

КОД СНУП-МИФИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ НИТРИДНОГО ТОПЛИВА БР

Коновалов И.И., Гордеев С.С., Глаговский Э.М. (НИЯУ МИФИ, Москва, Россия)

Введение

Код «СНУП-МИФИ» разработан в НИЯУ МИФИ для оптимизации структурно-фазового состояния (СФС) ядерного топлива на основе смешанного нитрида урана и плутония (СНУП) и ферритной оболочки, обеспечивающих наилучшую работоспособность твэлов в условиях реактора на быстрых нейтронах (БР) типа БРЕСТ. Основные физические модели, заложенные в код «СНУП-МИФИ», а также результаты сравнения расчета с экспериментом приведены в [1].

Код рассматривает осесимметричную модель твэла с гелиевым зазором и основан на многоуровневом моделировании радиационных повреждений в топливе и оболочке твэла, приводящие к радиационно-ускоренному массопереносу на атомном уровне [2,3], а именно:

- Первичные повреждения, определяющие атермическую компоненту диффузии за счет выбивания атомов или их «перемешивания» в термических пиках (смещения на атом - *сна*), а также ускоренную термически активируемую диффузию за счет повышенной концентрации радиационных вакансий (эффективные смещения на атом – *эсна*);
- Вторичные радиационные повреждения, приводящие к формированию радиационной дислокационной структуры (петли, подвижные и неподвижные дислокации), а также структуры газовой-вакансионной пористости внутри зерна и на границе между зерен;
- Макроскопические проявления радиационных повреждений: набухание и газовыделение из топлива.

На основе анализа технологий нитридного топлива, в качестве входных данных для расчетного исследования с помощью кода «СНУП МИФИ» приняты следующие параметры:

- содержание примесей кислорода, углерода (карботермический синтез нитридного топлива),
- суммарное количество примесей материалов оснастки: в основном Fe, Cr, Ni (нержавеющие и хромистые стали), Mo и W (материалы высокотемпературных печей спекания таблеток),
- размер зерна и исходная пористость топлива.

Для ферритной оболочки твэла использовали следующие входные параметры:

- морфологию вторых фаз (размер и концентрацию выделений интерметаллидов и карбидов),
- размер зерен (для ферритно-мартенситной стали – размер межпластинчатого расстояния отпущенного мартенсита).

Дальнейшее усовершенствование кода, реализованное в коде «СНУП МИФИ-А», прежде всего, было направлено на получение данных для предсказания момента и характера разрушения оболочки твэла. Также были добавлены модули для анализа поведения твэла при изменении внутренних («наброс» мощности при авариях типа «RIA») и внешних условий (перегрев оболочки твэла при аварии типа «LOCA»).

Описание кода «СНУП МИФИ – А»

Общий вид интерфейса программы «СНУП МИФИ-А» с графическим «он-лайн» выводом результатов показан на рис. 1, а фрагмент текстового вывода на рис. 2.

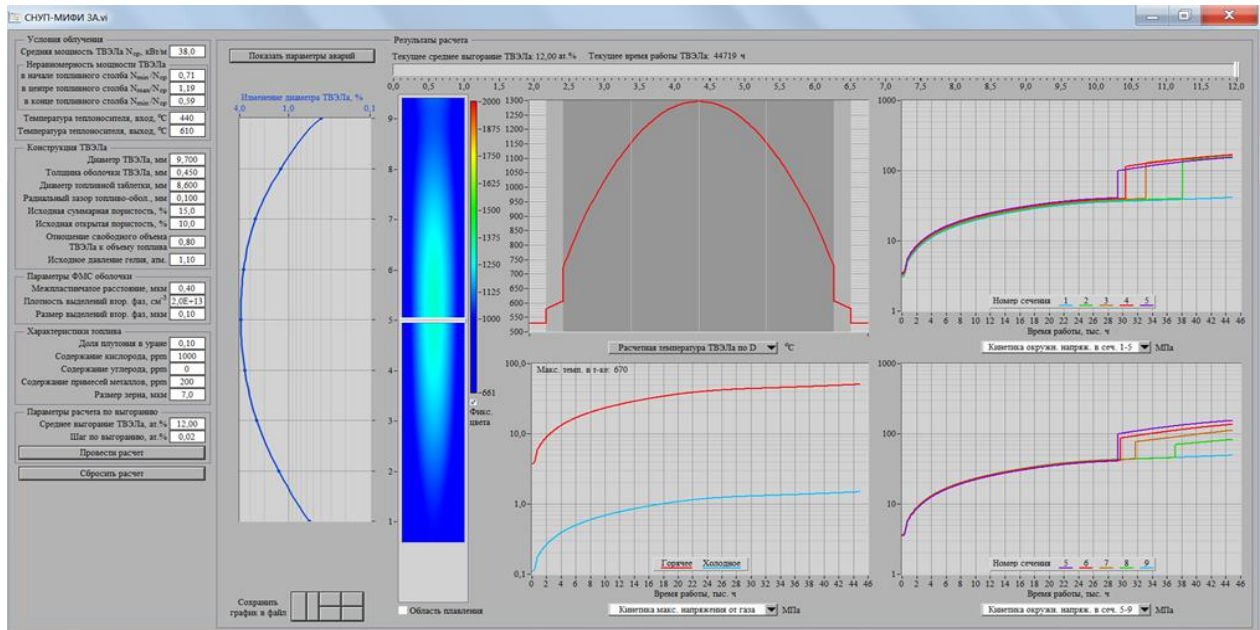


Рис.1. Интерфейс программы «СНУП МИФИ-А» с графическим «онлайн» выводом

```

Текущее ср.выгорание по твэлу=1.20e+001 Время работы,ч=4.69e+004
Сечение твэла [1] [3] [5] [7] [9]
Выгорание В топлива и повреждающая доза D в оболочке
Текущее В, ат% 9.73e+000 1.31e+001 1.43e+001 1.29e+001 8.59e+000
Текущая D, эсна 4.73e+001 6.01e+001 6.16e+001 5.31e+001 3.49e+001
Текущая D, сна 9.32e+001 1.25e+002 1.37e+002 1.24e+002 8.23e+001
Температура оболочки, град.С
Наружная 4.81e+002 5.32e+002 5.80e+002 6.16e+002 6.32e+002
Внутренняя 5.00e+002 5.56e+002 6.06e+002 6.40e+002 6.48e+002
Температура топлива, град.С
Поверхность 5.61e+002 6.33e+002 6.84e+002 7.09e+002 6.96e+002
1/2R 8.18e+002 1.00e+003 1.10e+003 1.06e+003 8.96e+002
Центр 8.93e+002 1.12e+003 1.25e+003 1.17e+003 9.57e+002
Концентрация Xe в матрице топлива, ат.доля
Поверхность 9.80e-003 1.41e-002 1.63e-002 1.46e-002 8.87e-003
1/2R 7.77e-003 6.88e-003 2.97e-003 4.77e-003 6.04e-003
Центр 6.57e-003 1.97e-003 3.82e-004 1.04e-003 4.94e-003
Суммарная пористость (исходная+радиационная), %
Поверхность 1.62e+001 1.61e+001 1.57e+001 1.56e+001 1.59e+001
1/2R 1.75e+001 2.24e+001 3.00e+001 2.48e+001 1.77e+001
Центр 1.85e+001 2.96e+001 3.66e+001 3.12e+001 1.87e+001
Средняя скорость распухания топлива по диаметру
dV, % на ат.% 1.10e+000 1.41e+000 1.69e+000 1.52e+000 1.18e+000
Диффузионный выход Xe, %=1.21e+001 Атермический выход Xe=6.81e+000
Изменение диаметра оболочки, %
Распухание 1.07e+000 1.92e+000 1.80e+000 1.39e+000 8.81e-001
Пастич. деформ. 5.17e-001 2.01e+000 3.83e+000 2.85e+000 4.95e-001
Удеф. обол, ч-1 6.46e-007 1.86e-006 2.62e-006 2.04e-006 6.01e-007
Напряжения в оболочке, МПа
Давление газа 1.99e+001 2.18e+001 2.35e+001 2.41e+001 2.36e+001
Давление топл. 2.53e+002 2.43e+002 1.86e+002 1.36e+002 9.60e+001
Max. напряжение от газа (Tmax. в точке 670oC)=2.42e+001 МПа
Удлинение топлива горячее, %=6.35e+000
Удлинение топлива холодное, %=3.30e+000
    
```

Рис.2. Фрагмент текстового вывода результатов расчета по коду «СНУП МИФИ-А»

В качестве входных параметров для расчета Код «СНУП МИФИ – А» использует аналитическое приближение, описывающие набухание оболочки с заданным химическим составом и структурно-фазовым состоянием (СФС), полученное предварительно по коду «РАКС» [4].

Также по коду «ЭСНА» [5] вычисляются параметры первичных радиационных повреждений (*сна*, *эсна*) и используются в качестве входных данных для кода «СНУП МИФИ – А».

Код обрабатывает данные по 9 сечениям по высоте топливного столба, по 100 точкам по радиусу топливной таблетки и 70 точкам по радиальному зазору и толщине оболочки. Данное разбиение необходимо для обеспечения точности расчета температуры в 3 %. Расчет выдает более 30 параметров для каждой точки, с учетом изменения при облучении физических свойств топлива (деградация теплопроводности и выделение «осколочных» фаз).

Код рассчитывает следующие макроскопические параметры, важные для прогноза работоспособности нитридного ТВЭЛ:

- Пластическая деформация под действием набухающего топлива и деформация, связанная с набуханием оболочки ТВЭЛ по длине.
- Скорость деформирования оболочки ТВЭЛ по длине
- Выход Xe и Kr под оболочку ТВЭЛ по атермическому и термическому механизму газовыделения с учетом образования открытой радиационной пористости по границам зерен.
- Производные от параметров деформирования – напряжения в оболочке ТВЭЛ, находящейся в состоянии радиационной ползучести по длине ТВЭЛ, включая точку с максимальной температурой оболочки.

Критерии работоспособности оболочки нитридного ТВЭЛ

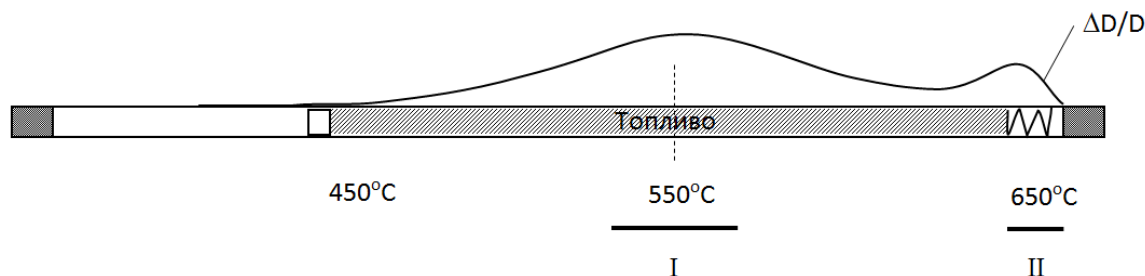


Рис.3 Критические сечения оболочки нитридного ТВЭЛ

В сечении I напряженно деформированное состояние (НДС) оболочки нитридного ТВЭЛ при механическом взаимодействии оболочки и набухающего топливного сердечника (стадия МВТО) определяется скоростью ее деформирования:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{3} [\dot{S}_F (1 - \eta) - \dot{S}_{cl}] \quad (1)$$

где: $\dot{S}_F$ – скорость набухания топлива, η – доля набухания, компенсируемая за счет течения топлива во внутренний свободный объем (исходную пористость), $\dot{S}_{cl}$ – скорость набухания оболочки.

На основе предварительных расчетных оценок было установлено, что параметром η при условиях работы и конструкции нитридного ТВЭЛ в реакторе БРЕСТ и БР-1200 можно пренебречь [1,2]. «Несжимаемость» набухающего пористого нитридного

топлива подтверждена опытом эксплуатации экспериментальных нитридных твэлов в БН-600 и БОР-60.

Консервативным критерием работоспособности нитридного твэла в сечении I с оболочкой из ферритной стали, при пренебрежении ее набуханием (скорость набухания $\dot{S}_{cl}$ от 0,01% до 0,02 %/сна) становится деформационный критерий по типу соотношения Монкмана-Гранта:

$$\frac{1}{3} \dot{S}_F \tau_{\text{МВТО}} < \varepsilon_{\text{Lim}} \quad (2)$$

де ε_{Lim} – предельная деформация ползучести перед разрушением, $\dot{S}_F$ – скорость набухания сердечника на стадии МВТО, $\tau_{\text{МВТО}}$ – длительность стадии МВТО.

С учетом разброса данных для ферритной оболочки ЭП823 в качестве ε_{Lim} принято значение 5 %.

В случае сечения II верхняя часть оболочки твэла работает при максимальной температуре и под максимальным давлением исходного He и выделившихся газообразных продуктов деления (основную часть составляет Xe).

Для этого случая необходимо знать время до разрушения от напряжения: $\tau_f = f(\sigma)$ при максимальной температуре оболочки.

Например, консервативный критерий может быть получен из соотношения:

$$\sigma_{\text{Max}} < \sigma_{5 \cdot 10^4}^{650} \quad (3)$$

где: σ_{Max} – максимальное напряжение в оболочке твэла, $\sigma_{5 \cdot 10^4}^{650}$ – длительная прочность при 650 °С и времени $5 \cdot 10^4$ ч.

Для стали ЭП823 соответствующее значение $\sigma_{5 \cdot 10^4}^{650}$ принято равным 25 МПа, для стали ЭК181 – 35 МПа.

Значение σ_{Max} определено, как:

$$\sigma_{\text{Max}} = \frac{2\delta}{D} (P_{\text{He}}^{\text{Max}} + P_{\text{FGP}}^{\text{Max}} - P_{\text{Ext}}^{\text{Min}}) \quad (4)$$

где: δ и D – толщина и диаметр оболочки твэла, $P_{\text{He}}^{\text{Max}}$ – давление исходного гелия при максимальной температуре оболочки, $P_{\text{FGP}}^{\text{Max}}$ – давление ГПД под оболочкой твэла при максимальной температуре оболочки на конец кампании, $P_{\text{Ext}}^{\text{Min}}$ – минимальное давление теплоносителя в верхней части твэла.

Для прогноза механизма разрушения необходимо знать уравнение ползучести, связывающее скорость деформации оболочки по различным механизмам с напряжениями при данных условиях эксплуатации.

Прогноз разрушения оболочки нитридного твэла

Исходя из физических свойств СНУП и ферритной стальной оболочки (типа ЭП823), при нормальных условиях эксплуатации, деформация на стадии механического взаимодействия топлива с оболочкой (МВТО) будет определяться скоростью набухания топлива, т.е. при порядке скорости её деформирования ($10^{-7} - 10^{-6}$) ч⁻¹.

Для прогноза условий и характера разрушения оболочки твэлов из ферритной стали использовали данные по механизмам деформации, приведенные на рис. 3 и 4.

На карте механизмов деформации ферритных сталей (за основу взяты данные работы [6]) существует значительная область, определенная, как упругая деформация. В этой области при длительных временах, как показал анализ данных экспериментов, в

сталей развивается ползучесть, которую можно связать с диффузионным межзеренным «проскальзыванием» – ползучестью Гифкинса [7].

При повышении температуры выше $> 0.55T_m$ (~ 750 °C) при относительно малых напряжениях $\sigma/G < 10^{-4}$ (~ 10 МПа) доминирующими механизмами становятся диффузионная ползучесть Кобла и Набарро-Херинга (на рис. 3 последний вид ползучести обозначен аббревиатурой «Н-Х»). При более высоких напряжениях $\sigma/G > 5 \cdot 10^{-3}$ (~ 50 МПа) доминирует дислокационная ползучесть, контролируемая переползанием дислокаций, скорость которой также имеет диффузионную природу и определяется самодиффузией.

Как следует из рисунка 3, главным механизмом диффузионной деформации стали при нормальных условиях эксплуатации будет ползучесть Гифкинса ($\dot{\epsilon}_{GB}$) и дислокационная ползучесть ($\dot{\epsilon}_{Disl}$), контролируемая переползанием дислокаций, а скорость деформации будет являться суммой двух компонент: $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{Disl} + \dot{\epsilon}_{GB}$, что учтено в уравнении (1)

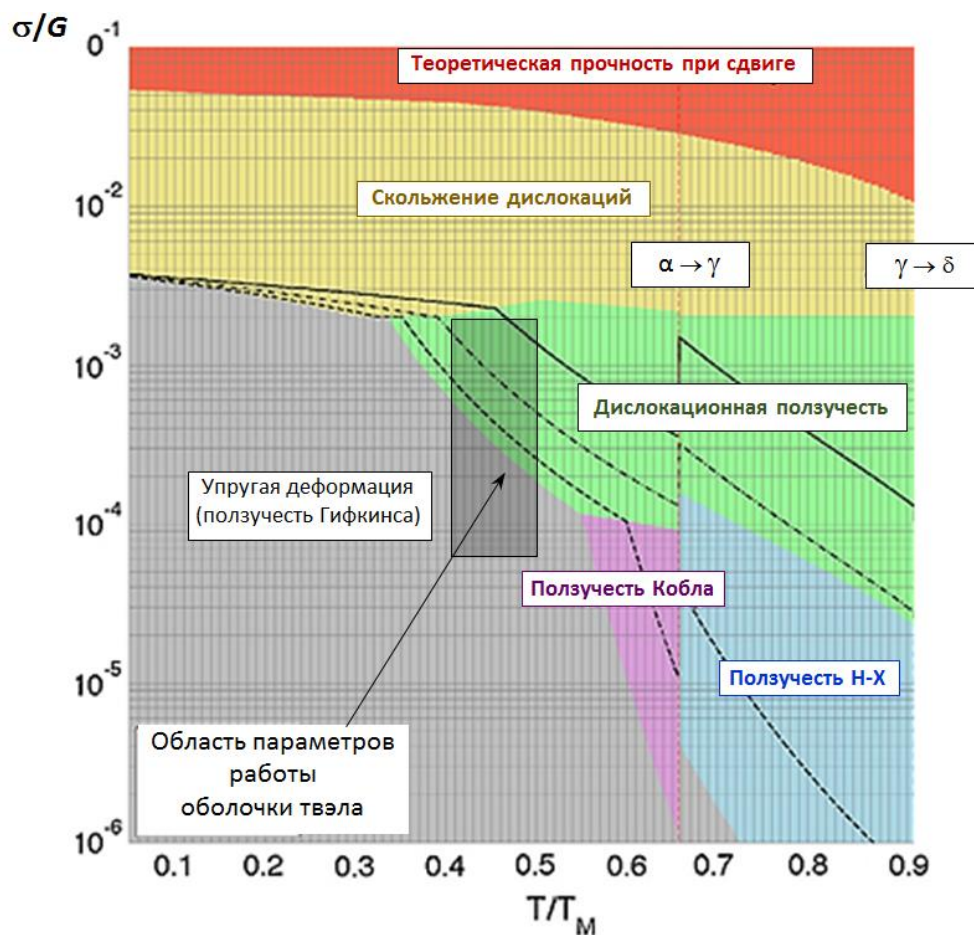


Рис. 4. Карта-схема различных механизмов деформации ферритных сталей

На основе собственных и литературных данных для ферритных сталей в качестве скорости термической установившейся ползучести $\dot{\epsilon}$, $1/\text{ч}$, при температурах $T = (750-950)$ К и напряжениях σ до 200 МПа в условиях стабильности СФС принята следующая зависимость:

$$\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{E_{SD}}{kT}\right) \sigma^{6.5} + 6,2 \cdot 10^3 \frac{\varphi}{kT} \exp\left(-\frac{E_{GB}}{kT}\right) \sigma \quad (4)$$

где: k – постоянная Больцмана ($0.862 \cdot 10^{-4}$ эВ/атом), T – абсолютная температура в К, σ – напряжение в МПа, φ – объемная доля диффузионных межзеренных и межфазных границ (для ферритно-мартенситных сталей со структурой отпущенного мартенсита от 10^{-3} до 10^{-2} , для ферритных сталей с относительно крупным равноосным зерном $\sim 10^{-4}$),

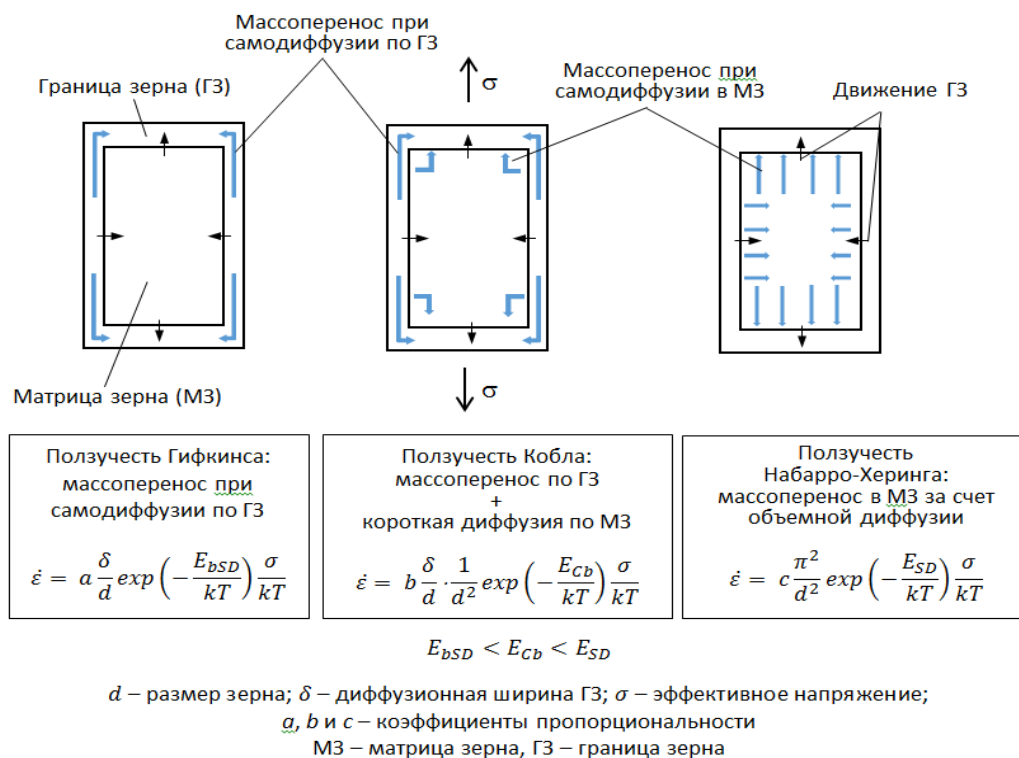


Рис.5. Схема диффузионных механизмов деформации зерна

Для хромистых ферритных сталей энергия активации самодиффузии E_{SD} принята равной 2,94, а для граничной самодиффузии $E_{GB} = 1,96$ эВ/атом.

Рассчитанные и экспериментальные значения установившейся термической ползучести для зарубежных аналогов ферритной стали ЭП823 сталей типа 91 и 92 приведены на рис. 6

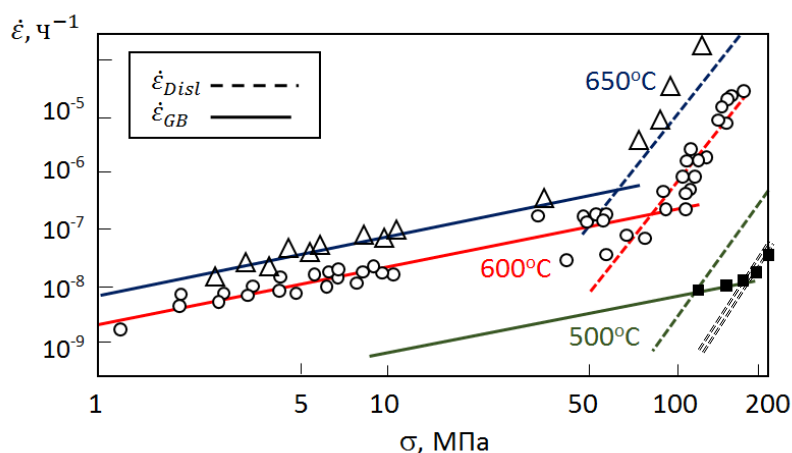


Рис. 6. Эксперимент [8,9] и расчет установившейся термической ползучести хромистых сталей типа 91 и 92

Отклонение расчета от эксперимента при температуре 500 °С связано с распадом твердого раствора Fe-Cr с выделением мелкодисперсной α' - фазы и соответствующим торможением дислокационной ползучести. По оценкам для плотности выделений 10^{18} м^{-3} и их объемной доли 0,1 % увеличение пути при переползании дислокаций (огибание препятствий) приведет к уменьшению значения коэффициента в слагаемом $\dot{\epsilon}_{Disl}$ приблизительно на порядок (двойной пунктир на рис. 5).

В условиях облучения ускорение ползучести, согласно [1], можно описать введением дополнительных составляющих:

- для диффузионной граничной ползучести $\dot{\epsilon}_{GB}$, (второй член уравнения), введением слагаемого D^R – атермической компонентой радиационной диффузии (перемешивание в каскадах смещений), имеющего значение порядка 10^{18} см^{-2} ;
- для дислокационной ползучести $\dot{\epsilon}_{Disl}$ (первый член уравнения) вдобавок к D^R введено ускорение термической самодиффузии D^{Th} за счет наличия радиационной концентрации собственных точечных дефектов – D^{ThR} .

Сравнение рассчитанной термической и радиационной самодиффузии, по моделям, включенным в код «СНУП МИФИ-3А», в быстром нейтронном спектре применительно к хромистой ферритной стали типа ЭП823 показано на рис. 7.

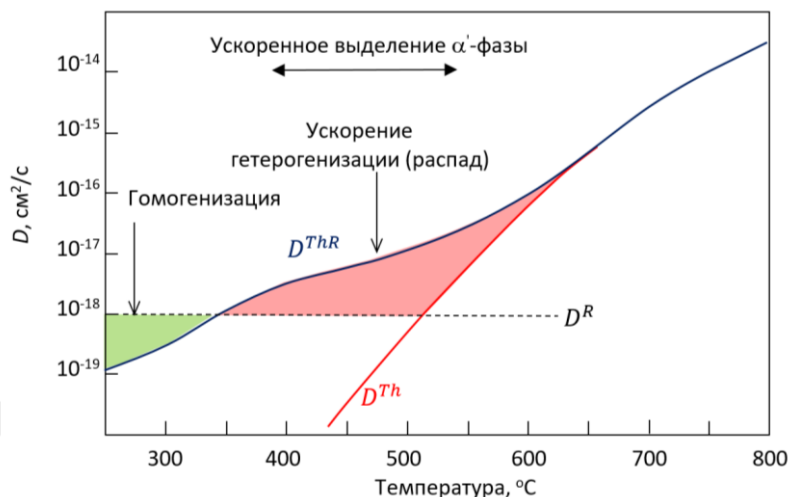


Рис. 7. Соотношение различных компонент самодиффузии D в ферритной оболочке типа ЭП823

Применительно к хромистым ферритным сталям, принятым в качестве оболочечного материала твэлов БРЕСТ, в интервале температур (400-520) °С на фоне общего ускорения ползучести сталей под облучением, должен также наблюдаться и ускоренный распад твердого раствора Fe-Cr.

Этот распад должен сопровождаться уменьшением скорости дислокационной ползучести $\dot{\epsilon}_{Disl}$ с одновременным ускорением диффузионной пограничной ползучести.

На рисунке 8 показан возможный характер разрушения ферритных сталей при разном соотношении механизмов деформации ползучести, определенным выше.

Образование граничной пористости (вариант I) идет, как правило, на границах, расположенных перпендикулярно приложенной нагрузке. Слияние этих пор образуют открытые каналы, и материал теряет герметичность по газу задолго до разрушения. Длительность разрушения соответствует третьей стадии ползучести и протекает в течении тысяч и более часов.

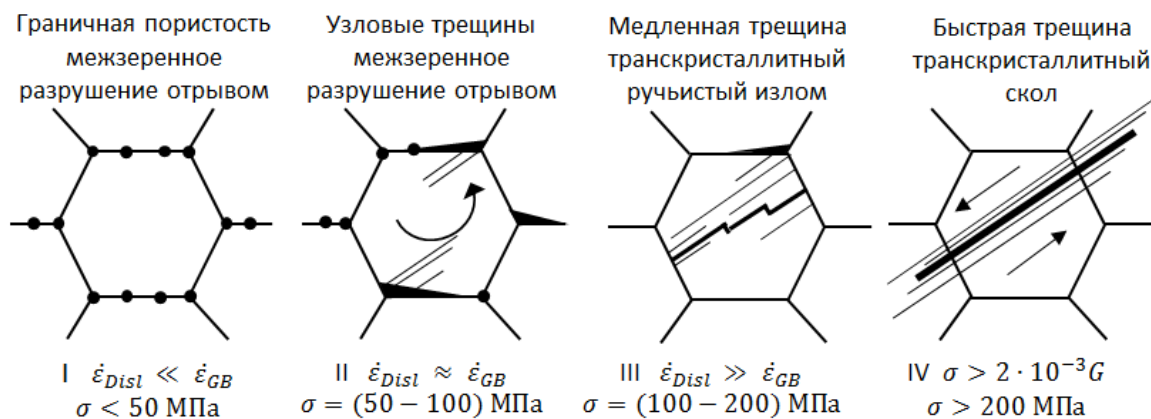


Рис. 8 – Схема образования дефектов в ФМ стали при различных напряжениях (напряжения приведены для температуры $\sim 600^\circ\text{C}$)

При повышении напряжения (вариант II) появляется дислокационная составляющая ползучести внутри зерна, приводящая к кручению зерен, компенсирующих возникающую несплошность по границам зерен.

Для дислокационной ползучести, контролируемой переползанием дислокаций (вариант III), характерно более быстрое формирование сквозной трещины. Однако, как и в первых случаях, оболочка перед разрушением теряет герметичность. Движение трещины тормозится препятствиями и необходимо время для переползания дислокаций. Это особенно сильно проявляется для углеродистых ферритных сталей со значительным количеством препятствий в виде выделений карбидной фазы. Длительность разрушения, согласно анализа кривых ползучести, может составлять сотни и более часов.

Наиболее критичным с точки зрения времени процесса разрушения является область преимущественного скольжения дислокаций (верхняя область на рисунке 3 и рисунок 7, вариант IV). Для такого механизма деформирования, реализующегося при относительно больших напряжениях, существенное торможение дислокаций отсутствует и возможна "быстрая" кинетика процесса. По сути, разрушение аналогично кратковременным испытаниям на растяжение при достижении предела текучести стали.

Таким образом, в качестве дополнительного критерия может быть принято максимальное напряжение в оболочке твэла не более 200 МПа, что обеспечивает концепцию «течь перед разрушением».

Все параметры, необходимые для определения характера разрушения предусмотрены в выходных данных кода «СНУП МИФИ-3А».

Расчет предельного выгорания в существующей конструкции нитридного твэла

Для расчетного анализа работоспособности твэлов были выбраны пределы изменения параметров топлива для БН-600, наблюдающиеся при существующей технологии таблеток СНУП топлива.

Исходная пористость изменялась в пределах от 0,10 до 0,18, радиальный зазор топливо-оболочка от 0,1 до 0,2 мм, содержание примесей кислорода от 600 до 1500, углерода выше стехиометрии от 0 до 1000 ppm, примесей металлов осадки от 200 до 500 ppm и размер зерна от 5 до 15 мкм.

Расчет был сделан для следующих вариантов:

- 1) Вариант «горячий» соответствует наихудшим исходным параметрам топлива и твэлов, наблюдавшимся на экспериментальных изделиях, в условиях предполагаемого перегрева теплоносителя (T на выходе из ТВС 600°C), регламентированного проектной документацией на реакторную установку.

- 2) Вариант «средний» соответствует среднестатистическим параметрам топлива и ТВЭЛ в пределах действующих ТУ (T на выходе из ТВС 550 °С)
- 3) Вариант «холодный» соответствует лучшим достигнутым характеристикам компонентов ТВЭЛ, которые приводят к минимальной температуре топлива (T на выходе из ТВС 550 °С).

Результаты расчетов по коду СНУП МИФИ-ЗА сведены в нижеследующей таблице.

Таблица

Расчет напряженно-деформированного состояния оболочки ТВЭЛ

Параметр	Вариант					
	«Горячий»		«Средний»		«Холодный»	
Нагрузка, кВт/м: Средняя/Максимальная	45/52	40/46	45/52	40/46	45/52	40/46
Выгорание топлива, ат. %: Среднее/Макс.	13/15					
Энерговыработка ГВт·ч/м топливного столба (ТС)	1,95		2,04		2,19	
Макс. повреждающая доза, эсна	68		73		78	
Макс. усредненная по сечению скорость распухания топлива на конец кампании, %/ат. %	1,4	1,4	2,3	1,9	1,6	1,3
Удлинение ТС, %:						
Под облучением	5,5	5,6	9,0	8,1	6,1	5,5
В холодном состоянии	2,3	2,5	3,8	4,5	3,6	3,4
Максимальная температура топлива в точке, °С	1710	1500	1430	1310	1210	1090
Максимальная температура на $\frac{1}{2}R$, °С	1620	1390	1230	1130	1060	990
Наличие взаимодействия (МВТО)	нет	нет	да	да	да	да
Газовыделение на конец кампании, %	94	88	33	24	7	6
в т.ч. атермическое	11,7		7,8		4,9	
Макс. увеличение диаметра ТВЭЛ, %, в т.ч. за счет распухания оболочки	1,42	1,39	7,03	6,73	5,10	3,77
	1,42	1,39	1,52	1,48	1,63	1,57
Макс. напряжение в оболочке верхнего газосборника, МПа	145	133	40	29	5,5	5,1
Макс. температура оболочки, °С	678	672	627	620	627	620
Макс. напряжение в оболочке активной части при МВТО, МПа	-	-	213	187	117	92
Температура оболочки, °С	-	-	496	488	542	460
Относительная позиция от низа ТС	-	-	0,15	0,25	0,4	0,05
Запас по критерию «течь перед разрушением» (сдвиговые напряжения 200 МПа)	1,4	1,5	нет	1,1	1,7	2,2
Запас по критерию максимальная пластическая деформация оболочки активной части ТВЭЛ (5 %)	-	-	нет	нет	1,4	2,3
Запас по критерию длительной прочности газосборника (окружные напряжения 25 МПа)	нет	нет	нет	нет	6,4	6,9

В целом расчеты по коду «СНУП МИФИ-3А» показывают, что при максимальной мощности твэла 45 кВт/м предельное выгорание топлива при существующей технологии (вариант «средний») составляет не более 12 ат. %.

Вместе с тем из таблицы следует очевидный факт, что снижение температуры топлива приводит к повышению предела работоспособности нитридного твэла по выгоранию.

Оптимизация материалов и конструкции твэла

Оптимизация нитридного твэла с помощью кода «СНУП МИФИ-3А» и кодов выдающих исходные данные для него «РАКС» и «ЭСНА» проводилась по следующим трем направлениям:

- Оптимизация конструкции твэла проводилась с точки зрения максимального снижения температуры топлива за счет увеличения плотности таблетки и уменьшения зазора топливо/оболочка.
- Оптимизация СФС ферритной стали типа ЭП823 проводилась с целью частичного согласования распухания СНУП и оболочки твэла.
- Оптимизация СНУП топлива за счет легирования проводилась с целью подавления диффузионных процессов в топливе, что эквивалентно снижению его температуры.

Пример влияния наиболее значимых параметров на расчетные максимальные напряжения (сдвиговые напряжения на стадии МВТО определены, как $\sqrt{2}$ от окружных напряжений) в оболочке активной части твэла, при выгорании СНУП 10 ат. %, показан на рисунке 9 (а, б, в). Также показано сравнение поведение твэлов с «чистым» UN (БОР-60, эксперимент «БОРА-БОРА», содержание О менее 0,05 масс. %) и «грязным» (активная зона БР-10, содержание О до 0,4 масс. %) нитридом урана (г).

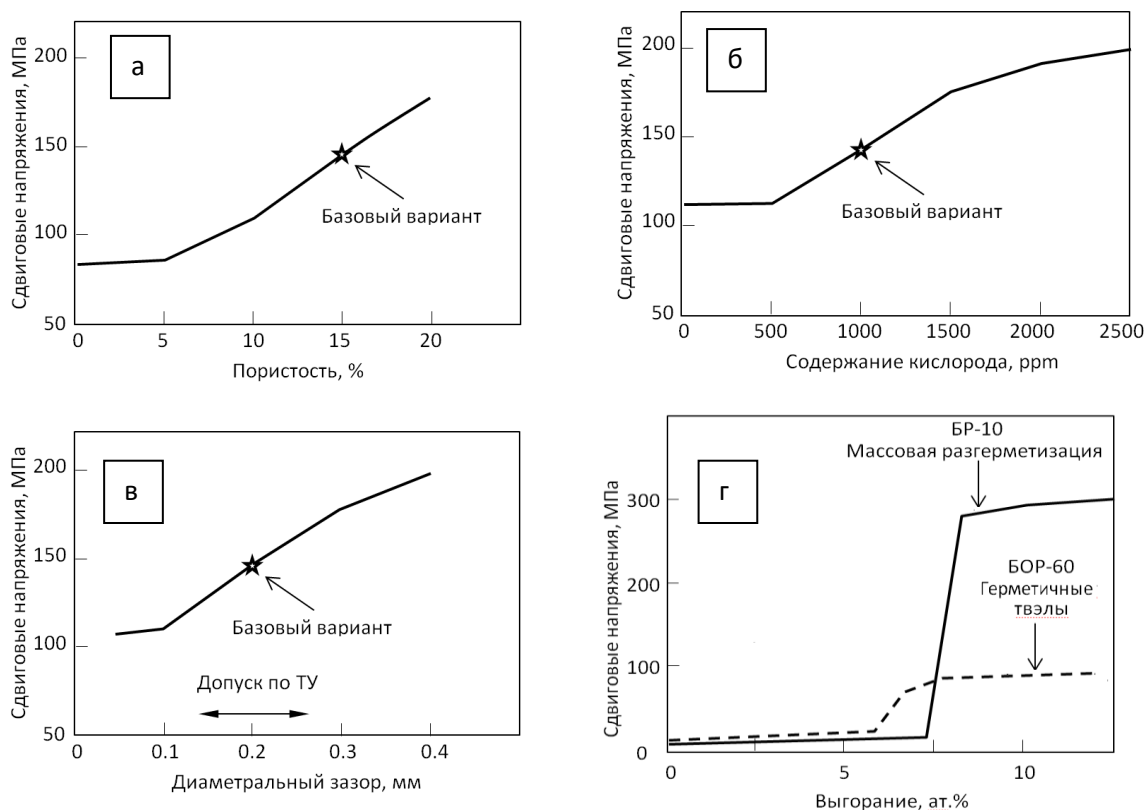


Рис.9. Влияние параметров на сдвиговые напряжения в оболочке активной части твэла

На рис. 10 показано расчетное распухание стали типа ЭП823 при изменении межпластинчатого расстояния структуры отпущенного мартенсита.

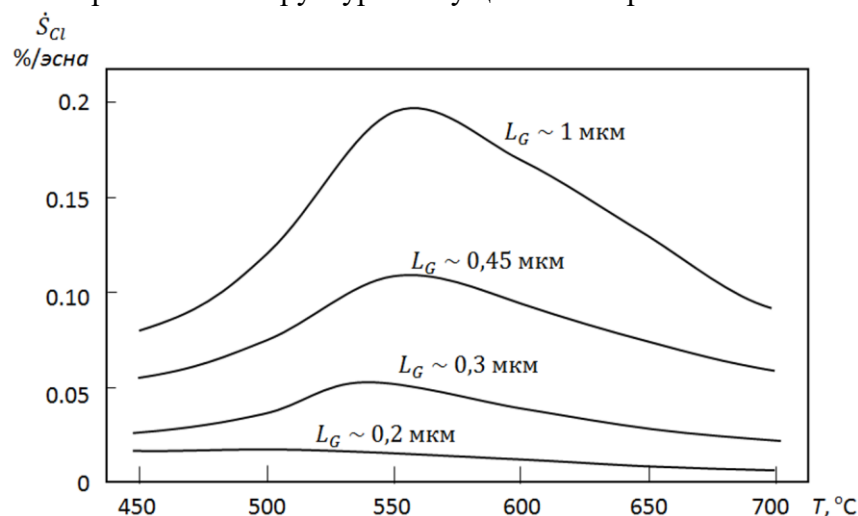


Рис.10. Расчетная зависимость скорости распухания ферритной стали от величины межпластинчатого расстояния

Расчеты показали, что при увеличении межпластинчатого расстояния структуры отпущенного мартенсита с $\sim 0,4$ мкм до (1-2) мкм (структура мелкодисперсного перлита) возможно снизить скорость деформации ферритной оболочки на стадии МВТО в более, чем два раза. Это позволяет повысить ресурс твэла на (3-5) ат.% по максимальному выгоранию. Например, при максимальной мощности в 45 кВт/м по критерию допустимой пластической деформации ферритной оболочки в 5 %. возможно увеличение максимального выгорания с 12 до (15-17) ат. %.

Помимо некоторого согласования распухания топлива и оболочки и отдаления момента наступления стадии МВТО, увеличение структурных составляющих оболочки (переход от структуры отпущенного мартенсита к мелкодисперсной перлитной структуре) должно привести к одновременному возрастанию длительных механических свойств, таких как предельная деформация ползучести перед разрушением и предел длительной прочности.

В качестве гипотетических мер по повышению выгорания топлива можно рассмотреть легирование нитридного топлива

Анализ диаграмм состояния показал наличие максимума температуры плавления в системе UC и UN при молярной доли карбида около 0,15 [10]. Также при таких содержаниях отмечается значительное отклонение в сторону увеличения упругих констант [11]. Другой пример, косвенно указывающий на изменение энергетических параметров – зависимость ползучести от соотношения UN и UC, находящихся в твердом растворе [12].

Предположительно эффект повышения энергетических параметров кристаллической решетки возможен также в системе (U,Pu)N-ZrN.

В тройной системе UN-PuN-ZrN, характеризующейся полной взаимной растворимостью, упругие константы (и соответственно энергетические параметры кристаллической решетки) монотонно возрастают при увеличении доли ZrN. Величина межатомных расстояний в кристаллической решетке (U,Zr)N [13] также показывает существенное отклонение от закона Вегарда.

На рис. 11 показан результат расчетного сравнения (код «СНУП МИФИ-3А») по показателям увеличения диаметра твэла ∂D , % и окружным напряжениям σ_t , МПа в

оболочке твэла для базового варианта твэла БРЕСТ (по ТУ на таблетку и оболочку) в среднем, наиболее энергонапряженном сечении.

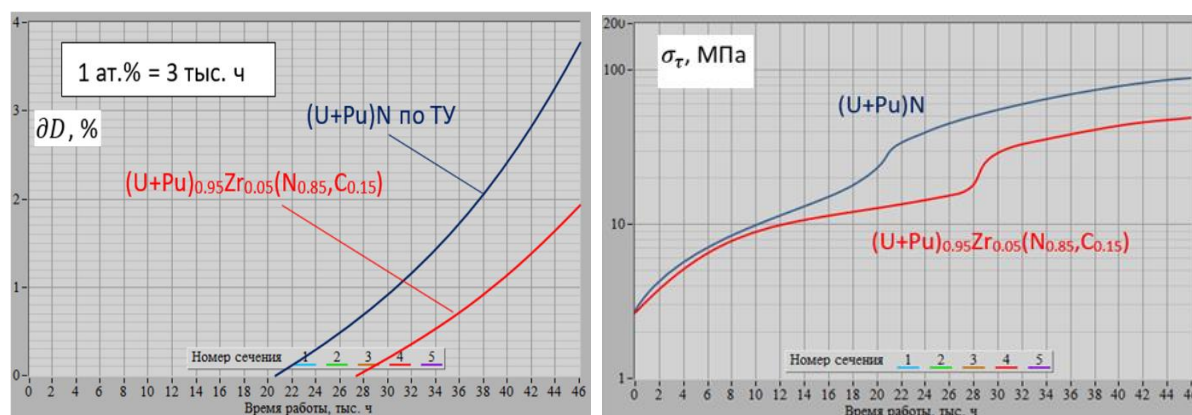


Рис.11. Сравнение показателей работоспособности нитридных твэлов со штатным и легированным СНУП

Как видно из рис. 11, при легировании СНУП углеродом и цирконием, например, $(\text{U,Pu}_{0.95}\text{Zr}_{0.05})(\text{N}_{0.85}\text{Co}_{0.15})$, начало стадии МВТО сдвигается $\sim$ на 4 ат.%. При выгорании топлива около 13 ат.% базовой конструкции по ТУ в данном сечении твэла сдвиговые напряжения при плотном контакте топливо/оболочке ($\sigma = 2\sigma_\tau$) приближаются к критической отметки в 200 МПа, в то время, как увеличение диаметра оболочки и напряжения для твэла с легированным СНУП в 2 раза меньше.

Косвенный эффект может быть получен при добавлении в пресспорошок добавок, увеличивающих плотность спеченных таблеток без изменения штатного режима свободного спекания, например, AlN, или Ni в количестве до 1 масс.%.

Заключение

Для определения путей оптимизации конструкции твэла и регулирования структурно-фазового состава стальной оболочки и СНУП топлива твэлов реактора типа БРЕСТ в НИЯУ МИФИ создан расчетный код «СНУП МИФИ-3А».

Согласно расчетам по этому коду и исходя из существующего уровня технологии карботермического синтеза нитридных порошков, выданы следующие рекомендации по оптимизации параметров СНУП топлива:

- Пористость таблетки – не более 5 %, что может быть достигнуто при использовании технологии высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭИК);
- Содержание кислорода следует ограничить величиной 1000 ppm, при стехиометрии $(\text{N}+\text{C})/(\text{U}+\text{Pu}-\text{O}/2) = 1,00$, что обеспечивается существующей технологией карботермического синтеза;
- Размер зерна, который влияет на газовыделение из топлива, должен быть не менее 5 мкм.

Для твэлов БРЕСТ возможно частичное согласование распухания топлива с оболочкой при регулировании СФС стальной оболочки, которое определяет скорость её распухания. Для этого случая перспективными могут оказаться ферритно-мартенситные стали, или стали ферритного класса.

При выполнении этих рекомендаций максимальное выгорание СНУП топлива в существующей конструкции твэла реактора на быстрых нейтронах типа БРЕСТ может быть повышено с 12 % до 15 %.

Дальнейшее повышение выгорания топлива может быть достигнуто при легировании ЧУП.

Список литературы

1. Behavior Features of Fuel Elements with Nitride Fuel - Theory and Experiment / I.I. Konovalov, M.S. Tarasova, B.A. Tarasov // IAEA International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17) 26–29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation. Paper № IAEA-CN-245-171.
2. Коновалов И. И., Тарасов Б. А., Глазовский Э. М. Радиационная ползучесть нитридного топлива и механическое взаимодействие с оболочкой твэла / Ядерная физика и инжиниринг. 1916. Т.7, №2. С. 106-114.
3. Коновалов И. И., Тарасов Б. А., Глазовский Э. М. Взаимосвязь термической ползучести монокристалла урана с его структурно-фазовым состоянием / Ядерная физика и инжиниринг. 1916. Т.7, №2. С. 115-122.
4. Девятко Ю.Н. и др. Эффективное смещение на атом (ЭЧА) / Программа для ЭВМ. Рег. № 2014613852 (2014 г.).
5. Мартыненко С.С. и др. Радиационно-активированное конденсированное состояние вещества (РАКС) / Программа для ЭВМ. Рег.№ 2013617227 (2013 г.)
6. Ghoniem N.M., Po G., Sharafat S. Deformation mechanisms in ferritic/martensitic steels and the impact on mechanical design // J. Nucl. Mat. № 441 (2013) p.704.
7. Gifkins R.C. Diffusional Creep Mechanisms // J. Amer. Ceram. Soc. Vol.51/2 (1968) p.69.
8. National Institute for Materials Science, Japan. Creep Data Sheet № 43.
9. National Institute for Materials Science, Japan. Creep Data Sheet № 48.
10. Benz R. Melting point maxima of ThC-ThN and of UC-UN solid solutions//J. Nucl. Mat. 31(1969) p.93.
11. Matzke HJ. Science of advanced LMFBR Fuels. North Holland Publ. Comp. 1986 p.214.
12. Uchida M. and Ichikawa M. Compressive creep of sintered UC-UN solid solutions//J. Nucl. Mat. 49 (1973) p.91.
13. Walter M., Fernandez-Carretero S. A. and Rothe J. Local atomic structure in $(\text{Zr}_{1-x}\text{U}_x)\text{N}$ //J. Nucl. Mat. 373 (2008) p.90.