

Курс лекций
«Материаловедческие аспекты основ
проектирования и конструирования
тепловыделяющих элементов
энергетических ядерных реакторов»

А.С. Сотников

Тема №9

**Основные проектные критерии работоспособности
твэлов, формулировка критерия, расчётно-
экспериментальное обоснование**

1. Введение в проектные критерии
2. Прочностной критерий SC1. Коррозионное растрескивание под напряжением в присутствии агрессивных продуктов деления
3. Прочностной критерий SC2. Предельные эквивалентные напряжения в оболочке
4. Прочностной критерий SC3. Потеря окружной устойчивости оболочки от перепада давления
5. Прочностной критерий SC4. Усталостная и длительная прочность оболочки
6. Прочностной критерий SC5. Предельная остаточная деформация оболочки

Тема №9

**Основные проектные критерии работоспособности
ТВЭЛОВ, формулировка критерия, расчётно-
экспериментальное обоснование**

7. Деформационные критерии DC1 и DC2
8. Теплофизический критерий TC1. Предельная температура топлива
9. Теплофизический критерий TC2. Предельное значение давления газов под оболочкой ТВЭЛА
10. Коррозионные критерии KC1 и KC2
11. Критерий FD. Фреттинг-износ оболочки
12. Эксплуатационные критерии. Критерий OC1. Предельная линейная мощность ТВЭЛА. Критерий OC2. Допустимые скачки мощности в ТВЭЛЕ в зависимости от выгорания
13. Критерии безопасности в авариях
14. Критерии проекта перегрузки по работоспособности ТВЭЛА

1. Введение в проектные критерии

Тепловыделяющий элемент является сборочной единицей топливной кассеты и предназначен для выполнения следующих функций:

- генерация тепловой энергии;
- передача тепловой энергии от топлива к теплоносителю;
- удержание топлива и продуктов его деления от проникновения в теплоноситель.

Исходя из функционального назначения ТВЭЛ, к его конструкции предъявляются следующие требования:

- герметичность (требование А);
- обеспечение заданных эксплуатационных и иных характеристик РК и ТВС кассеты АРК (требование В).

Проектные критерии в соответствии с отмеченными выше требованиями к конструкции твэла, а также в соответствии с нормативными документами, условно делятся на две категории:

- проектные критерии, связанные со всеми известными механизмами разрушения твэла (требование А);
- проектные критерии, прямо или косвенно связанные с такими изменениями геометрических размеров твэлов, которые могут привести к нарушению заданных эксплуатационных характеристик кассет (требование В).

При анализе топливной системы в режимах НЭ и ННЭ рассматриваются:

- напряжения, деформации и нагрузки элементов конструкции твэла;
- общее число циклов нагружения и длительное воздействие статических нагрузок;
- окисление и наводороживание оболочек твэлов;
- размерные изменения твэлов;
- внутреннее давление газовой среды в твэле;
- гидравлические нагрузки;
- фреттинг-износ;
- температура топлива;
- изменение свойств топливных и конструкционных материалов в процессе эксплуатации.

Таблица 1 – Проектные критерии для твэлов

Обозначение	Наименование	Требования к конструкции твэла	Причина введения	Предельное значение	Способ обоснования
SC1	Коррозионное растрескивание под напряжением в присутствии агрессивных продуктов деления	A	Исключение разрушения по механизму КРН	Напряжение в оболочке 280 МПа	Расчет
SC2*	Предельные эквивалентные напряжения в оболочке	A	Разрушения твэла вследствие чрезмерных деформаций	Предел текучести	Расчет
SC3	Потеря окружной устойчивости оболочки от перепада давления			Предельное давление	

Таблица 1 – Проектные критерии для твэлов (продолжение)

SC4	Усталостная и длительная прочность оболочки	A	Исключение разрушения по механизму усталостной и длительной прочности	Кривая длительной прочности, кривая усталостной прочности	Расчет
SC5**	Предельная остаточная деформация оболочки	A	Исключение разрушения вследствие РСМІ	Остаточная деформация оболочки 0,5 %	Расчет
DC1	Предельное значение изменения диаметра оболочки	A, B	Исключение фреттинг-износа оболочки и нарушения теплогидравлики кассеты	Изменение диаметра твэла -0,12/+0,03 мм	Расчет
DC2	Предельное значение удлинения твэла	A, B	Исключение искривления твэлов, разрушения от взаимодействия твэла с головкой кассеты	Удлинение твэла 31,5 мм	Расчет

Таблица 1 – Проектные критерии для твэлов (продолжение)

ТС1	Предельная температура топлива	A	Исключение разрушения от взаимодействия оболочки с расплавленным топливом	Температура плавления топлива	Расчет
ТС2	Предельное значение давления газов под оболочкой твэла	A, B	Разрушение вследствие чрезмерных деформаций, перекрытие проходного сечения кассеты	Давление теплоносителя	Расчет
КС1	Окисление наружной поверхности оболочки	A	Исключение перегрева оболочки и снижения прочностных характеристик оболочки	Толщина окисной пленки 60 мкм	Опыт эксплуатации
КС2	Гидрирование оболочки	A	Исключение охрупчивания и снижения несущей способности оболочки	Содержание гидридов 400 ppm	Опыт эксплуатации
FD***	Фреттинг-износ оболочки	A	Исключение фреттинг-износа оболочки	Не допускается в степени, влияющей на работоспособность твэла	Опыт эксплуатации

Таблица 2 – Взаимосвязь проектных, эксплуатационных критериев с основным критерием GDC 10

Проектный критерий (твэла)	Проектный критерий (TBC)	Эксплуатационный критерий	Основной проектный критерий
SC1		OC2	GDC 10
SC2			
SC3			
SC4			
SC5			
DC1	3.2.2		
DC2	3.3.4.2		
TC1	5.2.3		
TC2	5.3.1, 5.3.3	OC1	
KC1			
KC2			
FD			

Анализ работоспособности твэлов производится в терминах коэффициентов запаса, для чего вводятся следующие понятия:

- предельное значение параметра – $R_{\text{пред}}$,
- допустимое значение параметра – $[R]$,
- расчетное или экспериментальное значение параметра – R ,
- расчетный коэффициент запаса – K ,
- нормативный коэффициент запаса – $[K]$.

При этом отмеченные выше параметры и коэффициенты запаса связаны между собой следующими соотношениями:

$$[R] = R_{\text{пред}} / [K] \quad (\text{A.1})$$

$$K = R_{\text{пред}} / R \quad (\text{A.2})$$

Проектный критерий выполняется, если $K \geq [K]$, либо $R \leq [R]$.

Нормативные коэффициенты запаса вводятся для того, чтобы перекрыть все неопределенности, присущие расчетным методикам, параметрам конструкции и эксплуатации.

При назначении нормативных коэффициентов запаса для проектных критериев должен учитываться ряд факторов.

1. Значимость критериального параметра для безопасности топлива.
2. Степень зависимости технико-экономических показателей топлива от назначаемых нормативных коэффициентов запаса.
3. Точность методики определения (расчета) численного значения параметра.
4. Неопределенности (допуска) параметров конструкции твэла и эксплуатации.
5. Степень консерватизма, принимаемого при определении (расчете) значений критериального параметра.
6. Опыт эксплуатации топлива, спроектированного и обоснованного с применением данных методик и нормативных коэффициентов запаса.

2. Прочностной критерий SC1. Коррозионное растрескивание под напряжением в присутствии агрессивных продуктов деления

2.1 Причина введения критерия SC1

Условия эксплуатации твэлов в активной зоне характеризуются наличием коррозионной среды под оболочкой, что совместно с действием механического нагружения может, при определенных условиях, приводить к развитию процесса коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) циркониевых оболочек твэлов. Под оболочкой твэла агрессивная по отношению к цирконию среда создается за счет продуктов деления, определяющую роль среди которых, как показали экспериментальные исследования, играет йод.

2.2 Механизмы коррозионного растрескивания под напряжением оболочек ТВЭЛОВ

Коррозионно-активная среда вызывает замедленное разрушение материала оболочки после ее пребывания в течение некоторого времени (так называемый инкубационный период) при постоянной нагрузке, которая может не достигать макроскопического предела текучести материала. При этом существует пороговый уровень нагружения, ниже которого замедленного разрушения не происходит независимо от концентрации коррозионной среды.

Данное представление справедливо как для оболочки без исходных трещин на внутренней поверхности, так и для оболочки с развитой трещиной.

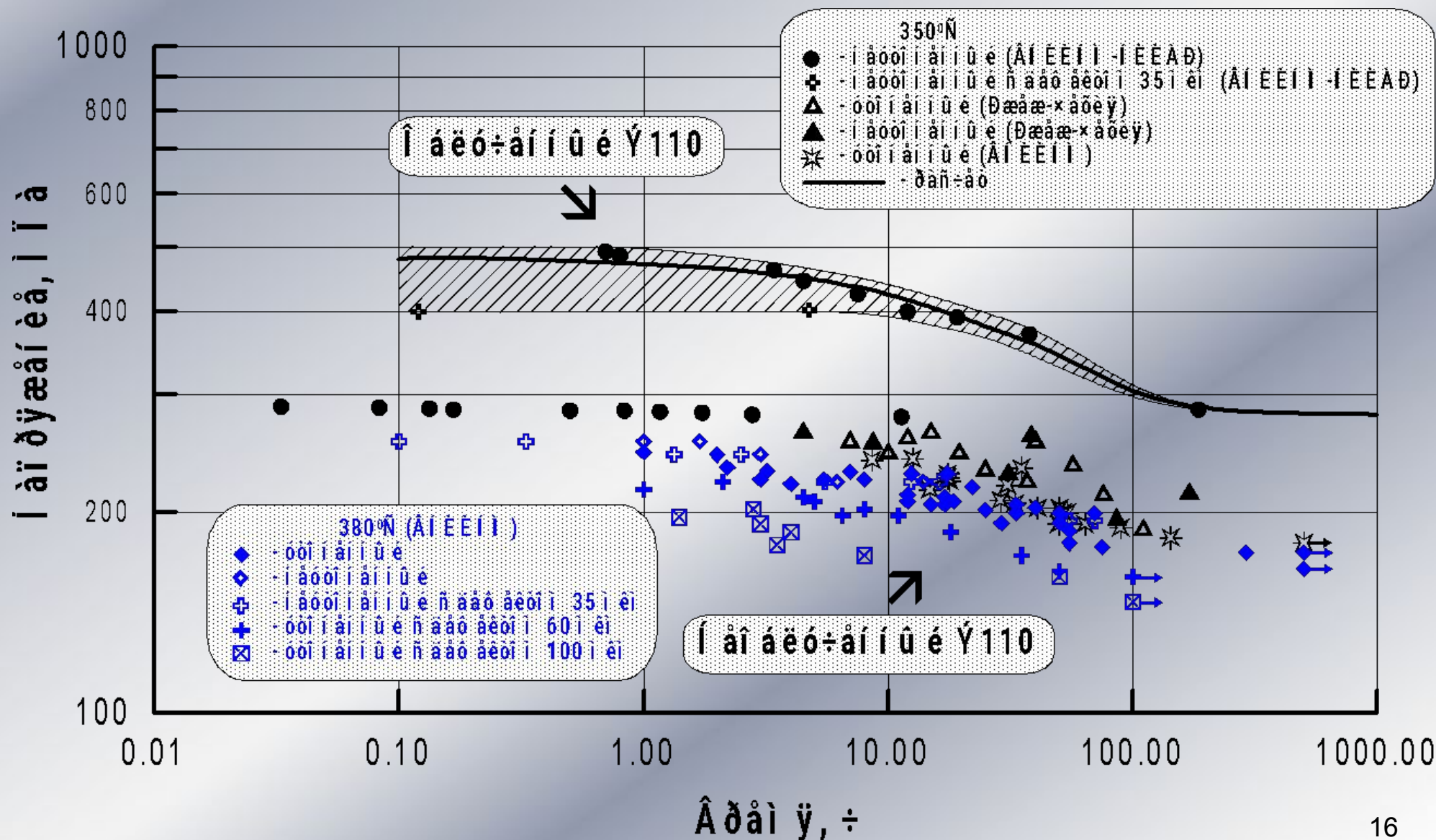
Рисунок 1 – Стадии развития КРН металлов



2.3 Экспериментальное обоснование критерия SC1

Эксперименты подтверждают пороговый характер КРН, то есть наличие некоторого порогового напряжения σ_{SCC} , ниже которого процессы йодного растрескивания не протекают независимо от концентрации коррозионной среды.

Рисунок 2 – Длительная прочность оболочек твэлов из сплава Э110 в условиях йодного КРН



2.4 Формулировка критерия SC1

Общее условие сохранения прочности твэла по механизму КРН состоит в том, что во всех проектных режимах исключается зарождение трещин в оболочке и страгивание исходного технологического дефекта.

Поэтому для обеспечения прочности твэла используется условие:

$$\sigma_{\theta} \leq [\sigma_{SC1}], \quad [\sigma_{SC1}] = \sigma_{SCC} / [K_{SC1}], \quad (1)$$

где σ_{θ} – окружные напряжения в оболочке, МПа;

$[\sigma_{SC1}]$ – допустимые напряжения по данному критерию, МПа;

σ_{SCC} – пороговое напряжение коррозионного растрескивания под напряжением облученной оболочки из сплава Э110 с исходным технологическим дефектом глубиной ≤ 35 мкм, равное 280 МПа для условий ВВЭР-440;

$[K_{SC1}]$ – нормативный коэффициент запаса по критерию SC1.

Отсутствие разрушения по механизму КРН должно быть обеспечено в любой точке активной зоны в режимах НЭ и ННЭ. Соответственно, проводится потвэльный расчет любой точки зоны с учетом предыстории работы топлива с использованием нейтронно-физических и твэльных кодов. Эти расчеты являются основой для определения требований к безопасному управлению реактором.

3. Прочностной критерий SC2.

3.1. Предельные эквивалентные напряжения в оболочке. Причина введения критерия SC2

Критерий вводится для исключения разрушения ТВЭЛ вследствие потери устойчивости оболочки под действием избыточного внешнего давления по механизму «пластического шарнира», когда эквивалентные напряжения в оболочке ТВЭЛ становятся выше предела текучести. Этому состоянию ставится в соответствие расчетное значение критического давления.

Реализация состояния пластического шарнира возможна, например, при повышении давления в первом контуре реактора в режиме гидроиспытаний.

3.2. Экспериментальное обоснование критерия SC2

В качестве предельной, для сплава Э110, определена зависимость предела текучести как функция температуры и флюенса следующего вида:

$$\sigma_{02} = A(T) \cdot \ln(\Phi) + B(T), \quad (2)$$

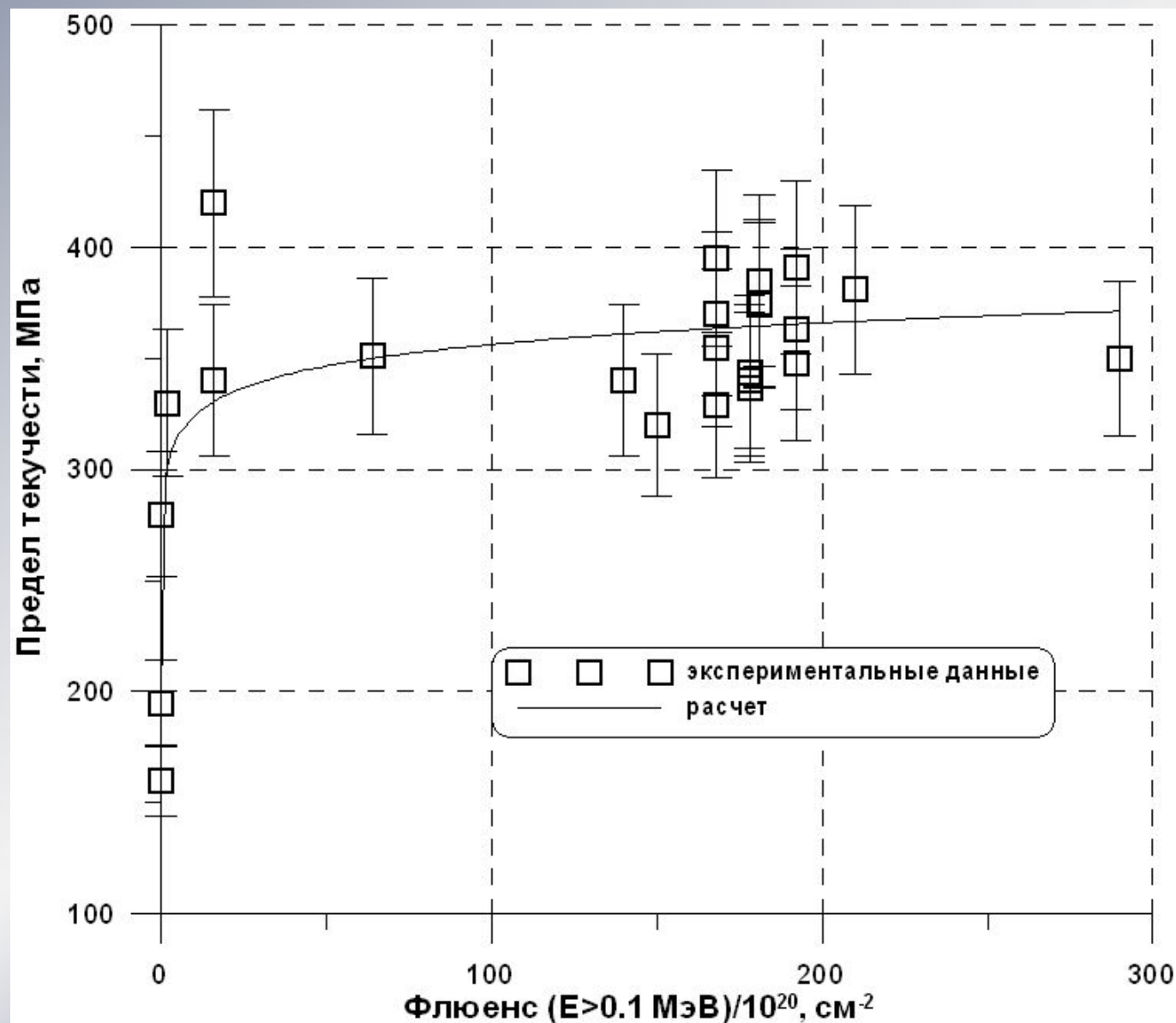
где σ_{02} – предел текучести, МПа;

Φ – флюенс нейтронов ($E > 0,1$ МэВ), см^{-2} ;

T – температура, $^{\circ}\text{C}$;

$A(T)$ и $B(T)$ – функции температуры.

Рисунок 3 – Зависимость предела текучести сплава Э110 при температуре 350 °С от флюенса



3.3. Формулировка критерия SC2

Максимальное эквивалентное напряжение в оболочке твэла не должно превышать допустимого значения предела текучести материала оболочки.

$$\sigma_{\text{eff}} \leq [\sigma_{\text{sc2}}], [\sigma_{\text{sc2}}] = \sigma_{02} / [K_{\text{sc2}}], (3)$$

где σ_{eff} – эффективные напряжения, вычисляемые по формуле Хилла;
 $[\sigma_{\text{sc2}}]$ – допустимые напряжения по критерию SC2;
 $[K_{\text{sc2}}]$ – нормативный коэффициент запаса по критерию SC2.

4. Прочностной критерий SC3. Потеря окружной устойчивости оболочки от перепада давления

4.1. Причина введения критерия SC3

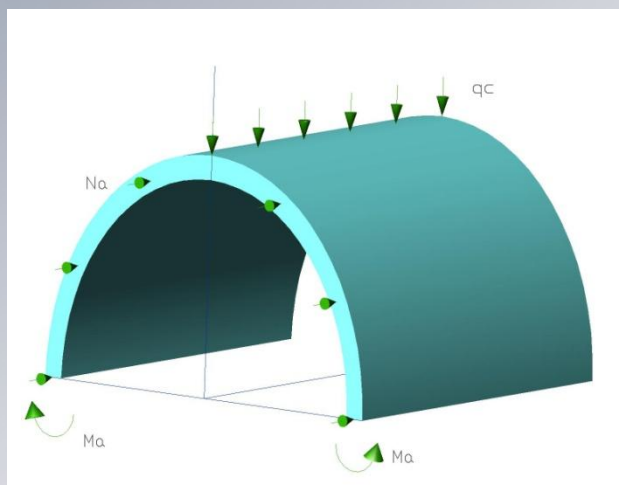
Критерий вводится для исключения разрушения твэла вследствие потери устойчивости оболочки под действием избыточного внешнего давления.

4.2. Механизмы потери устойчивости

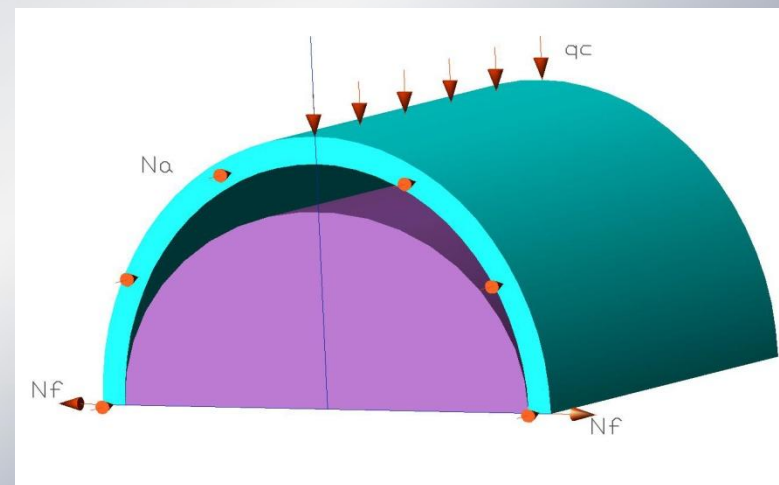
Форма равновесия нагруженной внешним давлением оболочки является устойчивой, если малым возмущающим воздействиям соответствуют малые отклонения от этой формы. Опасность потери устойчивости оболочки твэла усугубляется наличием технологических отклонений от круговой формы (овальность), которая приводит к резкому снижению критического значения перепада давления.

Рисунок 4 – Схемы нагружения оболочки твэла, используемые при расчетах на устойчивость оболочки [а) неподкрепленная оболочка, б) подкрепленная оболочка]

а)



б)



4.3. Формулировка критерия SC3

Критерий SC3 используется для оценки запаса до потери устойчивости по перепаду давления на оболочке. Величина предельного давления определяется расчетным путем.

Оболочка твэла под действием избыточного наружного давления теплоносителя сохраняет окружную устойчивость с учетом накопленной (или исходной) овальности при условии:

$$P_{TH} \leq [P_{SC3}], \quad [P_{SC3}] = P_{ПРЕД} / [K_{SC3}], \quad (4)$$

где P_{TH} – давление теплоносителя;

$[P_{SC3}]$ – допустимое значение наружного давления;

$P_{ПРЕД}$ – расчетное предельное наружное давление, вызывающее мгновенную потерю устойчивости оболочки по механизму пластического шарнира (критерий SC2);

$[K_{SC3}]$ – нормативный коэффициент запаса по критерию SC3.

5. Прочностной критерий SC4. Усталостная и длительная прочность оболочки

5.1. Причина введения критерия SC4

В процессе эксплуатации в оболочке твэла накапливаются повреждения, обусловленные циклическими и длительными статическими нагрузками. Накопление повреждений может привести к разрушению оболочки.

5.2. Разрушение по механизму усталостной прочности

Цикл нагружения характеризуется следующими параметрами:

$\sigma_{\max}$ — максимальное напряжение в цикле;

$\sigma_{\min}$ — минимальное напряжение в цикле;

$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$ — амплитуда напряжений;

$r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ — коэффициент асимметрии цикла.

5.3. Разрушение по механизму длительной прочности

Свойства длительной прочности, в общем случае, характеризуются набором кривых длительной прочности, которые строятся в координатах время до разрушения – приложенное напряжение по результатам испытаний на длительную прочность. Кривые строятся при различных температурах, с учетом изменения свойств материала под облучением.

5.4. Предельная зависимость усталостной прочности

В общем случае циклического нагружения для определения $\langle N_0 \rangle$ для циркониевых материалов применяется следующая формула:

$$\langle N_0 \rangle = A \cdot \left(\sigma_a - \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} \cdot \frac{1+r}{1-r}} \right)^{-h} \quad (5)$$

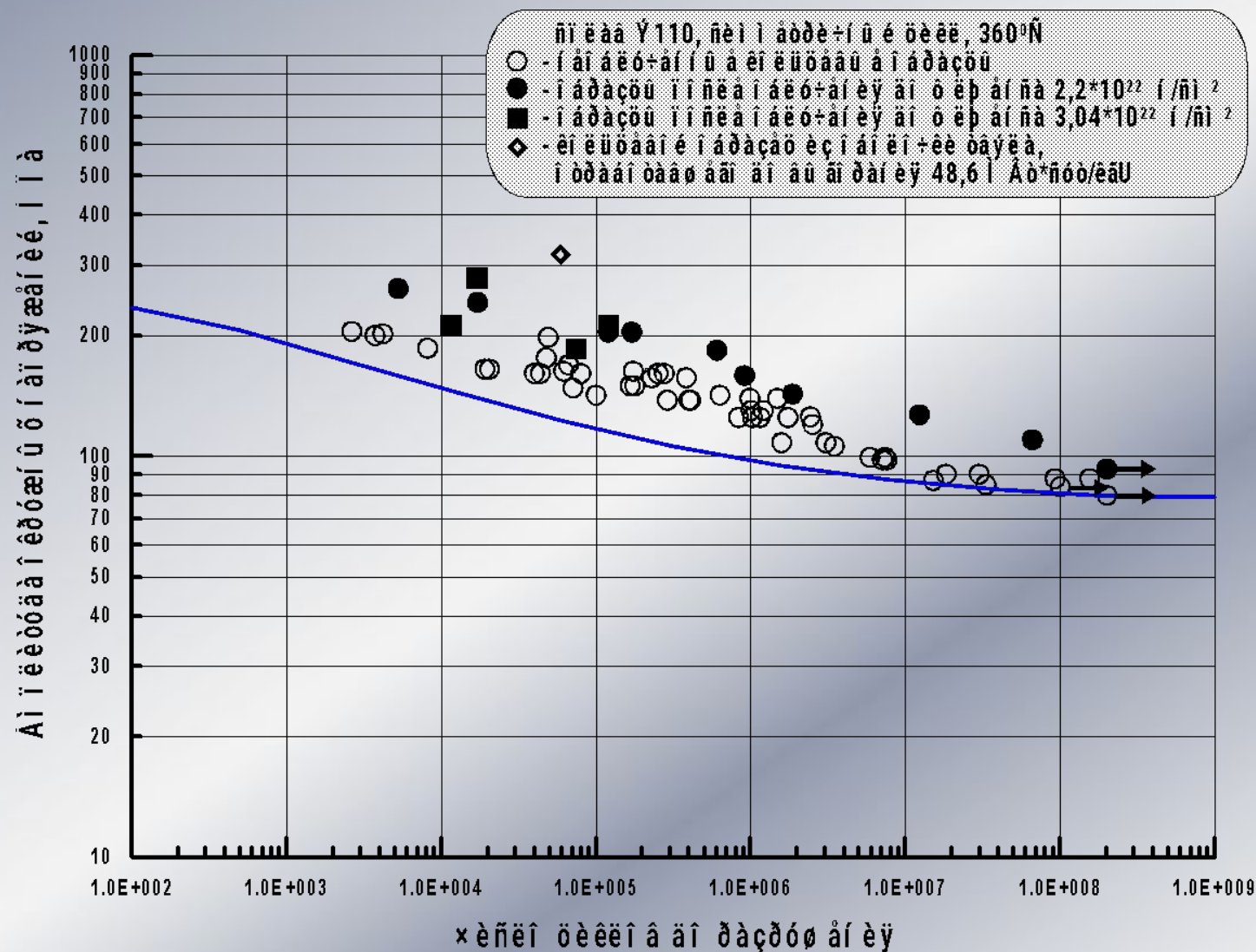
где σ_{-1} – предел выносливости для симметричного цикла нагружения;

σ_m – предел прочности;

σ_a – амплитуда условных упругих приведенных напряжений;

A и h – константы материала.

Рисунок 5 – Расчетная кривая усталости необлученной оболочки твэла из сплава Э110 и результаты экспериментов при температуре 360 °С



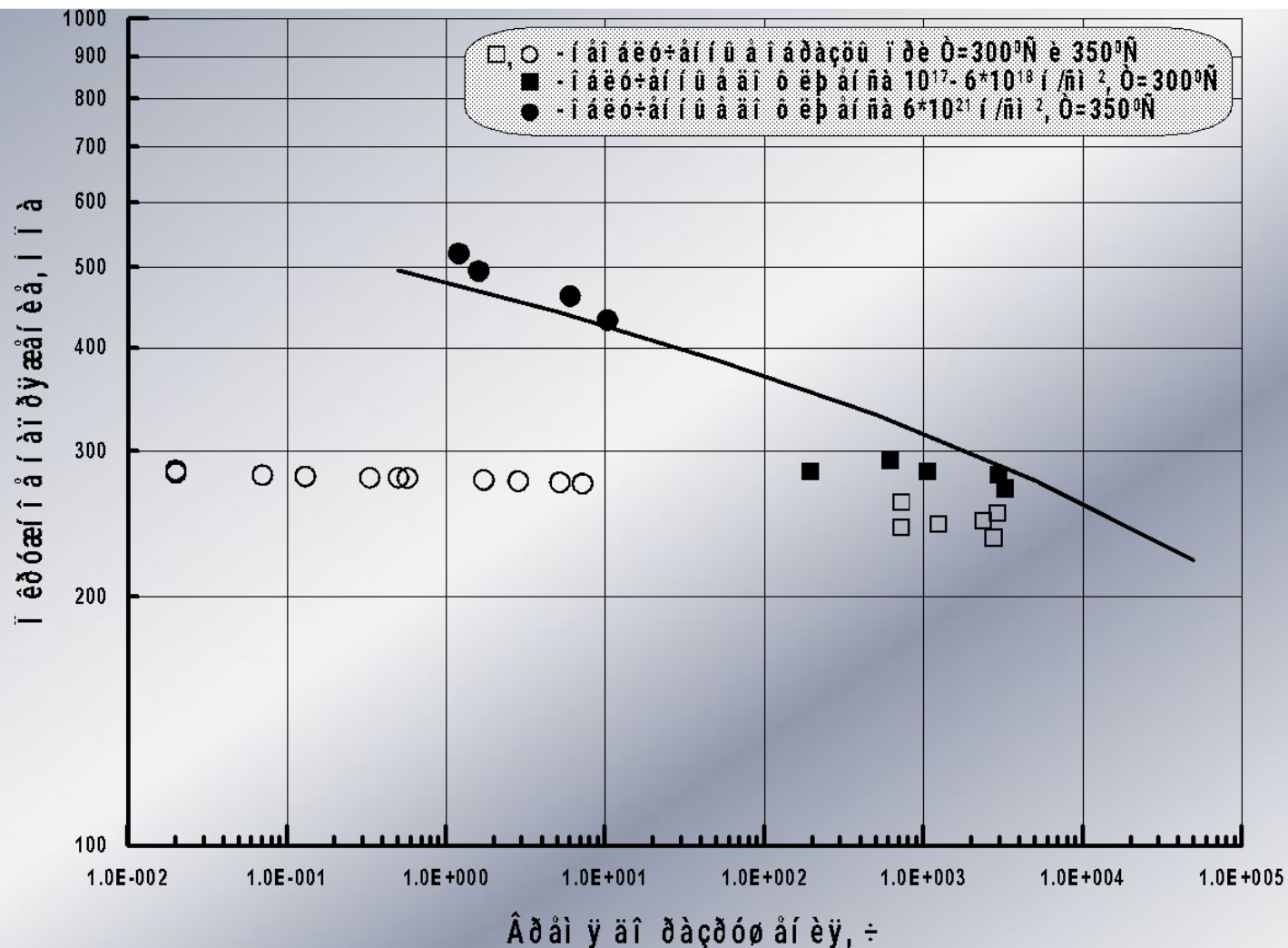
5.5. Предельная зависимость длительной прочности

В общем случае результаты испытаний на длительную прочность при данной температуре аппроксимируются уравнением вида:

$$\sigma = A \log t + B, \quad (6)$$

где σ – значение напряжения; t – время нагружения; A и B – константы.

Рисунок 6 – Расчетная кривая длительной прочности при температуре 350 °С оболочки твэла из сплава Э110 облученной до флюенса 10^{21} н/см² и результаты экспериментов



5.6. Формулировка критерия SC4

В процессе эксплуатации в оболочке твэла накапливаются повреждения, обусловленные циклическими и длительными статическими нагрузками. Накопленные суммарные повреждения характеризуются безразмерной величиной – мерой повреждений:

$$W = W_{cycl} + W_{stat} , (7)$$

где W – накопленная мера повреждений;
 W_{cycl} – накопленное усталостное повреждение;
 W_{stat} – накопленное статическое повреждение.

6. Прочностной критерий SC5.

Предельная остаточная деформация оболочки

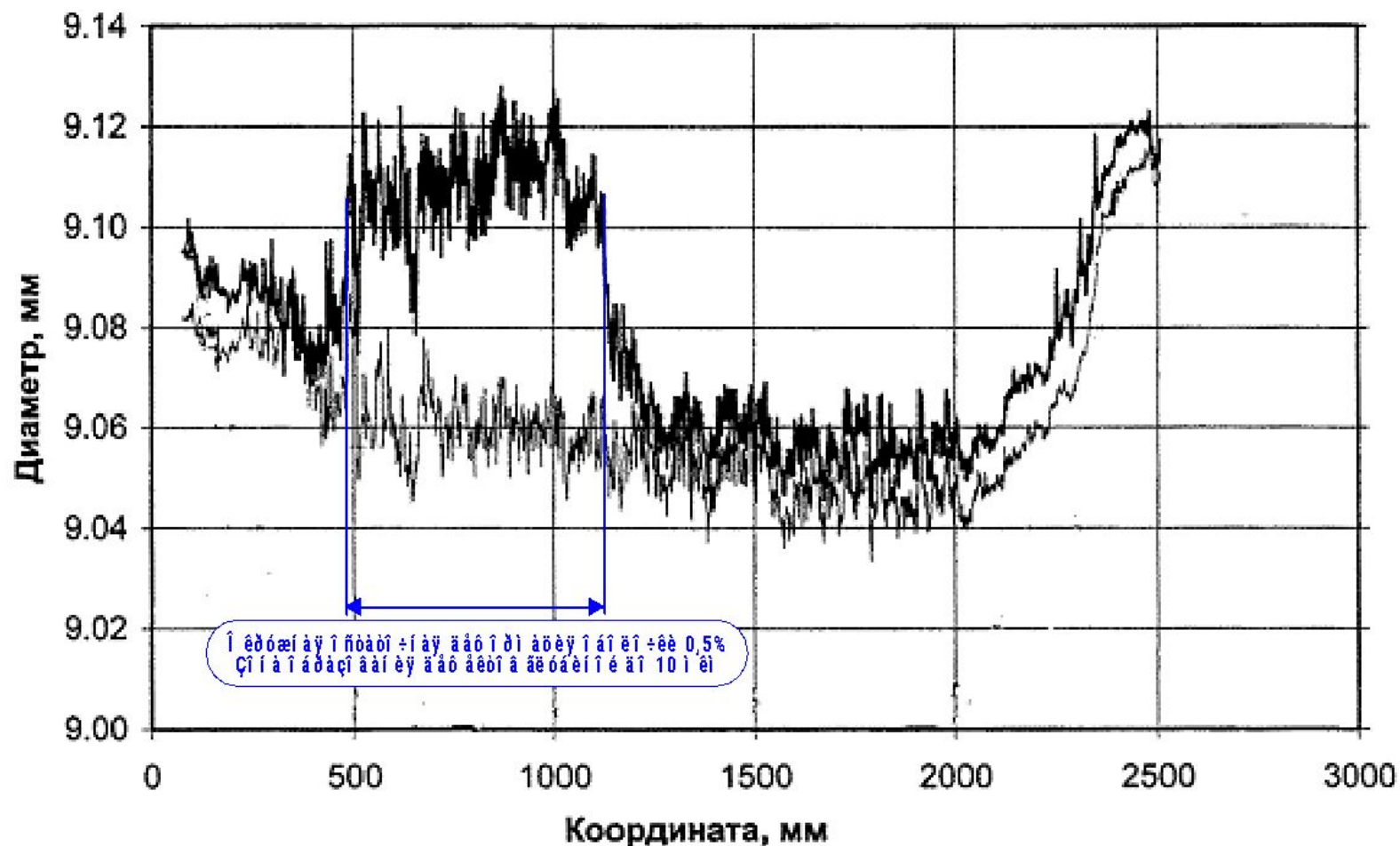
6.1. Причина введения критерия SC5

Данный критерий используется для оценки прочности оболочки в кратковременных режимах термомеханического нагружения, когда уровень напряжений превышает пороговое значение КРН, но расчетами по коду СТАРТ-3 показано, что повреждение оболочки не вышло за инкубационный период.

6.2. Экспериментальное обоснование критерия SC5

В экспериментах на скачки мощности твэлов ВВЭР с выгоранием от 50 до 60 МВт · сут/кгU в реакторе МИР при проведении одиночного RAMP-эксперимента были достигнуты окружные остаточные деформации до 0,5 % без повреждения оболочек

Рисунок 7 – Профилограмма твэла ВВЭР в RAMP-эксперименте (верхняя кривая – после эксперимента, нижняя кривая – до эксперимента)



6.3. Формулировка критерия SC5

Таким образом, критерий SC5 заключается в следующем. Накопленная окружная остаточная деформация растяжения оболочки в переходном режиме не должна превышать 0,5 %.

$$\varepsilon_{\theta} \leq [\varepsilon_{\theta}], \quad [\varepsilon_{\theta}] = \varepsilon_{\theta \text{ ПРЕР}} / [K_{SC5}], \quad (11)$$

где ε_{θ} – накопленная окружная остаточная деформация оболочки;
 $\varepsilon_{\theta \text{ ПРЕР}} = 0,5\%$ – предельная величина окружной остаточной деформации;
 $[K_{SC5}]$ – нормативный коэффициент запаса по критерию SC5.

7. Деформационные критерии DC1 и DC2

7.1. Критерий DC1. Предельное значение изменения диаметра оболочки

7.1.1. Причина введения критерия DC1

Этот критерий контролирует работоспособность твэлов в составе кассеты. Предельное значение изменения диаметра обеспечивает необходимые теплогидравлические характеристики для надежного теплосъема, надежность крепления твэлов в дистанционирующих решетках и исключение фреттинг-износа оболочек.

7.1.2. Формулировка критерия DC1

Изменение наружного диаметра оболочки твэла в процессе эксплуатации не более ΔD_{MAX} с коэффициентом запаса.

$$\Delta D \leq [\Delta D], [\Delta D] = \Delta D_{\text{MAX}} / [K_{\text{DC1}}], \quad (12)$$

где ΔD – изменение наружного диаметра оболочки;
 $[\Delta D]$ – допустимое изменение наружного диаметра оболочки;
 ΔD_{MAX} – предельное изменение наружного диаметра оболочки, устанавливается два значения: для увеличения и для уменьшения диаметра оболочки, $\Delta D_{\text{MAX}} = -0,12 / +0,03$ мм;
 $[K_{\text{DC1}}]$ – нормативный коэффициент запаса по критерию DC1.

7.2.Причина введения критерия DC2

Удлинение твэлов в процессе эксплуатации не должно приводить к исчерпанию зазора между верхними заглушками твэлов и головкой кассеты. Чрезмерное удлинение может привести к появлению больших осевых нагрузок, недопустимому искривлению твэла или потере осевой устойчивости.

7.2.1. Формулировка критерия DC2

Величина предельного удлинения твэлов и твэгов контролируется следующим соотношением

$$\Delta L \leq [\Delta L], \quad [\Delta L] = \Delta L_{\text{MAX}} / [K_{\text{DC2}}], \quad (13)$$

где ΔL_{MAX} – зазор между верхними заглушками твэлов и головкой кассеты,

$\Delta L_{\text{MAX}} = 31,5$ мм в исходном «холодном» состоянии;

ΔL – увеличение длины твэла от исходного производственного значения;

$[\Delta L]$ – допустимое значение удлинения твэла;

$[K_{\text{DC2}}]$ – нормативный коэффициент запаса по данному критерию DC2.

8. Теплофизический критерий ТС1.

Предельная температура топлива

8.1. Причина введения критерия ТС1

Критерий вводится для предотвращения плавления топлива. Расплавленное топливо при взаимодействии с оболочкой может вызвать разгерметизацию твэла.

В качестве предела по данному критерию принимается зависимость температуры плавления топлива от выгорания. Под температурой плавления подразумевается температура солидуса.

8.2. Экспериментальное обоснование критерия ТС1

В качестве предельной в критерии ТС1 принята следующая зависимость температуры плавления от выгорания:

$$T_{\text{пл}} = 2840 - 0,56 \cdot V_u, \quad (14)$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления диоксида урана, °C;

V_u – выгорание, МВт · сут/кгU.

8.3. Формулировка критерия ТС1

Величина температуры топлива ограничена предельной температурой. В качестве предельной температуры установлена температура плавления диоксида урана.

Температура топлива в режимах НЭ и ННЭ не должна превышать допустимого значения $[T]$, которое вычисляется по следующему соотношению:

$$[T] = T_{\text{пл}} / [K_{\text{ТС1}}], \quad (15)$$

где $[T]$ – допустимое значение температуры топлива;
 $T_{\text{пл}}$ – температура плавления диоксида урана,
вычисляемая по формуле (14);
 $[K_{\text{ТС1}}]$ – нормативный коэффициент запаса.

9. Теплофизический критерий ТС2.

Предельное значение давления газов под оболочкой ТВЭЛА

9.1. Причина введения критерия ТС2

Увеличение давления газовой смеси под оболочкой до значений, превышающих давление теплоносителя, может привести к повторному открытию зазора между топливом и оболочкой, т.е. реализуется так называемое состояние LIFT-OFF, которое приводит к появлению обратной положительной связи по газовыделению.

9.2. Формулировка критерия ТС2

Давление газов под оболочкой ТВЭЛА (P_r) должно быть ниже допустимого значения:

$$P_r \leq [P], \quad [P] = P_{\text{тп}} / [K_{\text{ТС2}}], \quad (16)$$

где $[P]$ – допустимое значение давления газов;

$P_{\text{тп}}$ – предельное значение давления, равное давлению теплоносителя для режимов НЭ и ННЭ;

$[K_{\text{ТС2}}]$ – нормативный коэффициент запаса критерию ТС2.

10. Коррозионные критерии КС1 и КС2

Критерий КС1. Окисление наружной поверхности оболочки.

Критерий КС2. Гидрирование оболочки.

Коррозионные критерии КС являются взаимосвязанными критериями и существенно зависящими от коррозии материала оболочки со стороны теплоносителя. Эти критерии устанавливают предельную толщину окисной пленки на наружной поверхности оболочки – критерий КС1 и предельное содержание водорода в материале оболочки – критерий КС2.

10.1. Причина введения критерия КС1

Чрезмерная коррозия наружной поверхности оболочек твэлов может приводить к нарушению требований по работоспособности в составе кассет, нарушению теплопередачи и росту температуры оболочки, повышенному ее гидрированию и недопустимому снижению механических характеристик оболочек в течение всего срока эксплуатации при рабочих параметрах теплоносителя.

10.2. Причина введения критерия КС2

Повышенное содержание водорода в циркониевых оболочках может приводить к охрупчиванию, снижению прочностных свойств и к гидридному разрушению.

10.3. Коррозия и механизм гидридного разрушения

Механизм гидридного разрушения тесно связан с коррозией материала оболочки твэла, процесс которой обусловлен химическим взаимодействием теплоносителя с поверхностными слоями оболочки твэла. В случае циркониевых оболочек коррозия определяется следующей реакцией:

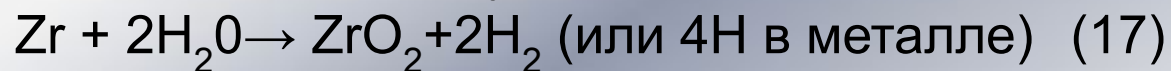
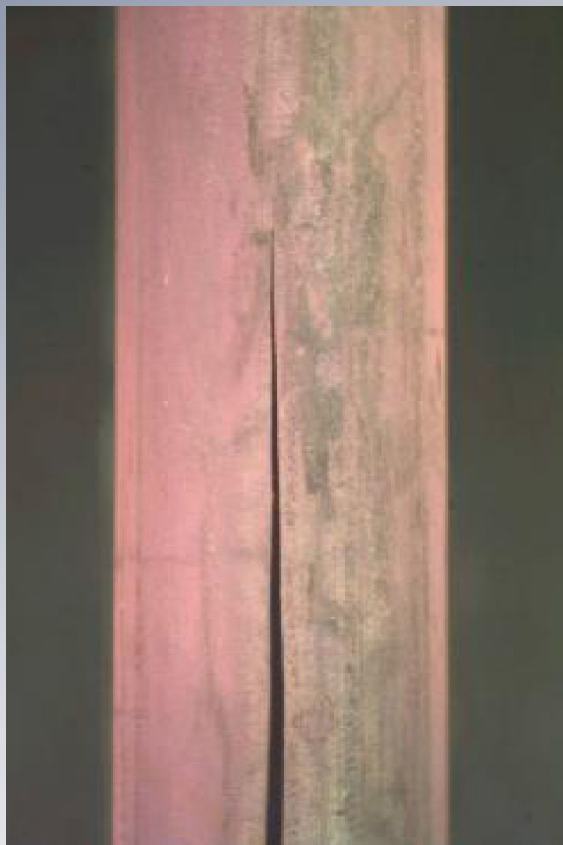
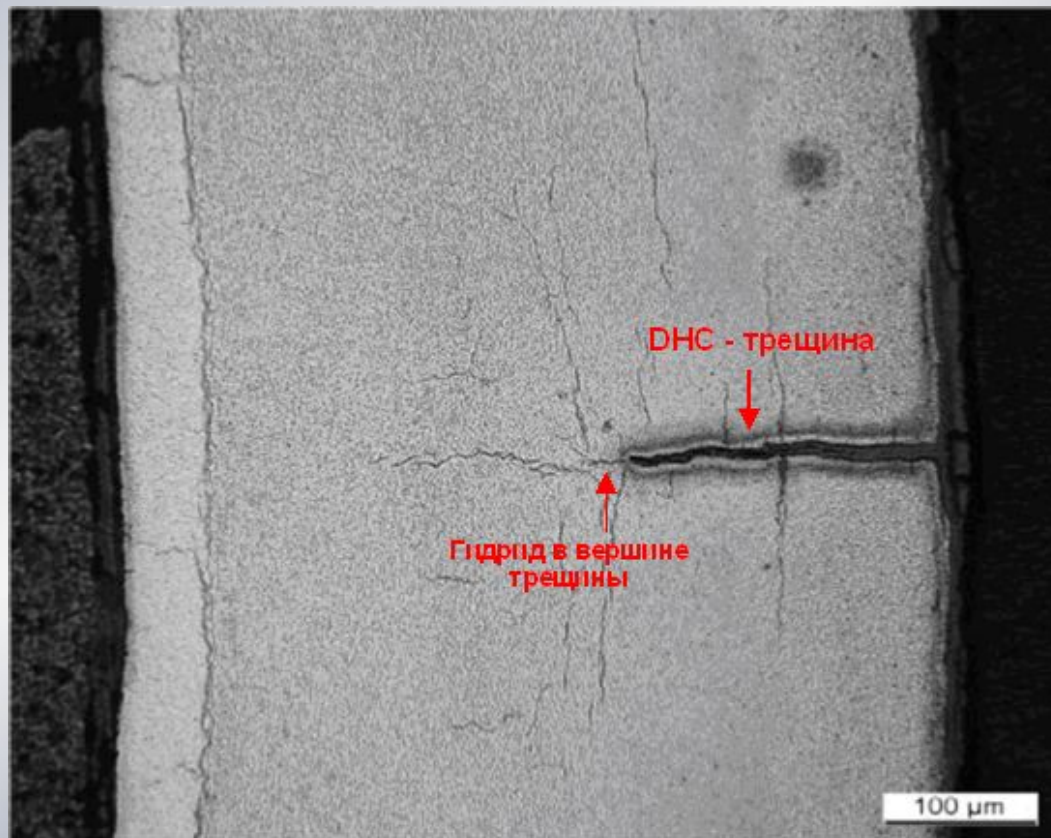


Рисунок 9 – DHC разрушение твэла LWR (а) внешний вид твэла, б) радиальное сечение оболочки в месте на уровне DHC-трещины)



а)



б)

10.4. Формулировка критерия КС1

Предельное значение толщины оксидной пленки на наружной поверхности оболочки твэла не должно превышать предельной величины $h_{\text{пред}} = 60$ мкм.

10.5. Формулировка критерия КС2

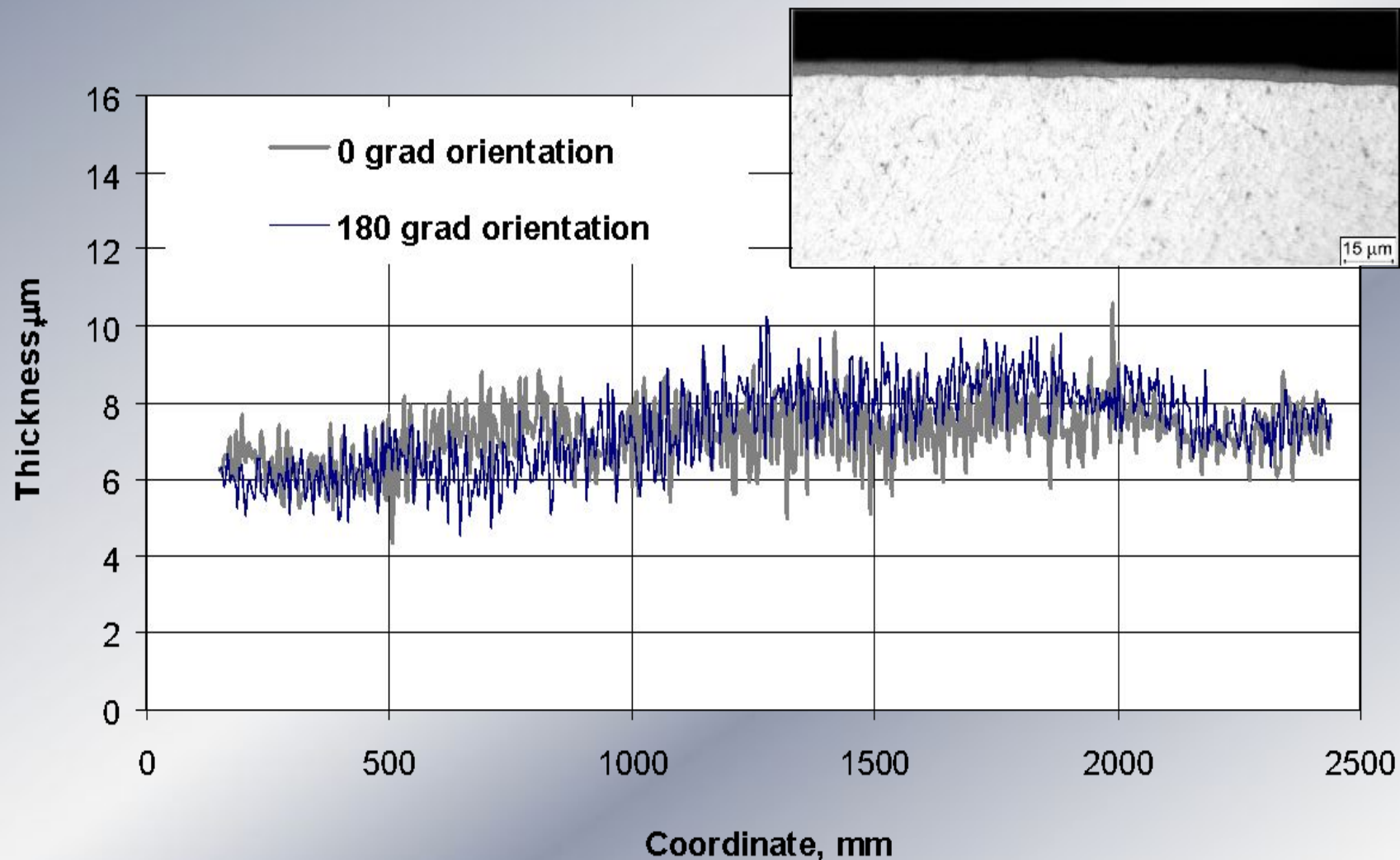
Предельное содержание водорода в оболочке твэла и твэга ограничивается величиной $H_{\text{пред}} = 400$ ppm.

10.6. Экспериментальное обоснование коррозионных критериев КС1 и КС2

Наблюдаемая коррозия оболочек твэлов не являются фактором, принципиально влияющим на ресурсные характеристики твэлов с оболочками из сплава Э110. Типичной является следующая картина:

- полное отсутствие нодулярной коррозии;
- наружная поверхность оболочек твэлов покрыта равномерной оксидной пленкой темного цвета толщиной не более 11 мкм; гидрирование оболочек твэлов ВВЭР не превышает, как правило, 80 ppm.

**Рисунок 10 – Распределение оксидной пленки по высоте твэла
кассеты ВВЭР-440,
отработавшей до среднего выгорания $57 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кгU}$**



11. Критерий FD. Фреттинг-износ оболочки

11.1. Причина введения критерия FD

В ряде случаев в результате вибрации тепловыделяющих элементов в потоке теплоносителя возможно истирание оболочки в местах контакта с дистанционирующими решетками вплоть до разгерметизации. Разработана конструкция вибростойких кассет реакторов ВВЭР, что позволило исключить проблему разрушения твэлов по данному механизму.

11.2. Определение критерия FD

Фреттинг износ оболочки в степени, влияющей на работоспособность твэла, не допускается.

11.3. Обоснование выполнения критерия FD

Обеспечивается опытом эксплуатации РК и ТВС кассеты и обоснованием, выполненным Главным конструктором (ОАО «ОКБ Гидропресс»). 45

12. Эксплуатационный критерий

12.1. Критерий ОС1. Предельная линейная мощность твэла

12.2 Причина введения критерия ОС1

Вводится в соответствии с требованием нормативных документов.

Этот критерий классифицируется как эксплуатационный критерий для режимов НЭ в виде предельной локальной мощности твэла в зависимости от среднего выгорания в твэле. Его введение обеспечивает выполнение следующих теплофизических параметров:

- отсутствие плавления топлива;
- обеспечение не превышения предельно допустимого давления газовой среды под оболочкой твэла;
- ограничение выхода агрессивных продуктов деления (Cs, I) в переходных режимах, что снижает риск повреждения оболочки твэла по механизму КРН.

12.3. Формулировка критерия ОС1

Максимальная линейная мощность в твэлах не должна превышать значений, определенных соответствующей лимитной кривой линейной мощности от выгорания.

13. Критерии безопасности в авариях

Таблица 3

Формулировка критерия	Цель введения критерия
Максимальная температура оболочки не более 1200°C	Отсутствие возникновения самоподдерживающейся пароциркониевой реакции необходимо для обеспечения охлаждаемости активной зоны
Максимальная локальная глубина окисления оболочки не более 18% её первоначальной толщины	Ограничение охрупчивания оболочек необходимо для отсутствия фрагментации твэлов при заливе, для возможности выгрузки активной зоны
Доля прореагировавшего с паром циркония в активной зоне не более 1% его массы в оболочках твэлов	Ограничение количества образовавшегося в пароциркониевой реакции водорода необходимо, чтобы не допустить образование взрывоопасной смеси
Температура топлива ниже температуры плавления: $T_{пл.} = (2840 - 0,56 \cdot B) ^\circ\text{C}$, где B — выгорание, МВт • сут/кг U	Отсутствие взаимодействия расплавленного топлива с оболочкой необходимо для сохранения охлаждаемой геометрии активной зоны и возможности ее выгрузки
Усредненная по сечению топлива в твэле энтальпия не более 230 кал/г (963 кДж/кг)	Отсутствие фрагментации твэлов в условиях быстрого выделения энергии в аварии с возрастанием реактивности необходимо для сохранения охлаждаемой геометрии активной зоны и возможности ее выгрузки

14. Критерии перегрузки по работоспособности твэла Таблица 4

Критерий	Определение критерия	Область применения	Обеспечиваемые проектные критерии
RC1	Максимальная локальная мощность в твэле не должна превышать лимитную кривую максимальной локальной линейной мощности в зависимости от среднего выгорания твэла	Condition I	TC1, TC2
RC2	Скачок мощности в определяющих переходных режимах не должен превышать лимитную кривую скачка локальной линейной мощности в твэле в зависимости от локального выгорания твэла	Condition I	SC1, SC4, SC5
RC3	Скачок мощности в твэлах при перегрузке не должен превышать лимитную кривую скачка локальной линейной мощности в твэле в зависимости от локального выгорания твэла	Condition I	SC1, SC4, SC5
RC4	Максимальная локальная линейная мощность в твэле в условиях режимов Condition II не должен превышать лимитную кривую максимальной локальной линейной мощности (RC4) в зависимости от среднего выгорания твэла	Condition II	TC1, TC2
RC5	Скачѐк мощности в определяющих режимах Condition II не должен превышать лимитную кривую скачка локальной линейной мощности в твэле в зависимости от локального выгорания твэла	Condition II	SC1, SC4, SC5