначение, как стопальное приспособление для транспортировки свежей кассеты при ее загрузке и выгрузке облученного топ-

лива по окончании срока службы.

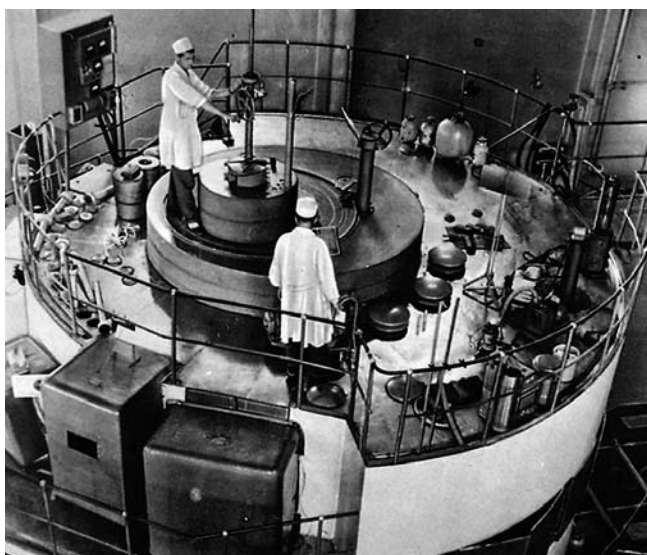
Для строгого дистанционирования кассет в активной зоне на наружной поверхности внешней несущей трубы или твэла предусмотрены продольные ребра, простирющиеся по всей их длине.

Несмотря на высокие уровни технической оснащенности, обширный и разносторонний операционный и выходной контроль, топливный сектор атомной энергетики никогда не игнорирует так называемый человеческий фактор. В данном случае профессиональные знания и опыт работающего персонала.

При организации работ в области качества и эксплуатационной надежности ядерного топлива, существенное значение придается непосредственной систематической деловой связи производителей с потребителями. Ценность этого принципа обусловлена тем, что возможности наблюдения за ходом переработки ядерного топлива весьма ограничены естественными явлениями, связанными с высокими уровнями радиации.

Тепловыделяющие кассеты исследовательских реакторов «МР» и «ВВР-М»

53



Исследовательский ядерный реактор в процессе подготовки очередной серии научных экспериментов

54

Многие на сегодня обязательные условия и требования, а также существенные научно-технические достижения возникли как результат систематических двусторонних деловых отношений и обобщенного опыта. Именно на основе этой кропотливой работы ведется совершенствование и расширение возможностей экспериментальной деятельности для обретения новых научных достижений.

Достижения завода в сфере совершенствования ядерного топлива, расширения за счет этого практических возможностей научно-исследовательских реакторов и повышения эффективности собственного производства были дважды отмечены на самом высоком государственном уровне. Одна из важнейших научно-практических разработок была удостоена Государственной премии СССР в 1982 году, а второй присуждена премия Правительства Российской Федерации в 1999 году.

Некоторые проблемы и перспектива

В свое время, до известных событий начала девяностых годов, производство металлокерамических

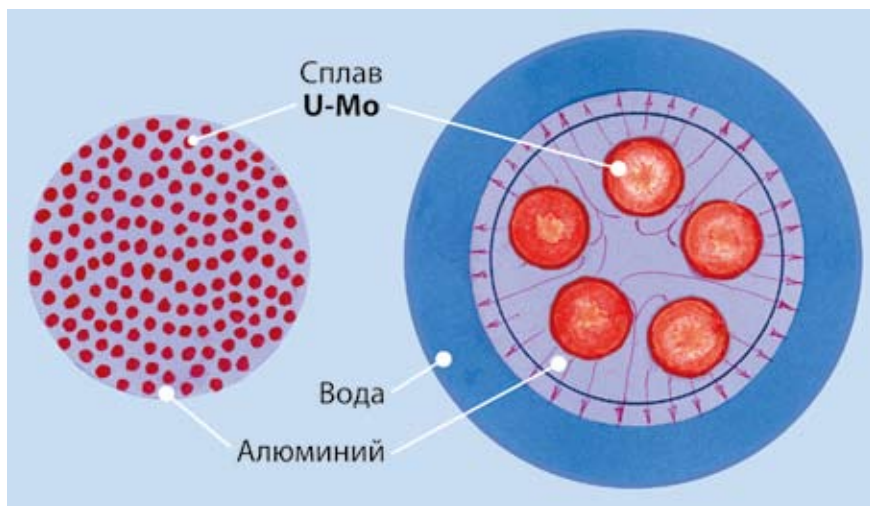
твэлов и тепловыделяющих сборок исследовательских реакторов работало ритмично и обеспечивало топливом большую группу реакторов, работавших почти во всех бывших республиках СССР, в большинстве стран восточной Европы и на Ближнем Востоке.

Однако, перемены в государственном устройстве стран бывшего российского рынка и некоторых условий экспорта ядерного топлива практически полностью заглушили внешний рынок данной продукции. С тех пор и до настоящего времени потребителями остаются только собственные российские реакторы, принадлежащие Курчатовскому институту, НИИ Атомных реакторов и ряду академических научных центров.

Весьма существенный технологический барьер возник также в связи с изменением требований МАГАТЭ к экспортируемой продукции. Это воздействие проявилось следующим образом.

Для сохранения пластичности и равномерности истечения металлокерамической композиции при прессовании, волочении и других видах механической обработки содержание хрупкой фазовой составляющей не должно превышать 20-25 объемных процентов. Это обстоятельство, в свою очередь, вызывает ограничение содержания основного рабочего вещества в ядерном топливе и в активной зоне в целом. В результате ограничивается мощность реактора, плотность нейтронного потока и широта возможностей проведения экспериментальных исследований.

На начальных этапах развития экспериментальной ядерной техники указанная проблема во многом решалась путем повышения степени обогащения урана по рабочему изотопу. Так для большинства исследовательских реакторов достаточным считалось обогащение в 36 процентов. Но некоторые научные подразделения в нашей стране и за



Микроструктура дисперсионной топливной композиции на основе гранулированного сплава системы «уран-молибден»

55

рубежом работали на уране более высокого обогащения, вплоть до 80 и 90 процентов.

Однако, следуя доктрине нераспространения ядерного оружия, в конце прошедшего столетия МАГАТЭ наложило ограничение на степень обогащения урана, применяемого в мирной практике, пределом в 20 процентов.

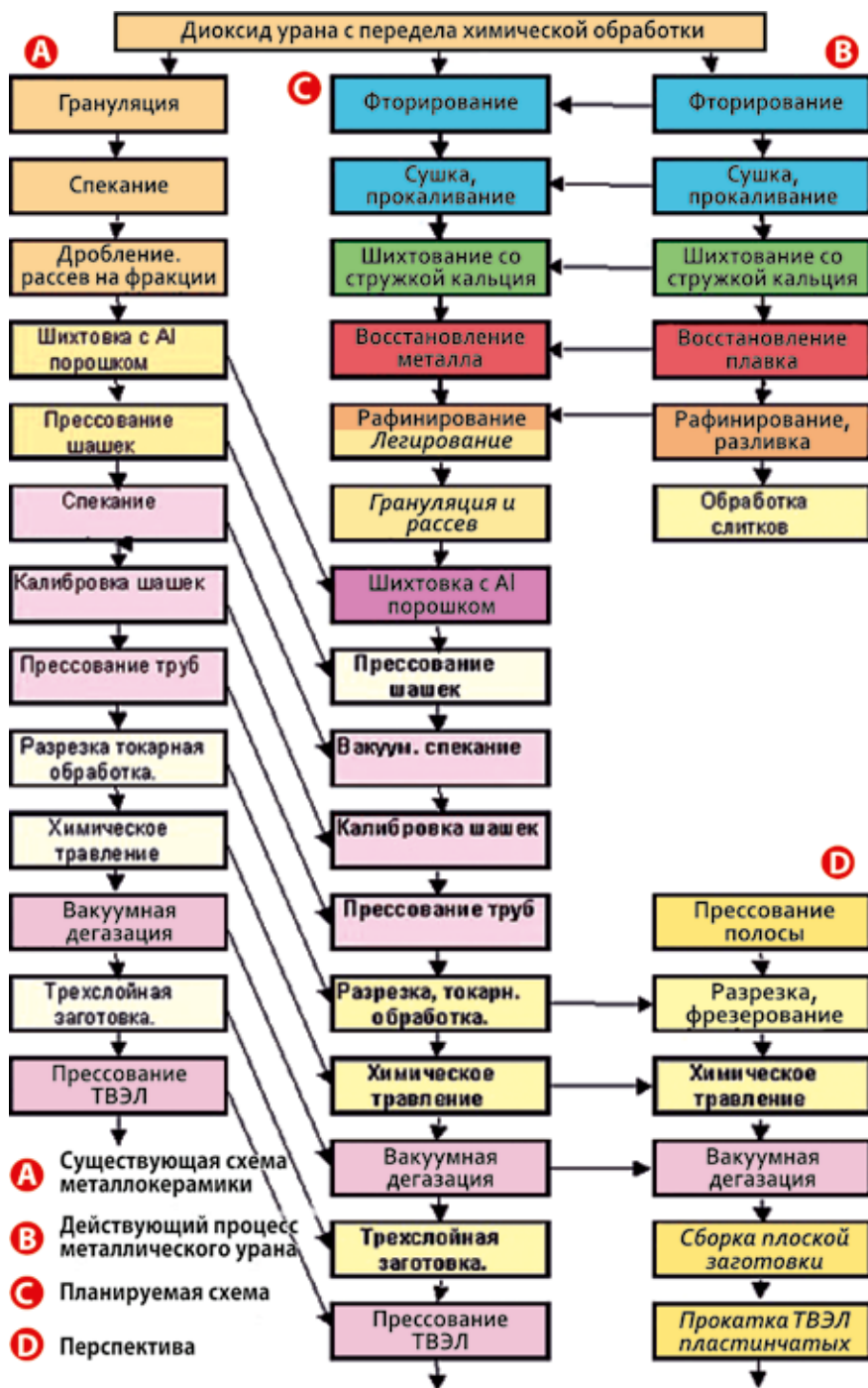
Это ограничение вызвало существенные осложнения в процесс изготовления прессованных трехслойных твэлов с прежними эксплуатационными характеристиками.

Так, например, содержание основного рабочего вещества урана-235 в топливной, металлокерамической композиции твэлов для исследовательского отечественного реактора «ИРТ» составляет 0,65 грамма на кубический сантиметр. При использовании диоксида урана обогащенного до 36 процентов, спеченного до высокой плотности в 10 грамм на кубический сантиметр, содержание хрупкой фазы в металлокерамике составляет около 21 объемного процента.

В варианте пониженного обогащения до 20 процентов по урану-235 возрастает требуемое количество двуоксида урана почти на 40 процентов от общего объема металлокерамики. При такой кон-

центрации пластические свойства топливной композиции резко изменяются в сторону ухудшения. Материал становится жестким, что нарушает условия равномерного истечения в процессе прессования трехслойных трубчатых твэлов. В результате нарушается пропорциональность толщины топливного слоя и защитных оболочек, возникают локальные утонения оболочек, сгустки частиц оксидного топлива и трещины.

В мировой практике аналогичного направления используются топливные композиции, содержащие металлическую рабочую составляющую взамен оксидной. В качестве такого материала используют сплавы урана, легированного добавками молибдена до 5-8 весовых процента для повышения радиационной стойкости. При этом за счет высокой плотности урана и небольшого объема второго компонента значительно компенсируются последствия пониженного обогащения. Для приведенного примера твэлов «ИРТ» пластические характеристики топливной композиции на основе сплава уран-молибден при обогащении в 20 процентов сохраняются на практически одинаковом уровне с металлокерамикой,



содержащей диоксид урана 36-и процентного обогащения.

Таким образом, для сохранения работоспособности предприятия

в новых условиях требований МАГАТЭ необходимо, как минимум, осуществить замену металлокерамической топливной композиции

на более технологичный материал. Таким материалом может стать дисперсионная двухфазная смесь алюминия с внедренными в нем частицами урана, легированного молибденом. При этом по условиям радиационной стойкости и тепловой напряженности твэлов дисперсные частицы активного материала должны иметь крупность в пределах 100-200 микрон и преимущественно сферическую форму. Микроструктура такой топливной композиции и воображаемая схема тепловых потоков представлены на рисунке №55.

Степень подготовленности предприятия к такому преобразованию можно представить на основе анализа существующего цикла производства топливной композиции твэлов исследовательских реакторов, представленного на рисунке №56. На данном рисунке изображены две действующие технологические цепочки, одна из которых (А) составляет процесс получения металлокерамики, а вторая (В) – чистого металлического урана в слитках.

Процесс получения металлокерамики является составной частью действующего технологического цикла по производству твэлов и ТВС для всех типов исследовательских реакторов российской конструкции, построенных в России и за рубежом.

Технология производства металлического урана была разработана для обеспечения экспортных поставок обогащенного урана. Она ограничивалась восстановлением металла, его рафинированием, корректировкой изотопного состава, отливкой и обработкой слитков.

В такой форме металл поставлялся в Японию, в Канаду и ряду других стран, приобретающих его, предположительно, в качестве сырья для ядерного топлива собственных исследовательских реакторов.

Планируемая технология дисперсионного топлива на основе

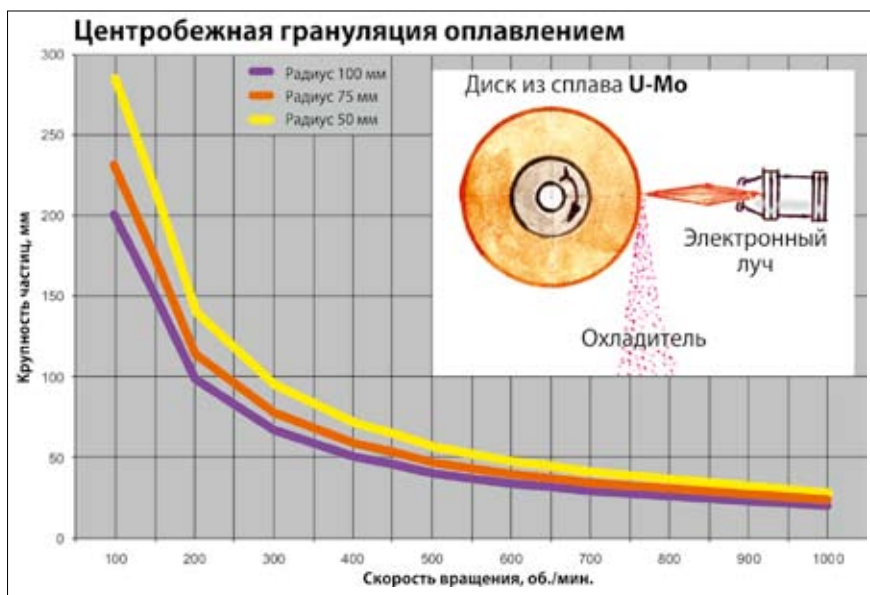
уран-молибденового сплава (С) не может быть полностью сформирована на основе этих двух процессов путем перераспределения ряда операций.

В число недостающих, неосвоенных технологических ступеней относится выплавка уран-молибденовых сплавов и перевод их в дисперсное состояние.

Выплавка сплавов не представляет существенной проблемы, поскольку на заводе имеется многолетний опыт производства слаболегированных сплавов природного урана для твэлов уран-графитовых реакторов. Но следующая ступень, связанная со строго регламентированным измельчением сплавов, может оказаться значительно сложнее.

Измельчение путем механического дробления приводит к образованию фрагментов осколочного типа, неправильной формы с шероховатой развитой поверхностью. При этом из-за переизмельчения значительная часть материала уходит в оборот, как непригодная по крупности. Кроме того, осколочные порошки не обладают достаточной текучестью, необходимой для автоматической транспортировки «перетеканием» и точного объемного дозирования. Поэтому для получения металлических порошков часто используются способы измельчения, основанные на диспергировании расплавов путем их распыления в жидком состоянии с ускоренным последующим затвердеванием.

В технологиях обработки некоторых цветных металлов, в частности меди, свинца, алюминия используется ряд аналогичных способов, основанных на распылении струи расплава гравитационными, центробежными силами или интенсивными газовыми потоками. В принципе, такие способы приемлемы и для урановых сплавов с учетом некоторых индивидуальных особенностей этих материалов.



Уран относится к числу химически активных элементов. Он интенсивно взаимодействует со многими веществами и материалами, особенно в жидком состоянии при повышенных температурах. Для предохранения урана от загрязнения и сгорания в процессе плавки, разливки, кристаллизации и охлаждения используется целый комплекс защитных мер от взаимодействия с атмосферными газами, металлами и легко восстанавливающимися химическими веществами.

Практически аналогичные процессы осуществляют путем интенсивного нагрева индукционными токами, плазмой, электронным лучом и сопротивлением в глубоком вакууме с использованием огнеупоров на основе графита, окислов и фторидов кальция или магния и ряда других химически прочных соединений. На экспериментальном уровне испытывались некоторые способы обработки урана в силовых электромагнитных полях, такие как плавка во взвешенном состоянии и в «холодном» тигле.

Из числа известных, освоенных и апробированных способов грануляции расплавов для урана наиболее

перспективны интенсивные процессы с минимально возможным временем обработки. К их числу, в частности, может относиться механическое распыление под воздействием центробежных сил в процессе непосредственного оплавления. Эскизно этот принцип отображен на рисунке №57.

Уран-молибденовый сплав по окончании его выплавки в обычной индукционной печи разливается в слитки дисковой или цилиндрической формы, которые в твердом, холодном состоянии поступают на стадию распыления. Установленные в центра приводного механизма слитки вращаются с высокой заданной скоростью и их поверхность регламентировано оплавляется источником интенсивного местного нагрева: электронным лучом или факелом плазмотрона. В этих условиях реальные частицы появляющейся жидкой фазы будут срываться с поверхности под действием центробежных сил, образуя непрерывно движущийся веер. Далее, поступая в охлаждающую среду, этот поток будет фиксироваться в форме дисперсных частиц.

Такой способ обработки обладает широкими реальными возможностями управления крупностью дисперсных частиц путем регулирования окружной скорости вращения исходных цилиндрических заготовок. Одновременно упрощается задача быстрого охлаждения потока, поскольку металлические «капли» покидают зону нагрева сразу же в момент образования жидкости и не подвергаются перегреву над точкой плавления.

Таким образом, решая данную, достаточно сложную, но вполне реальную задачу освоения дисперсионного металлического ядерного топлива для исследовательских реакторов, завод может значительно расширить свои потенциальные возможности как на внутреннем, так и на внешнем рынке атомной энергетики.

Новосибирский завод химконцентратов в России остается единственным производителем ядерного топлива, обладающим технологиями, технической базой и многолетним практическим опытом разработки, получения и использования дисперсионного топлива на уран-алюминиевой основе. Поэтому очередная ступень модернизации действующего производства спо-

собна обеспечивать дальнейшую успешную работу по ряду важнейших направлений развития атомной энергетики.

Внутри своей страны это расширяет экспериментальные возможности атомной науки и проектно-конструкторских разработок новой техники для перспективного развития отечественной атомной промышленности.

Освоение новых пределов МАГАТЭ по ограничению обогащения урана будет реально способствовать оживлению затухшей зарубежной деятельности в обеспечении работы исследовательских реакторов российской конструкции в ряде стран восточной Европы, ближнего Востока и, возможно, азиатского региона.

Повышение степени переработки металлического урана откроет новые возможности для зарубежных поставок российской промышленной продукции. Вместо слитков рафинированного обогащенного урана может открыться возможность сбыта более ценных гранулированных порошков на первом этапе, затем заготовок дисперсных топливных смесей и, в конечном итоге, готовых тепловыделяющих элементов.

Литий в ядерной энергетике

В семействе редких элементов самым легким металлом по массе атомного ядра и удельному весу является литий. Он легче воды почти в два раза, железу уступает в 15 раз, а золоту и урану даже в 40. Держа в руках солидный на вид слиток лития, человек практически не чувствует его веса.

Литий весьма активный химический элемент. На воздухе он быстро окисляется и покрывается серой пленкой смеси окисла и нитрида, а при контакте с водой загорается ярким фиолетовым пламенем.

Благодаря малому удельному весу, литий стал неотъемлемым компонентом легких сплавов алюминия и магния, широко используемых в авиационной и космической технике. Высокая химическая активность определила профессиональную роль лития. В сфере органической химии он катализатор, в металлургии – дегазатор и рафинирующий агент, а в электротехнике – главное рабочее вещество химических источников тока. Обыденная, повседневная и давно привычная работа лития охватывает широкий спектр деятельности. Но свое наиболее веское, громкое и запоминающееся слово литий сказал в начале шестидесятых годов прошлого века при взрыве самой мощной в мире водородной бомбы, эквивалентной пятидесяти миллионам тонн тринитротолуола.

И это слово было «МИР»!

С тех пор вот уже почти половина столетия земная цивилизация не затевает глобальных военных конфликтов и непременно стремится разрешать любые споры путем переговоров. А причиной такого миролюбия является страх перед невиданной разрушительной силой и невидимой радиацией.

Подтверждением сказанному-

может служить переполюх во всем мире, вызванный подземным ядерным взрывом в Северной Корее и обогащением урана в Иране.

Мудрое человечество на протяжении многих веков стремится обращать явное зло во благо. Взрывная сила водородной бомбы бесспорно свидетельствует, что литий является энергоносителем, превосходящим многие природные источники жизненно важной энергии, в том числе и уран. Он способен, и в обозримом будущем непременно станет, основой мирного термоядерного синтеза.

В отличие от энергетике, базирующейся на основе деления тяжелых атомных ядер урана и плутония, термоядерный синтез представляет обратный процесс слияния ядер легких элементов, а именно изотопов водорода.

Водород считается самым распространенным элементом вселенной, основная масса которого сосредоточена в гидросфере Земли. По своей природе это простейший и легчайший из всех элементов нашей планеты. По разновидности атомного ядра известны три изотопа водорода, различающихся по атомной массе и имеющих атомные веса в одну, две и три единицы.

Превалирующая доля, более 99,9 процента, принадлежит легкому изотопу, иногда называемому протием. Количество природного водорода со средним значением атомного веса в две единицы, называемого тяжелым водородом, или дейтерием, не превышает 0,016 процента. А третий изотоп – сверхтяжелый водород, или тритий, в природе практически отсутствует. Он принадлежит к числу радиоактивных элементов с периодом полураспада 12,3 года, и, будучи полученный искусственным путем,

относительно быстро исчезает, превращаясь в гелий. В качестве природного источника для получения трития используют литий, который при облучении нейтронами распадается на два самостоятельных элемента: инертный газ гелий и сверхтяжелый водород тритий.

Одной из замечательных особенностей дейтерия и трития является способность вступать в реакции ядерного синтеза при наличии определенных условий. Главным из этих условий считается нагрев до температуры в сотни миллионов градусов, то есть до величины, которую трудно представить, а еще сложнее осуществить.

Одним из практических средств такого нагрева был использован атомный взрыв цепной реакции деления урана или плутония. Именно в очаге такого взрыва развивается нужная температура и, вводя в эту зону тяжелый и сверхтяжелый водород, можно вызвать термоядерную реакцию, на которой основана водородная бомба.

Традиционно на почве многих военных открытий и изобретений зарождаются мирные технологии. Так, например, первая атомная бомба была взорвана в 1945 году. А спустя всего девять лет после испытаний головных образцов нового оружия, в 1954 году пущена первая в мире Обнинская атомная электростанция.

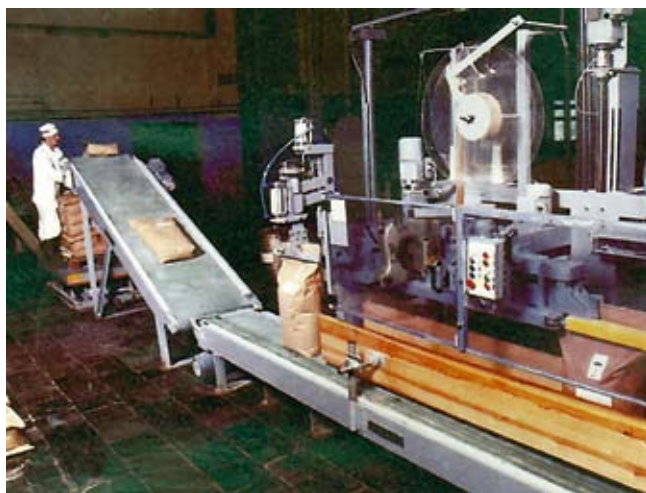
По аналогии следовало ожидать, что через десять-пятнадцать лет от создания первой водородной бомбы в 1953 году, то есть в шестидесятые-семидесятые годы двадцатого века, начнется эра мирного термоядерного синтеза. Но, вопреки подобным ожиданиям, даже к началу двадцать первого века этого чуда не случилось. Причины такой продолжительной паузы кроются не только в научно-технической сложности проблемы, но и в хронической экономической отсталости и бедности нашей страны.

Через сложность событий конца двадцатого века, связанных с заменой экономического базиса и политического вероисповедания, разрушила не только многие традиции, но и подорвала основы, когда-то блистательной отечественной атомной науки. Но даже в этих условиях нищая, голодная, оборванная и оплеванная атомная наука не изменила своему долгу и не утратила чести.

По объему природных запасов литий относится к категории редких металлов. Тем не менее, в обычной практике и литий, и технические продукты на его основе считаются достаточно распространенными и доступными. Он входит в состав бытовых и технических источников электроэнергии, химических препаратов типа отбеливателей и целого ряда привычных материалов.

К основным природным источникам промышленного литиевого сырья относятся ископаемые руды, в основном, сподумены, природные рассолы и подземные термальные воды. В результате первичного термохимического разложения руд, выпаривания рассолов и относительно несложной химической переработки получается первичное техническое сырье в форме моногидрата гидроокиси и углекислого лития. Именно к этим видам сырья и адаптировано литиевое производство НЗХК.

Первичная укрупненная промышленная структура литиевого производства в нашей стране, основанная в начале пятидесятых годов прошедшего столетия, включала три главных технологических звена. Первым в этой цепи находился Забайкальский горно-обогатительный комбинат (ЗабГМК), основанный на базе Завитинского литиевого месторождения в 1937 году и перешедший в ведение Министерства среднего машиностроения, то есть в атомную промышленность



Автоматизированная линия расфасовки и комплектации химических продуктов

58

в 1956 году. Данное предприятие занималось добычей и первичной переработкой комплексных литиево-бериллиевых руд и являлось единственным в стране поставщиком литиевого сырья, которое поступало на Красноярский химико-металлургический завод, ныне ОАО «ХМЗ». На Красноярском предприятии производилась дальнейшая переработка сподуменовых концентратов путем высокотемпературного спекания с известняком и последующим водным выщелачиванием моногидрата гидроокиси лития, которая, в свою очередь, поступая на НЗХК, являлась основным сырьем литиевого производства нашего завода.

Именно к этому виду сырья были адаптированы головные операции технологического процесса литиевого цеха НЗХК, а именно стадии глубокой физико-химической очистки технической гидроокиси лития от примесей и хлорирования растворов отходящими газами с электролизного передела.

Первоначальный вариант технологического цикла литиевого производства практически целиком базировался на переработке гидроокиси лития высокой чистоты. На ее основе производилась серия химических продуктов, включая кристаллический моногидрат гид-

роокиси, углекислый, хлористый и фтористый литий.

Значительная доля в составе товарной продукции принадлежала металлическому литью высокой чистоты, выпускаемому в виде рафинированных слитков, пресованных или прокатанных полуфабрикатов: ленты, проволоки и гранул различной крупности. Первично восстановленный металлический литий перерабатывался также в сплавы на основе алюминия, магния и частично в химические продукты, такие как гидрид и нитрид лития.

Высокий уровень качества практически всех видов литиевой продукции НЗХК обеспечивал обширный спрос не только на внутреннем, но и на международном рынке редких металлов. Значительная часть химических и металлургических литиевых продуктов экспортировалась многим фирмам западной Европы и Дальнего Востока.

Международная торговля в период социалистической экономики имела для завода сугубо престижное значение, поскольку все валютно-финансовые сделки и операции проводились централизованно. Однако с изменением экономического базиса и переходом в девяностые годы к рыночной экономике, экспортная торговля приобрела совершенно новое значение, коренным образом отличающееся от предшествующего периода.

Повышенное внимание к экспортной торговле, особенно в годы экономического кризиса, было вызвано не простыми престижными соображениями, а острой необходимостью выживания и сохранения производства. Это было тяжелое, своеобразное и даже нелепое время. Вместо обычного денежного обращения в экономике нашей страны воцарилась система бартерного, натурального обмена, аналогично первобытно общинному строю.

Отечественные потребители на-

шей продукции расплачивались с предприятием всем, чем угодно, кроме денежных средств. Заводу в счет оплаты поступали пассажирские автобусы, пожарные и санитарные машины, трамваи, запасные части и рельсы. Большие объемы составлял каменный уголь и строительные материалы в виде бетона, стекла и мрамора. Зачастую расчеты производились медикаментами и клиническим оборудованием, а также стиральными машинами, радиоприемниками, телевизорами и другой бытовой техникой.

А всем этим добром завод был вынужден платить свои долги за сырье, химикаты, инструмент, за различные виды услуг и даже налоги в городской и областной бюджет.

Каменный уголь прямиком, «с колес» уходил на Новосибирские ТЭЦ, «скорые помощи» и медикаменты шли в здравоохранение, а автобусы и трамваи по своему предназначению. Но всего труднее приходилось трудовому коллективу завода. Вопрос: «Чем выдавать людям зарплату?» был заглавным, а долги перед трудящимися росли.

Где-то в середине 1996 года, когда завод отставал от регламента расчета по заработной плате больше, чем на 4 месяца, произошел курьезный случай. На очередном собрании акционеров финансисты представили плакат со своими показателями, на котором в разделе расходов на благотворительные нужды значилась выплата храму «Знамение» размером в один миллион рублей.

В то время храм Калининского района на улице Учительская, находился в стадии отделочных работ и, естественно, по старинному христианскому обычаю, строителям помогали по принципу кто чем мог. Но графа в отчете финансистов вызвала негодование примерно такого рода: «Зарплату руководители задерживают, а на это у них деньги нашлись!». И далее, небольшая делегация энтузиастов направилась



на прием к руководству завода, что называется, «качать права». И получили примерно такой ответ.

Да, мы действительно оказали благотворительную помощь храму в размере одного миллиона, но не деньгами, а мрамором для покрытия полов. Очень много строительного материала поступило в счет оплаты нашей продукции, и если среди вас найдутся желающие получить зарплату мрамором, пишите заявление и вам оплатят все долги.

Делегаты потоптались, помяли свои картузы, извинились и тихо спокойно ушли.

В период самого резкого обострения экономического кризиса и практического краха государственной финансовой системы экспортная деятельность литейного производства оказала самое эффективное влияние на сохранение производственной деятельности и наиболее ценного кадрового потенциала всего предприятия. За счет финансовых притоков в международной валюте, предприятие получало возможности для приобретения сырья, материалов, химикатов и поддержки производство на необходимом уровне. Этот же источник создавал возможности для частичного, но вполне допус-

Финишная обработка и упаковка металлического лития и продуктов на его основе

59

тимого уровня оплаты труда работающего персонала.

Однако последствия кризиса государственной экономики отрицательно и наиболее тяжело отразились на экономике самого промышленного литиевого комплекса.

Последующая перестройка и экономические реформы нашего государства оказали негативное влияние на производственную и финансовую деятельность ЗабГОК и в 1997 году Завитинское литиевое месторождение было законсервировано. В результате и Красноярский ХМЗ и НЗХК оказались лишенными традиционного сырьевого источника и были вынуждены на поиски новых поставщиков.

В результате длительного и сложного поиска, экономического анализа и оценки своих технических возможностей, выбор остановился на Южной Америке. Там, в пустыне Атакама, под жарким тропическим солнцем чилийские промышленники, выпаривая геотермальные рассолы, получают комплекс ценных сырьевых продуктов и в том числе литий в форме углекислой соли. Именно этот импортный продукт под заводским псевдонимом «чилийский карбонат» был принят в качестве основного сырья взамен моногидрата гидроокиси лития, а главная сырьевая база завода сместилась из восточной Сибири в экваториальную Америку. Но если географические перемены отразились на некоторых организационных и экономических аспектах, то изменение химической формы сырья потребовало существенной технологической реформации.

Предельное содержание углекислого лития в водном растворе ниже аналогичной характеристики гидроксида лития в 4-5 раз, что при замене исходного сырья резко снижает эффективность хлорирования лития по действующей схеме его переработки, подавляет скорость и глубину очистки отходящих газов от хлора.

В соответствии с растворимостью снижаются возможности очистки исходного карбоната от примесей, возрастает трудоемкость и усложняется техническое оформление процессов.

С учетом особенностей углекислого лития были разработаны и реализованы необходимые способы и средства его переработки в традиционные литиевые продукты для внутренних потребителей и экспортных поставок.

Главную товарную номенклатуру завода представляет металлический литий, который производится путем электролитического восстановления из расплава хлористого соли. Схематичная основа промышленного цикла представлена на рисунке №60, где фигура (1) означает главный рабочий агрегат – электролизер.

Электролизеры заполняются рабочей смесью, состоящей из хлоридов лития и калия, которая расплавляется и прогревается до 400-450 градусов. При пропускании постоянного электрического тока через расплав литий восстанавливается до металла и, выделяясь на железном электроде-катоде, всплывает на поверхность электролита. Жидкий металл из электролизера собирается в емкости, а из них разливается по изложницам, где остывает и кристаллизуется в заданной форме. Определенная часть получаемого металла подвергается повторной переплавке для рафинирования от неметаллических примесей и целового легирования. В качестве примера на рисунке №60 приведены фотографии сечения и цилиндрического слитка товарного металлического лития (2).

Газообразный хлор, образующийся на графитовом аноде электролизера путем перетока по газопроводам, поступает на начальную стадию технологического цикла, на первичную обработку исходного сырья (3). Здесь в водных растворах гидрокси-



Упрощенная технологическая схема переработки литиевого сырья с получением металла и некоторых важнейших химических продуктов

60

си лития ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) или пульпы его углекислой соли (Li_2CO_3), контактирующих в адсорберах со встречным потоком хлора, образуются хлориды и хлораты лития.

Как исходные, так и хлорированные растворы подвергаются

физико-химической очистке от сопутствующих примесей. В реальных условиях очистки содержание природных и техногенных примесей снижается от процентного уровня до сотых и тысячных долей. Очищенные растворы подвергаются



Химико-металлургический цех литейного производства

61

упариванию, на завершающей стадии которого образуются кристаллические или гранулированные продукты.

Основной поток химического передела завершается получением гранулированного хлористого лития, который частично представляет товарный продукт, но главным образом используется на собственном металлургическом переделе.

Переход на импортное сырье в условиях рыночной экономики отразился на степени рентабельности продукции завода не самым благоприятным образом. Дорогостоящее импортное сырье и короткий, шаблонный способ его переработки не обеспечивали характерной индивидуальности или высокой ценности выпускаемой продукции.

Единственным реальным выходом из создавшегося положения может быть только радикальное повышение потребительской ценности продуктов производства путем более глубокой переработки по современным наукоемким технологиям.

В данном направлении ведутся практически постоянные поисковые работы, которые могут обес-

печить практический выход на несколько новых путей перспективного развития. Некоторые из них представлены далее на конкретных примерах.

Одним из товарных литиевых продуктов действующего производства является гидрид лития. Гидрид представляет бинарное соединение, в котором осуществлена металло-водородная связь со стехиометрическим соотношением компонентов, отвечающим химической формуле – LiH.

Гидрид лития – это бесцветное или слегка окрашенное в голубой цвет кристаллическое вещество с кубической гранецентрированной структурой. Он имеет плотность 0,775 грамм в кубическом сантиметре и плавится при температуре 680-700 градусов почти без разложения. При нагревании выше температуры плавления в вакууме гидрид интенсивно разлагается на составляющие компоненты.

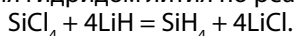
В промышленном масштабе гидрид получается прямым взаимодействием расплава лития под избыточным давлением очищенного водорода при нагревании выше температуры плавления гидрида в реакционных ретортах из малоуглеродистой стали.

Гидрид лития – сильный восстановитель, он легко восстанавливает многие окислы, сульфиды и хлориды металлов. На этом свойстве могут базироваться оригинальные и сложные технологические процессы.

В современной микропроцессорной технике и так называемых цифровых технологиях, по которым создаются электронно-вычислительные, компьютерные устройства, современные средства связи, регистрирующая и информационная аппаратура ведущая роль принадлежит монокристаллическому кремнию. В свою очередь, при производстве строго структурированного кремния в форме монокрис-

таллов, эпитаксиальных структур и разнообразных пленочных покрытий используется способ конденсации кремния из газовой фазы. В основу этого процесса заложен принцип термического разложения моносилана – SiH_4 . Моносилан представляет кремневодородное газообразное соединение, легко разлагающееся на элементы при нагреве выше 300 градусов и образующее при осаждении кремния на твердую основу правильные структурные формирования, монокристаллы для микропроцессорной техники.

Среди ряда реальных способов получения самого моносилана значительный интерес представляет восстановление галогенидов кремния гидридом лития по реакции:



По аналогичным реакциям могут легко образовываться ценные гидриды других металлов, например, алюмогидрида лития – LiAlH_4 , являющегося весьма эффективным ракетным топливом.

С помощью гидрида лития могут реализоваться процессы получения ряда трудновосстановимых редких и рассеянных элементов, как скандий, редкоземельные металлы, иттрий и многие другие. Характерно, что при восстановлении хлоридов металлов гидридом лития, вторым продуктом реакции является хлористый литий, который легко отделяется от первого целевого продукта. Это дает возможность возвращать литий на стадию электролитического восстановления с последующим наводороживанием и превращением снова в гидрид. При организации такого цикла, литий становится оборотным реагентом, расходуемым только на компенсацию технологических потерь.

На сегодняшний день роль лития в атомной энергетике весьма скромная. Так на основе анализа мирового потребления лития были обнаружены некоторые новые об-

ласти его применения. В частности, природный изотоп литий-7 нашел применение в системах атомных электростанций как реагент для подавления кислотности охлаждающей воды главного контура реакторной установки. Обладая незначительным уровнем захвата тепловых нейтронов, он не влияет на параметры работы активной зоны при гарантированно высокой изотопной чистоте.

С целью получения товарной продукции, отвечающей уровню мировых требований, на предприятии была разработана и реализована технология извлечения лития-7 из природного сырья с содержанием целевого компонента на ниже 99,95 процента с ориентировкой на требования внешнего рынка.

Некоторое представление о перспективности лития в атомной энергетике будущего можно получить на основе анализа современного состояния и некоторых тенденций атомной науки и техники.

В данном изложении каждый из разделов описания ядерного топлива заканчивается характеристикой товарной продукции, направляемой на переработку в различные виды атомных реакторов. Но при этом еще не упоминалась одна из характерных особенностей ядерной энергетике, связанная с проблемами облученного топлива.

Суммарная установленная мощность электрических станций с атомными реакторами на сегодняшний день составляет около 350 миллионов киловатт. Превалирующее большинство этих установок работает на принципе ядерного деления урана-235, и только небольшая доля реакторов на быстрых нейтронах использует в качестве топлива плутоний.

При использовании низкообогащенного урана (до 5% по урану-235) средний годовой расход ядерного топлива, без учета веса конструктивных материалов оболочек твэлов

и каркасов ТВС, составляет около 20 тонн на один миллион киловатт установленной мощности. Таким образом, мировая ядерная энергетика в целом потребляет около 7000 тонн свежего обогащенного урана, выдавая в виде радиоактивных отходов столько же облученного ядерного топлива, плюс 4-6 тысяч тонн конструкционных материалов, в основном циркония с наведенной радиационной активностью.

Облученная урановая составляющая ядерного топлива содержит в своем составе весьма широкую гамму радиоактивных осколков деления в количестве, практически равном весу разделившегося урана, а также изотопы плутония, образованные за счет поглощения нейтронов атомами урана-238. В зависимости от глубины выгорания делящихся ядер, облученное топливо имеет определенную концентрацию урана-235. Примерный средний состав облученного топлива после переработки в реакторе с выгоранием около 45-45 мегаватт-суток на килограмм представляется следующими величинами.

Генерация тепловой энергии в активной зоне реактора обусловлена делением ядер урана-235 и плутония-239 под воздействием потока нейтронов, возникающих в самом процессе. В результате ядерного деления появляются «осколочные» радиоактивные элементы, относящиеся к средней части периодической системы, а также путем захвата нейтронов ядрами урана-238 и альфа-распада образуется обширное семейство изотопов плутония с атомными весами от 232 до 246 атомных единиц массы, в общей сумме 15 разновидностей с широким спектром периодов полураспада от секунд до миллионов лет.

Средний уровень выгорания топлива на реакторах «ВВЭР-1000» составляет около 40 мегаватт-суток на один килограмм обогащенного

урана. Для достижения такого уровня выгорания необходимо израсходовать путем ядерного деления 45 грамм урана-235 или плутония-239.

В процессе работы ядерного топлива в активной зоне реактора под воздействием нейтронного потока развивается несколько параллельно-последовательных процессов, а именно:

- Деление ядер урана-235;
- Захват нейтронов ураном-235 с образованием плутония-239;
- Деление плутония-239.

При этом вклад плутония в суммарный баланс тепловой энергии составляет примерно 40 процентов. Согласно логике принятого рассуждения, по достижении выгорания в 40 мегаватт-суток в каждом килограмме ядерного топлива должноделиться 27 грамм урана-235 и 18 грамм плутония-239. Одновременно с этим в топливе накапливается еще 8-10 грамм избыточного плутония. Таким образом, при исходном содержании в составе топлива 4,5% или 45 грамм урана-235 на килограмм, по окончании полной кампании эксплуатации остается 28-30 грамм или 2,8-3,0% ядер делящихся изотопов.

Такое относительно высокое остаточное содержание обусловлено невозможностью более глубокого «выжигания» по ряду естественных причин. Во-первых, в составе топлива накапливаются «осколочные» элементы с высокими коэффициентами паразитного захвата нейтронов, такие как ксенон и самарий, отравляющие активную зону реактора. Во-вторых, за четырехлетний период работы большинство конструкционных материалов, узлов и деталей утрачивают и исчерпывают ресурсы прочности и коррозионной стойкости.

Суммарная электрическая мощность атомной энергетики Мира уже много лет сохраняется на уровне 300-350 миллионов киловатт. Допуская, что в среднем на каждый

миллион киловатт установленной мощности расходуется около тонны урана-235 в год, минимальный годовой расход составит более 300 тонн, или за 30 лет существования масштабной атомной энергетики 9 тысяч тонн. При этом в отработанном ядерном топливе остается до 5 тысяч тонн делящихся изотопов урана и плутония, что эквивалентно расходу современной атомной электроэнергетики в течение 15-16 лет.

На этой основе возникло вполне естественное стремление к повторному использованию остаточного делящегося потенциала в процессе производства ядерного топлива, которое получило наименование смешанного уран-плутониевого или «МОХ»-топлива. На первый взгляд, повторное включение отработанного топлива в энергетический цикл, способного заменить 50-60 процентов свежего природного материала, представляет значительную экономическую выгоду. Однако более тщательная оценка не оправдывает подобного ожидания.

Для повторного использования облученного топлива необходима, прежде всего, разделка ТВС на составляющие материалы: топливную и конструкционную часть, очистку топлива от радиоактивных осколочных элементов и его возврат в цикл производства твэлов. Но в отличие от технологии свежего топлива на этом этапе возникают дополнительные условия, вызванные высокой радиационной активностью плутония.

Для упрощенного толкования этих сложных физических явлений допускается считать, что интенсивность радиоактивного излучения при распаде обратно пропорциональна времени этого процесса. Например, период полураспада урана-235 равен почти миллиарду лет, а у плутония-239 он составляет всего 24 тысячи лет, что в 30 тысяч раз короче. Следовательно, можно довольно достоверно считать, что

интенсивность радиации при распаде плутония в 30 тысяч раз превышает радиационную активность урана-235.

Поэтому при работе с обогащенным ураном человека защищает простой застекленный бокс, чистая одежда, перчатки и лепесток. Аналогичная же переработка плутония требует для защиты от радиации массивных ограждений из металла и бетона толщиной в десятки сантиметров и даже в метры, и дистанционного манипулирования рабочими операциями.

Даже не вникая в специфические особенности радиохимической переработки и утилизации облученного топлива, можно представлять огромную технологическую сложность и затратность подобного производства. По имеющимся публикуемым сведениям, стоимость такой переработки в 3-4 раза превышает эквивалентные затраты на свежее ядерное топливо. Именно по этой причине существующая сфера гражданской атомной энергетики разделилась во мнениях на две группы.

Одна из групп, в которую входит Франция, Англия и Япония поддерживают и проводят работы по вторичному использованию облученного топлива. Вторая, включающая США, Канаду, Швецию, Испанию и Финляндию считает наиболее рациональным прямое захоронение всех радиоактивных облученных отходов, подвергая последние только консервационной обработке. Итоговое состояние этой проблемы можно представить по следующим данным. На конец двадцатого столетия количество плутония в отработанном топливе АЭС составляло около 1000 тонн, из которых 140 тонн было выделено из топлива и направлено на хранение, а 41 тонна, то есть всего 4 процента, переработано в смешанное уран-плутониевое топливо.

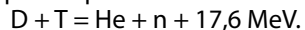
Мнение России в открытой печати не встречается, но фактическое состояние данной проблемы можно представить по положению на сегодняшний день. В настоящее время Россия имеет всего один радиохимический завод по переработке облученного топлива, мощностью 300-500 тонн в год – РТ-1, действующий на Урале. В то же время, на сегодняшний день 22 действующих атомных реактора ВВЭР-1000 отработали около 400 реакторо-лет, выдавая ежегодно с каждой установки по 20 тонн облученного топлива, из которых еще ни одна ТВС не была в переработке. Таким образом, за истекший период накоплено примерно 8 тысяч тонн облученного топлива, для переработки которого на заводе РТ-1 потребовалось бы 15-20 лет.

В целом, по нашей стране временные хранилища облученного топлива и бассейны на атомных электростанциях оказываются заполненными настолько, что некоторые АЭС уже не имеют оперативного запаса емкости для аварийной выгрузки активной зоны.

Таким образом, проблема переработки ядерного топлива, его утилизации или прямого захоронения остается неразрешенной даже через 60 лет с основания и освоения атомной энергетики. В существующей обстановке весьма и весьма сложно говорить о путях и перспективах долговременного развития энергетических установок, работающих на принципе ядерного деления урана и плутония.

Однако можно несомненно утверждать, что если не на замену, то на укрепление позиций ядерной энергетики уже в ближайшее время придет термоядерный синтез. К этому разделу физики относятся ядерные реакции, в ходе которых ядра изотопов водорода соединяются в более тяжелые ядра атомов гелия с выделением энергии. Известно несколько разновидностей таких

реакций, из которых наибольшее значение для исследования приобрела реакция взаимодействия дейтерия и трития:

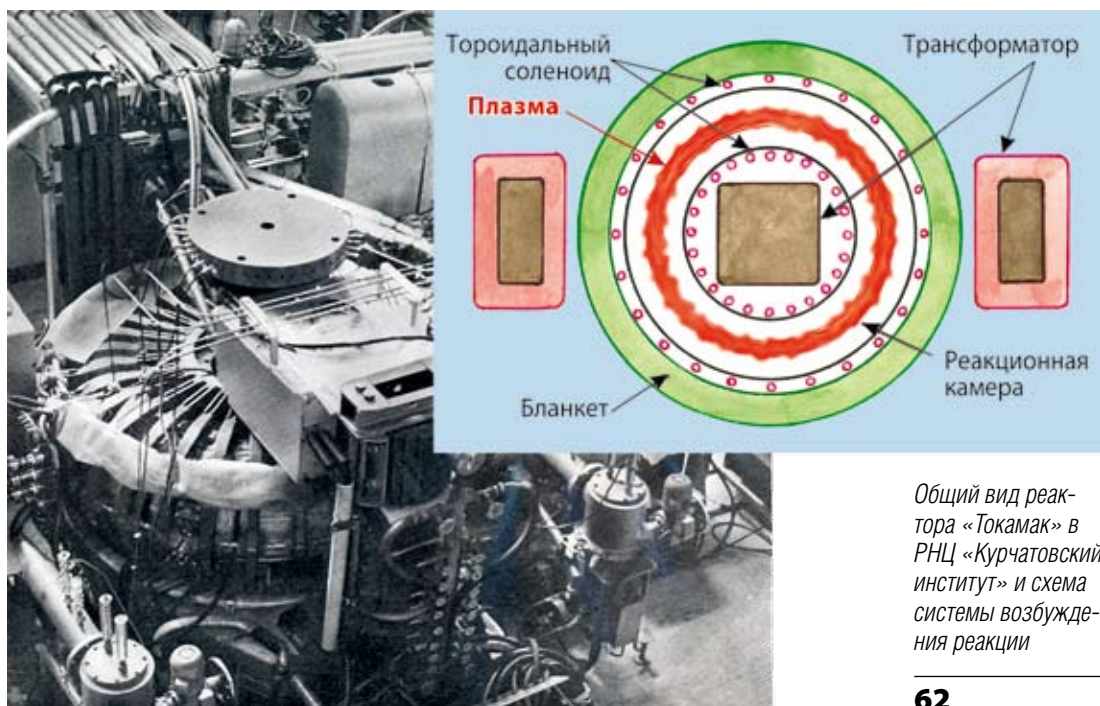


Данная реакция протекает в газовой смеси двух изотопов водорода при разогреве среды до нескольких десятков и даже сотен миллионов градусов с образованием атома гелия, одного нейтрона, а также сопровождается выделением тепла и гамма-излучением. При этом, в отличие от ядерного деления, не возникают радиоактивные продукты, а тепловой эффект на весовую единицу реагентов в 6-7 раз превышает теплотворность деления урана или плутония.

Именно такой могучий энергетический источник атомной энергии может эффективно способствовать решению экологической проблемы и освоению неиссякаемого запаса энергетического сырья в виде природного дейтерия и искусственного изотопа водорода - трития, получаемого посредством облучения лития.

Аналогичная реакция была практически осуществлена еще в пятидесятые годы прошедшего столетия при взрыве первой водородной бомбы. Но переход от военного до мирного использования термоядерного синтеза оказался намного длительнее, чем от взрыва атомной бомбы до атомной электростанции. Уже около шести десятилетий ученые целого ряда стран трудятся над освоением управляемого термоядерного синтеза.

На сегодняшний день в качестве принципиальной основы термоядерного реактора принята система «Токамак», разработанная учеными Российского Научного Центра «Курчатовский институт». Само название «Токамак» является сокращением от сочетания: тороидальная камера с магнитными катушками. Основная задача данной разработки заключается в создании условий для разви-



Общий вид реактора «Токамак» в РНЦ «Курчатовский институт» и схема системы возбуждения реакции

62

тия реакции, а именно образования плазмы водородных ядер, нагретой до сотни миллионов градусов.

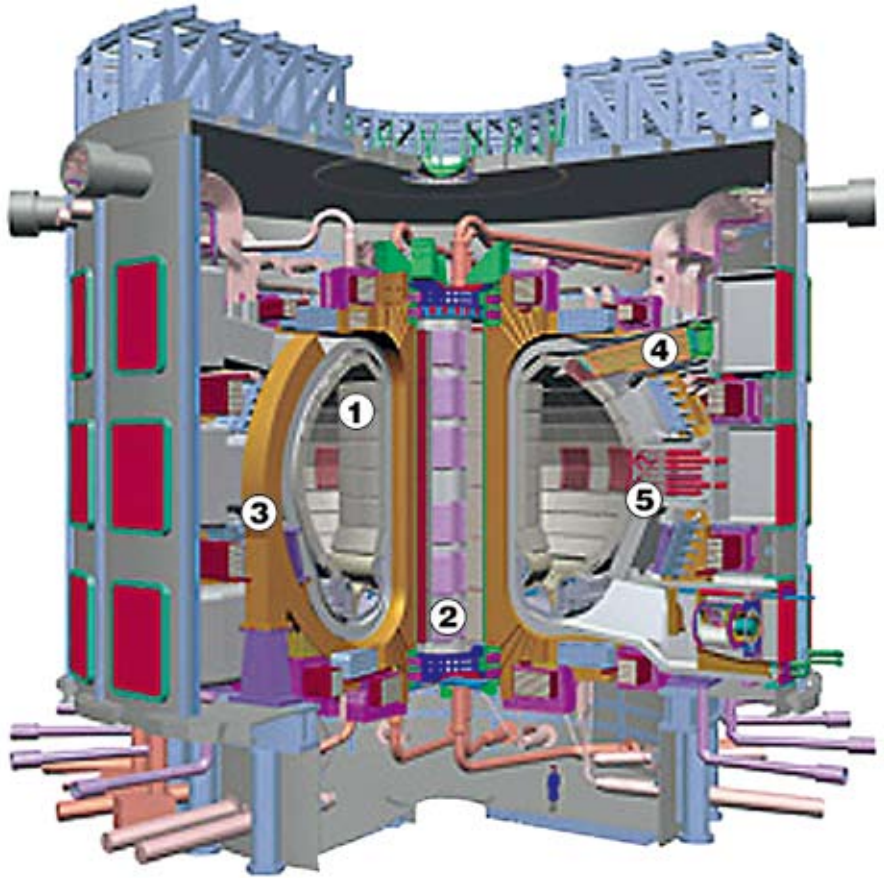
Под понятием плазмы подразумевается газовая смесь, в которой под воздействием высокой температуры происходит разделение вещества на свободные электроны и ядра, лишенные электронных оболочек. Такое состояние вещества достигается при нагреве до температуры в десятки и сотни миллионов градусов. Плазма проводит электрический ток и легко управляется электрическими и магнитными полями. Именно в условиях плазмы возникают и развиваются процессы термоядерного синтеза.

Принципиальная схема опытной установки для реализации данного процесса приведена на рисунке №62.

Роль реакционного сосуда установки выполняет тороидальная вакуумная камера, снабженная мощной электромагнитной системой и предназначенная для формирования шнура водородной плазмы

вдоль ее окружной оси. В систему входит электрический трансформатор, магнитное поле которого индуцирует ток в плазменном шнуре, выполняющим роль вторичной обмотки этого трансформатора. По всей внешней поверхности тороидальной камеры проходит обмотка соленоида, создающего внешнее магнитное поле параллельное течению индукционного тока в плазменном шнуре. При взаимодействии магнитного поля соленоида и индукционного тока возникает давление, сжимающее плазменный шнур вдоль оси тороидальной реакционной камеры. В этих условиях температура плазмы возрастает до уровня, необходимого для реакции синтеза в среде водородных ионов.

Комплекс российских разработок по созданию плазмы и удержанию ее в рабочем состоянии послужили веским основанием для международного признания перспектив данного направления. Однако технические сложности и высокая затратность проблемы ока-



63

Эскиз проектного варианта реактора «ИТЭР»:

- 1 – Тороидальная реакционная камера;*
- 2 – Центральный соленоид;*
- 3 – Тороидальный соленоид;*
- 4 – Коллекторы системы охлаждения;*
- 5 – Элементы blankets.*

зались непосильными для решения силами одной страны и вызвали необходимость международного сотрудничества. Так в июле 1992 года в Вашингтоне было подписано соглашение Правительств Российской Федерации, Соединенных Штатов Америки и Японии о разработке технического проекта Международного термоядерного экспериментального реактора «ИТЭР» («ITER»). Со временем, а именно к началу текущего столетия, круг участников проекта значительно расширился. В его состав вошли страны Евросо-

юза, Канада, Китай и Южная Корея.

Техническая разработка проекта экспериментального реактора «ИТЭР» была завершена в 2001 году, проведены переговоры и процедуры, связанные с выбором места сооружения и использования реактора. Строительство намечено осуществить в течение ближайшего десятилетия в Кадараше на юге Франции.

На рисунке №63 приведена схема энергетической установки, разработанной в ходе выполнения международной программы. За основу

конструкции принята тороидальная вакуумная камера с электромагнитной системой, аналогичной принципу «Токамака». Изображенные на схеме индукционные катушки и соленоиды образуют сверхпроводящую магнитную систему, предназначенную для разогрева плазмы. Магнитная система размещена в криостате, поддерживающем температуру электрических обмоток на уровне 4-х градусов Кельвина.

Общая высота реакторной установки достигает 25 метров, внутренний объем составляет около 2 000 кубических метров, а суммарный вес конструкции превышает 45 000 тонн.

Как сложная ядерно-физическая система, установка «ИТЭР» снабжена серией взаимно связанных систем управления, слежения, регулирования технологического процесса, а также обеспечения безопасности и защиты. Большинство этих систем, в данном случае, представляют просто познавательный интерес. Тем не менее, некоторые особенности нового энергетического принципа, заложенного в проекте, имеют вполне конкретную практическую ценность для перспективного развития производства и на Новосибирском заводе химконцентратов.

В разряд таких особенностей входит, прежде всего, наличие процесса регенерации ядерного топлива, а именно сверхтяжелого водорода – трития.

В ходе каждого акта реакции ядерного взаимодействия дейтерия и трития образуется ядро гелия и один нейтрон. При этом кинетическая энергия движения нейтрона составляет около 80-ти процентов суммарного эффекта, а сам нейтрон является активным ядерным реагентом. Для утилизации нейтронов и преобразования их энергии в термоядерном реакторе предусмотрено специальное устройство, называемое бланкетом.

Упрощенно бланкет представляет внешний сплошной барьер, охватывающий тороидальную реакционную камеру и исключающий утечку нейтронов за пределы рабочего объема. В состав бланкета входит система утилизации энергии и передачи ее в виде нагретого теплоносителя в турбогенераторный энергетический цикл.

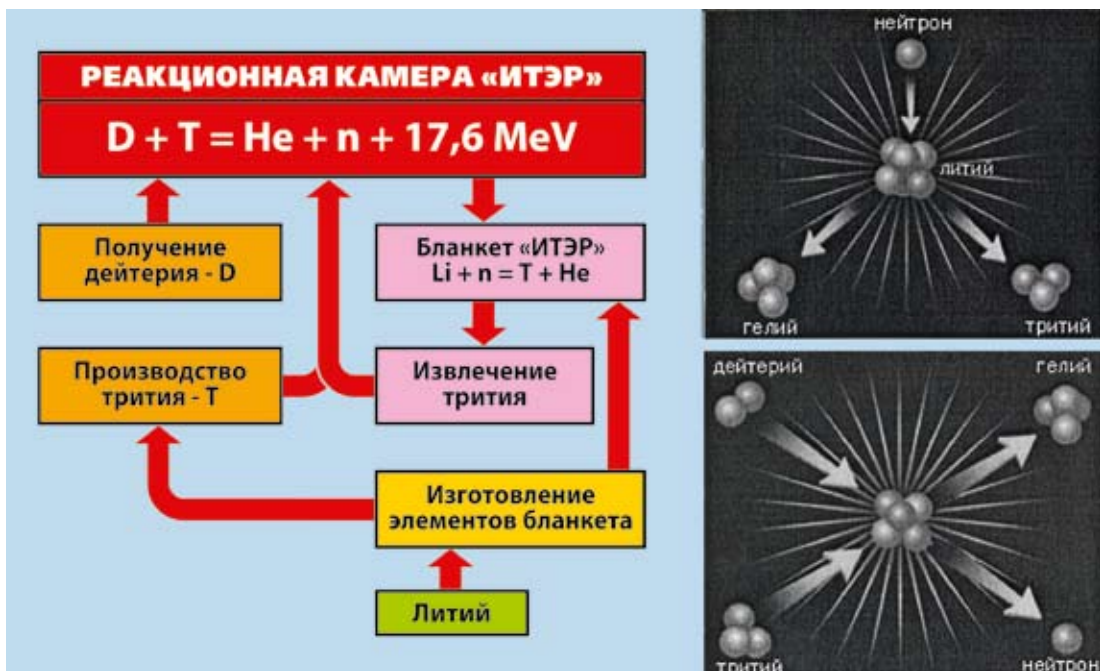
В качестве поглотителя нейтронов в состав материала бланкета вводится литий, который при взаимодействии с нейтроном образует гелий и тритий по реакции: $Li + n = He + T$.

Реакция нейтронного облучения лития в сочетании с основным процессом ядерного синтеза представляет замкнутый топливный цикл.

Элементарный водород, а в данном случае тритий, обладает определенной и весьма существенной растворимостью как в твердых металлах, так и в их расплавах. С некоторыми металлами тритий образует гидриды, что существенно увеличивает степень поглощения и сохранения этого газа.

Учитывая существующий опыт разработки и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах и аппаратов космической техники, в качестве теплоносителя главного, первого контура экспериментального реактора принят расплавленный металлический литий или сплав на его основе, который обеспечивает снятие тепловой энергии с единовременным воспроизводством трития.

Кроме того, для достижения условий расширенного воспроизводства трития в бланкете предполагается использовать размножение нейтронов за счет ядерных реакций типа $(n,2n)$. В качестве размножителей нейтронов, имеющих необходимый пороговый уровень соответствующих ядерных реакций, достаточное сечение и малый паразитный захват, предполагаются



Ядерный топлив-
ный цикл реактора
«ИТЭР»

64

бериллий, цирконий, свинец, висмут и их соединения.

Практическое конструктивное решение реакторных систем теплопередачи, утилизации нейтронов, обеспечения работоспособности и ядерной безопасности, а также выбор реальной схемы топливного цикла будут базироваться на опыте проверки и эксплуатации экспериментальной установки. В данный момент несомненна только перспектива применения лития в твердом виде или в жидком состоянии, в составе сплавов или соединений, в природном либо измененном изотопном соотношении.

Известно, что в качестве рабочей среды для проведения некоторых ядерных реакций в нейтронном поле исследовательских реакторов используют металлические сплавы или металлокерамику. При этом как основу сплавов и композиционных материалов выбирают металлы, не образующие при облучении долгоживущих радиоактивных изотопов. К разряду таких материалов можно отнести алюминий, титан,

магний, кремний, скандий и ряд других металлов. Из этого перечня наиболее изученным и испытанным материалом можно считать алюминий, разнообразные сплавы которого применяются в ядерной технике практически на протяжении всего ее существования.

В процессе многолетнего сотрудничества и обеспечения исследовательских реакторов рабочими и поглощающими элементами активной зоны, НЗХК приобрел значительный арсенал знаний и практического опыта по данной проблеме. Предприятие обладает технологиями и техническими средствами по производству реакторных материалов, владеет способами восстановления металлов, выплавки и литья сплавов, горячей и холодной механической и термической обработки. На этой основе предприятие способно оперативно сформировать и ввести в действие производство поглощающих материалов для blankets реактора «ИТЭР», организовать серийный выпуск сменных элементов для зоны воспроизводства трития

и обеспечить высокие технические характеристики этого важнейшего звена энергетической установки.

Сегодня Новосибирский завод химконцентратов является не только одним из основных звеньев действующего ядерного топливного цикла России, но и обладателем важнейших средств перспективного развития атомной энергетики.