



# Эволюция твэлов транспортных реакторов. От К-3 до "Бореев" и "Ясеней".

Доктор технических наук, главный эксперт ВНИИНМ А.В.Ватулин





## Введение

Топливо для первой АПЛ было разработано учёными Института атомной энергии (ИАЭ).

Они пошли по простому пути — попытались приспособить топливо энергетических реакторов под транспортные. Для оболочки тепловыделяющих элементов предложили использовать нержавеющую сталь 1X18H9T, хорошо зарекомендовавшая себя в котлостроении, в качестве топливной композиции выбрали диоксид урана в виде спечённых таблеток.

Тестировали и другой вариант — виброуплотнённая крупка диоксида урана, пропитанная свинцово-висмутовым сплавом, который при рабочей температуре находился в жидком состоянии. Конструкция твэла — стержень диаметром около 6 мм.

Кампания первых активных зон была 500 часов.

Однако даже такую, по сегодняшним меркам, мизерную кампанию твэлы не обеспечили.

Уже в сентябре 1962 года, практически сразу после похода в июле на северный полюс, произошла разгерметизация твэлов.

По этой и ряду других причин корабль на долго, до декабря 1965 г. встал на ремонт и модернизацию, в ходе которой произошла замена активных зон и всего реакторного отсека.

В этот же период ВНИИНМ была поручена разработка ядерного топлива для транспортных реакторов.



## **Особенности тепловыделяющих элементов активных зон транспортных реакторов**

**Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) - важнейший элемент активной зоны, в значительной мере определяющий её надёжность, и безопасность, как источника тепловой энергии.**

**Активные зоны транспортных реакторов неремонтируемые изделия. С начала эксплуатации и до выработки назначенного энергоресурса не возможна замена тепловыделяющих сборок с разгерметизированными ТВЭлами. Отсюда следует, что надёжность ТВЭлов должна быть исключительно высокой.**

**В дополнение к этому при разгерметизации оболочек выход радиоактивных осколков деления в теплоноситель не должен приводить к резкому росту радиоактивности теплоносителя и прекращению эксплуатации объекта. Даже при случайной разгерметизации оболочек должна быть обеспечена выработка назначенного энергоресурса.**

**ТВЭлы должны обладать высокой стойкостью к изменениям температуры с различными скоростями и амплитудой.**



## **Особенности тепловыделяющих элементов активных зон транспортных реакторов**

**Специалисты ВНИИНМ определили, что обеспечить выполнение этих жёстких требований можно, применив дисперсионные твэлы.**

**Дисперсионный твэл состоит из сердечника и оболочки. Сердечник состоит из ядерного топлива в виде частиц различной формы, распределённых в металлической матрице, имеющей высокую теплопроводность. Сердечник прочно соединён с оболочкой.**

**Необходимо было определить конструкционные материалы (оболочка, матрица) и ядерное топливо, подходящее для твэла транспортного реактора.**

**Оболочка является главным барьером, препятствующим выходу радиоактивных продуктов в теплоноситель. Материал оболочки должен обладать высокой коррозионной и радиационной стойкостью. На момент разработки нового твэла<sup>1)</sup> альтернативы нержавеющей стали для материала оболочки трудно было представить. Опыта использования циркония не было, первый ВВЭР с твэлами с циркониевыми оболочками был введён в эксплуатацию в 1964 г. Поэтому материалом оболочки стала улучшенная нержавеющая сталь 03X16H15M3Б (ЭИ-844).**

<sup>1)</sup> Новая конструкция твэла должна была быть разработана, а активные зоны изготовлены в 1964 г.



## **Технология изготовления дисперсионных ТВЭЛОВ**

**В качестве оболочки ТВЭЛОВ активных зон ПЛА применяются особотонкостенные трубы с заданными физико-механическими свойствами и геометрическими размерами. Поскольку оболочка является основным барьером, препятствующем выходу радиоактивных осколков в теплоноситель, технология изготовления дисперсионного ТВЭЛА должна обеспечивать сохранение её структуры, физико-механических свойств и толщины на заданном уровне.**

**Такая технология разработана специалистами АО «ВНИИНМ» и АО «МСЗ». Ключевой технологической операцией является заполнение жидким матричным материалом оболочки с виброуплотненными частицами ядерного топлива. Эта операция (заливка) выполняется методом вакуумного литья под давлением.**

**Уникальная технология позволяла практически без изменения технологического оборудования изготавливать ТВЭЛЫ различной формы с различными оболочечными материалами и топливными композициями. Это обеспечило её высокий инновационный потенциал.**



# Разработка топливной композиции

## Матрица

Технологические исследования показали, что наилучшим из литейных сплавов, которые подходят для данной технологии, является **силумин**.

**Силумин**<sup>2)</sup> обладает необходимыми технологическими и эксплуатационными свойствами :

- низкой температурой плавления (580 °С) и низкой температурой заливки ( 630°С);
- высокой жидкотекучестью;
- герметичностью;
- минимальной усадкой при затвердевании;
- прочным металлургическим соединением с оболочкой;
- высокой теплопроводностью;
- высокой коррозионной стойкостью.

## Ядерное топливо

Ядерное топливо не должно взаимодействовать с жидким матричным материалом в течение кратковременной (не более 10 мин) технологической операции заливки. Кроме того, в процессе работы на мощности в течение длительного времени (десятки тысяч часов) также не должно быть взаимодействия, приводящего к изменению дисперсионной структуры и увеличению объема топливной композиции.

<sup>2)</sup> Состав эвтектического сплава в % масс. (Si (11,4 - 12,2), Ni (1,9 - 2,2), Al - остальное)).



# Разработка топливной композиции

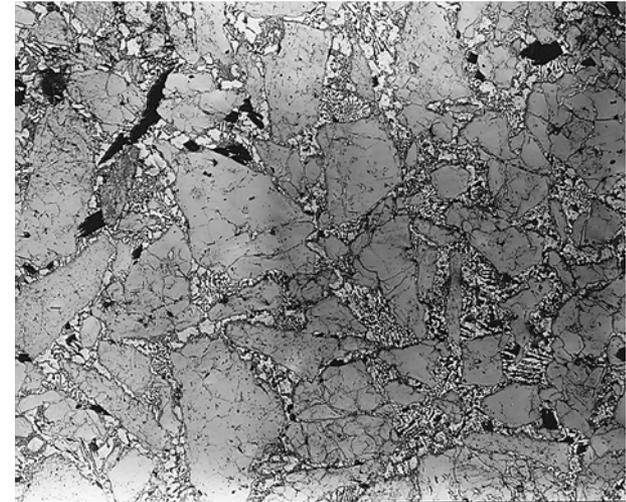
## Ядерное топливо

Термодинамический анализ системы U-Al-Si, технологические и реакторные эксперименты показали, что стабильность структуры топливной композиции обеспечивается, если в качестве ядерного топлива используется интерметаллид  $U(Al, Si)_x$ .

Выбор оказался правильным. Топливная композиция «интерметаллид урана  $U(Al, Si)_x$ , диспергированный в силуминовой матрице» прошла представительные испытания и эксплуатацию в твэлах петлевых ТВС, ледокольных, стендовых и корабельных активных зон. Результаты испытаний и послереакторных исследований подтвердили хорошие служебные характеристики топливной композиции, способные обеспечить высокие ресурсные показатели дисперсионных твэлов корабельных активных зон.

Положительными свойствами топливной композиции являются:

- высокая радиационная стойкость;
- хорошая технологичность, обеспечивающая получение качественных дисперсионных сердечников для твэлов различных конструкций
- низкое распухание в условиях корабельных активных зон;
- хорошая коррозионно-эрозионная стойкость, обеспечивающая низкий прогнозируемый рост активности теплоносителя первого контура в случае случайной разгерметизации твэлов.

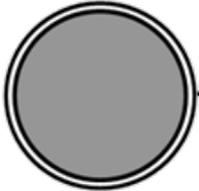


Характерная макроструктура топливной композиции  $U(Al, Si)_x$  + силумин.



## Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА

Первые дисперсионные твэлы с топливной композицией  $U(Al,Si)_x$ +силумин, представляли собой стержни диаметром ~ 6 мм с оболочкой из нержавеющей стали ЭИ-844 толщиной 0,3 мм (позиция 1). Активные зоны с данными твэлами имели низкую надежность. Разгерметизация оболочек начиналась при выработке половины назначенного энергоресурса и накоплении осколков деления в единице объема топливной композиции 0,15-0,2 г/см<sup>3</sup>.

Первое и второе поколение Твэл СТ Нержавеющая сталь	Второе поколение Кольцевой твэл Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11СКГ Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11-5/02 Нержавеющая сталь	Четвертое поколение Твэл 21-1 Сплав 42ХНМ
				
1	2	3	4	5

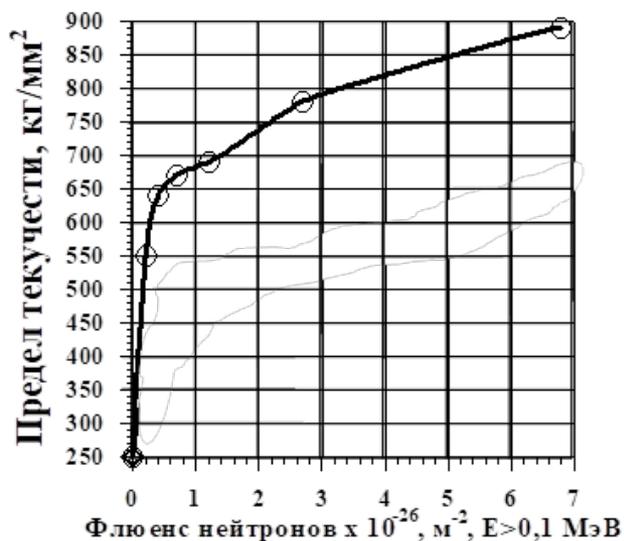


# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА

## Причина разрушения оболочки

Нержавеющая сталь подвержена радиационному охрупчиванию. Под действием облучения увеличивается предел текучести и резко падает пластичность (рисунок). Кроме того, скорость радиационной ползучести стали ниже скорости деформирования оболочки<sup>3)</sup> от распухания сердечника, поэтому в оболочке возникают пластические деформации. И поскольку оболочка постоянно деформируется, в ней даже при незначительной пластической деформации возникают высокие напряжения.

Изменение предела текучести  
в зависимости от флюенса,  
температура испытаний 300 °С



Изменение равномерного удлинения  
в зависимости от флюенса,  
температура испытаний 300 °С



### Изменение прочностных характеристик стали ЭИ844 под облучением

<sup>3)</sup> Скорость деформирования оболочки не превышает  $(0,1-2,0) \cdot 10^{-4} \text{ \%}/\text{ч}$

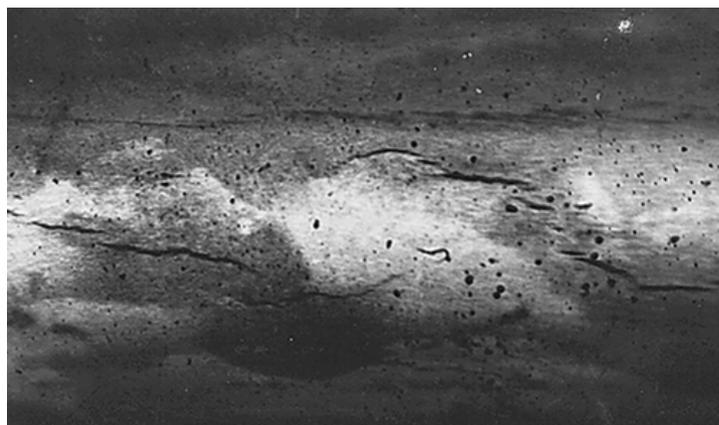


## **Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА**

### **Причина разрушения оболочки**

**В коррозионно активной среде теплоносителя высокие напряжения приводят в действие механизм коррозионного растрескивания, который и является причиной разгерметизации оболочки.**

**На рисунке показаны типичные трещины в стальных оболочках стержневых твэлов активных зон ПЛА, возникающие из-за коррозионного растрескивания под напряжением.**



**Типичные трещины, в стальных оболочках стержневых твэлов активных зон ПЛА**

**Для повышения надежности дисперсионных твэлов с оболочкой из нержавеющей стали необходимо было снизить скорость деформирования оболочки и величину накопленной деформации.**



# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА

## Кольцевые твэлы

Разработка специалистами АО «ВНИИНМ» кольцевого твэла позволила решить эту задачу. В кольцевом твэле (позиция 2) две оболочки - наружная и внутренняя. Между ними расположена топливная композиция. Такая конструкция позволила перенаправить часть деформации, возникающей от распухания топлива на внутреннюю, находящуюся в сжатом состоянии, оболочку, уменьшив тем самым скорость деформирования и накопленную деформацию внешней оболочки твэла. Активные зоны реакторов ПЛА второго поколения с кольцевыми твэлами работали хорошо и к ним не было претензий.

Первое и второе поколение Твэл СТ Нержавеющая сталь	Второе поколение Кольцевой твэл Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11СКГ Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11-5/02 Нержавеющая сталь	Четвертое поколение Твэл 21-1 Сплав 42ХНМ
1	2	3	4	5

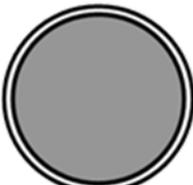
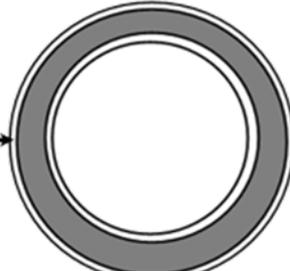


# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА

## Третье поколение твэлы СКГ и 11-5/02

Активные зоны ПЛА третьего поколения имеют существенно больший энергоресурс и энергонапряженность по сравнению с активными зонами второго поколения. Кольцевые твэлы не обеспечивали теплотехническую надежность, поэтому необходимо было разработать твэл с большей поверхностью теплосъема, сохранив низкие значения скорости деформирования и накопленной деформации оболочки.

В результате расчетных исследований была выбрана крестообразная форма твэла (позиция 3). В этой конструкции деформация растяжения оболочки, которая была в стержневых и кольцевых твэлах, заменена на деформацию изгиба во впадине профиля. Кроме того, эти твэлы закручены вдоль продольной оси, что обеспечивает их самодистанционирование в ТВС.

Первое и второе поколение Твэл СТ Нержавеющая сталь	Второе поколение Кольцевой твэл Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11СКГ Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11-5/02 Нержавеющая сталь	Четвертое поколение Твэл 21-1 Сплав 42ХНМ
				
1	2	3	4	5

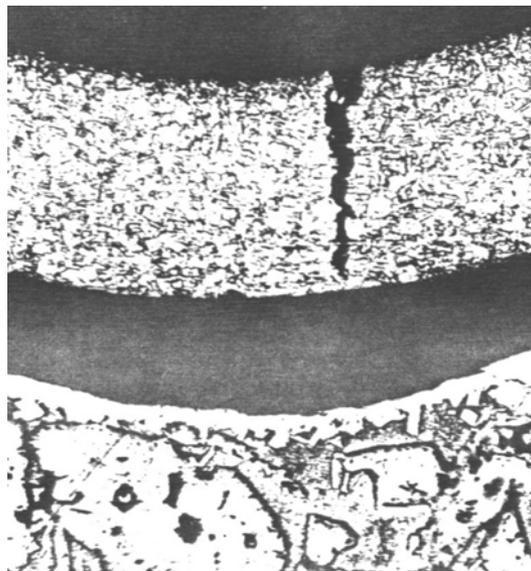


## **Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Третье поколение твэлы СКГ и 11-5/02**

**Испытания твэлов в петлевых сборках и в активных зонах атомных ледоколов подтвердили правильность принятого решения, первые активные зоны ПЛА третьего поколения были укомплектованы твэлами 11СКГ.**

**Однако проектное значение энергоресурса не было обеспечено, разгерметизация оболочек, хотя и при больших накоплениях осколков деления имела место.**

**Причина разгерметизации та же, коррозионное растрескивание под напряжением. На рисунке приведен вид разрушения оболочки крестообразного твэла 11СКГ. Разрушение хрупкое трещина проходит по границам зерен.**



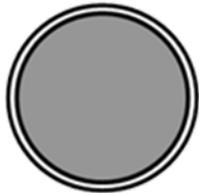
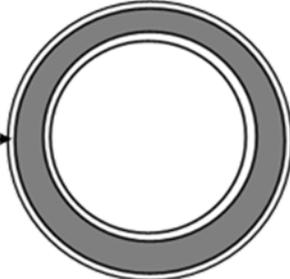
**Трещина в оболочке твэла СКГ**



# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА

## Третье поколение твэлы СКГ и 11-5/02

Для повышения энергоресурса активных зон ПЛА третьего поколения была разработана новая конструкция крестообразного твэла 11-5/02 (позиция 4). Предполагалось, что полость, созданная в топливной композиции, будет способствовать уменьшению величины накопленной деформации оболочки за счет того, что в нее, по аналогии с кольцевым твэлом, частично или полностью будет распухать топливная композиция. Твэлы 11-5/02 были внедрены в серийное производство и позволили увеличить энергоресурс активных зон ПЛА третьего поколения на 20%. Однако исключить разгерметизацию оболочек не удалось.

Первое и второе поколение Твэл СТ Нержавеющая сталь	Второе поколение Кольцевой твэл Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11СКГ Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11-5/02 Нержавеющая сталь	Четвертое поколение Твэл 21-1 Сплав 42ХНМ
				
1	2	3	4	5



## **Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Четвёртое поколение. «Борей» и «Ясень»**

**Проектный энергоресурс активных зон ПЛА четвертого поколения почти в два раза больше, чем у активных зон третьего. Было очевидно, что обеспечить его, используя нержавеющую сталь в качестве материала оболочки невозможно. Был нужен новый оболочечный материал, который обеспечил бы качественный рывок в повышении ресурсных характеристик твэлов.**

**Опыт проектирования подсказывал, что новый оболочечный материал должен в идеале обладать следующими свойствами:**

- стойкость к общей коррозии не хуже чем у нержавеющей стали;**
- существенно большая чем у нержавеющей стали стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением;**
- лучшая чем у нержавеющей стали радиационная стойкость;**
- скорость ползучести, соизмеримая или более высокая, чем скорость деформирования оболочки.**

**Такой материал был найден.**



# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Четвёртое поколение. «Борей» и «Ясень»

## Новый материал для оболочки сплав 42ХНМ

Сплавы на основе никеля, легированные хромом и молибденом, привлекли к себе внимание из-за уникальной коррозионной стойкости. Так сплав ЭП630 (Ni осн., 46-47 % Cr, 1,0-1,5 % Mo) используется для изготовления оборудования для растворения отработавшего топлива в азотной кислоте. Этот сплав был выбран в качестве основы для разработки нового материала оболочки. После оптимизации его состава и метода выплавки он получил марку 42ХНМ.

Поскольку нержавеющие стали, в том числе и ЭИ844, тоже имели высокую стойкость к равномерной коррозии, но были подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением в теплоносителе первого контура, необходимо было проверить хромоникелевый сплав на склонность к такому виду разрушения.

Для проведения испытаний на выявление склонности материала к межкристаллитному коррозионному растрескиванию под напряжением в АО «ВНИИНМ» разработана методика, получившая название «ампульная». Суть методики заключается в выдержке ампулы, наполненной примерно наполовину различными коррозионно активными водными средами (соли морской воды, KOH, смесь HCl и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) и герметизированной заглушками. Температура оболочки в условиях испытаний изменяется по высоте ампулы от 250 до 350°C и поддерживается постоянной во времени. При этом максимальные напряжения в оболочке ампул от давления пара достигают 220 МПа.



# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Четвёртое поколение. «Борей» и «Ясень» Новый материал для оболочки сплав 42ХНМ

Ампульные испытания показали, что хромоникелевый сплав обладает уникальной стойкостью к межкристаллитному коррозионному растрескиванию, существенно, на несколько порядков, превосходит по этой характеристике нержавеющую сталь.

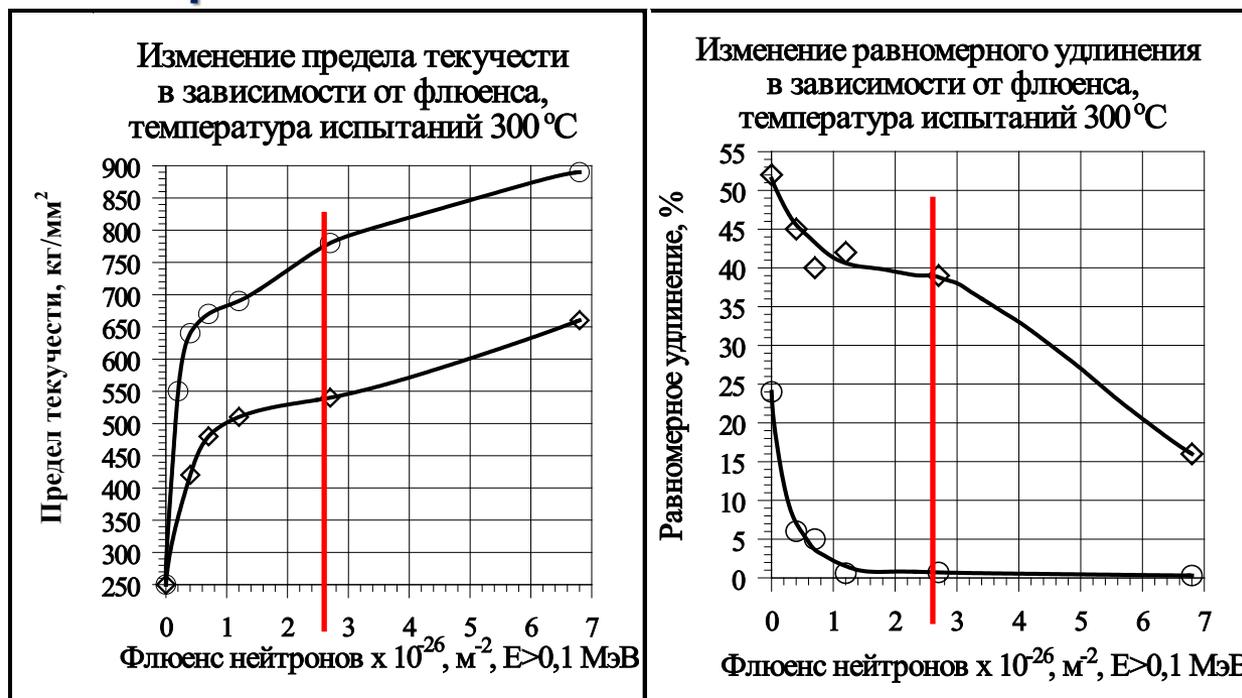
Материал	Среда испытаний	Время выдержки, ч	Результаты испытаний
ЭИ844	100мг/л Cl <sup>-</sup> (FeCl <sub>3</sub> )	260	Все ампулы разрушены
42ХНМ	100 мг/л HCl + 1,5 моля H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH~1	>180 000	Разрушенных ампул нет
	50 мг/л KOH	>180 000	
	100мг/л Cl <sup>-</sup> (FeCl <sub>3</sub> )	>180 000	



# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Четвёртое поколение. «Борей» и «Ясень»

## Новый материал для оболочки сплав 42ХНМ

По радиационной стойкости сплав тоже превзошёл штатный оболочечный материал - сталь ЭИ844.



○ - нержавеющая сталь, ◇ - хромоникелевый сплав

— Максимальное значение флюенса в активных зонах 4-го поколения

Скорость радиационной ползучести сплава оказалась приблизительно в 4 раза выше скорости ползучести стали ЭИ844. Следовательно, при равной скорости деформирования, напряжения в оболочках твэлов из сплава 42ХНМ будут ниже, чем в оболочках из стали ЭИ844БУ ИД.



# **Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Четвёртое поколение. «Борей» и «Ясень» Новый материал для оболочки сплав 42ХНМ**

**Проведена материаловедческая аттестация сплава 42ХНМ как оболочечного материала твэлов активных зон транспортных реакторов и АСММ.**

**Свойства сплава 42ХНМ определялись в сравнении со свойствами базового материала - сталью ЭИ844. Испытываемые образцы и условия испытаний были одинаковы для обоих материалов. В результате такого подхода были наглядно продемонстрированы преимущества нового материала.**

**Напомню, что деформирование оболочки происходит с низкой скоростью. Из-за прочного соединения с сердечником оболочка деформируется вместе с ним, поэтому локализация деформации в каком-либо сечении по её периметру невозможна. Такая схема деформирования называется жёсткой схемой.**

**Критерием разрушения оболочки при такой схеме нагружения и деформирования является предел длительной пластичности.**

**Предел длительной пластичности – это значение деформации при которой происходит разрушение материала, деформируемого по жёсткой схеме. Величина предела длительной пластичности определяется в реакторных экспериментах на имитаторах твэлов с пухнущими композициями и на твэлах.**



# Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Четвёртое поколение. «Борей» и «Ясень»

## Новый материал для оболочки сплав 42ХНМ

Результаты испытаний гладкостержневых имитаторов твэлов в воде представлены на рисунке 15.

Длительная пластичность сплава 42ХНМ в условиях облучения существенно выше, чем у стали ЭИ844. Оболочки из стали начинают разрушаться при флюенсе  $3,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$  ( $E > 0,1 \text{ МэВ}$ ) и деформациях  $\sim 0,7 \%$ , а при флюенсе  $4,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$  и деформациях  $0,8 - 1,9 \%$  происходит разрушение всех испытываемых образцов. Вид разрушения (по границам зерен) не отличается от разрушения оболочек твэлов. Разрушения оболочек из сплава 42ХНМ при данном виде деформирования пока получить не удалось, хотя достигнута деформация  $8,2\%$ .





## Развитие конструкции твэла для активных зон ПЛА Четвёртое поколение. «Борей» и «Ясень»

Анализ поведения конструкций твэлов 11СКГ и 11-5/02 в условиях корабельных активных зон не выявил решающего преимущества ни одной из них. Учитывая более простую конструкцию и технологию изготовления твэла 11СКГ, она была выбрана для твэла активной зоны ПЛА четвертого поколения (позиция 5). Внешний вид макета твэла 21-1 показан на рисунке.

Первое и второе поколение Твэл СТ Нержавеющая сталь	Второе поколение Кольцевой твэл Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11СКГ Нержавеющая сталь	Третье поколение Твэл 11-5/02 Нержавеющая сталь	Четвертое поколение Твэл 21-1 Сплав 42ХНМ
1	2	3	4	5



Макет самодистанционирующегося крестообразного твэла для активной зоны ПЛА четвертого поколения



## **Заключение**

**Существенно повышены показатели надежности активных зон.**

**Новая конструкция твэлов на всех этапах испытаний и эксплуатации продемонстрировала 100% безотказность.**

**Разработка твэла 21-1 позволила проектантам увеличить энергоресурс активных зон более чем на 50%.**

**Значительно повышена экологическая безопасность. За счет исключения разгерметизации оболочек твэлов на два порядка снизилась радиоактивность теплоносителя первого контура активных зон, дозовая нагрузка на персонал при перегрузке активных зон, количество и радиоактивность жидких и газообразных отходов, образующихся при эксплуатации ЯРУ.**

**К настоящему времени завершено облучение ~ 50 тыс. твэлов и около 100 тыс. ещё находятся на различной стадии облучения. Ни разу не была зафиксирована разгерметизация твэлов износостойкого характера. Более того, послереакторные исследования отработавших твэлов не выявили каких-либо признаков деградации свойств материалов, свидетельствующих о снижении их надежности.**



**Спасибо за внимание!**

