## Конспект занятия 24.

### Цель.

Познакомить слушателей с результатами экспериментальных исследований влияния деформации ползучести на выход ГПД. Предложить диффузионно-конвективную модель для описания выхода ГПД при наличии пластической деформации. Поставить и решить стационарную задачу. Сопоставить аналитическое решение с экспериментом.

## План.

1. Результаты экспериментальных исследований влияния деформации ползучести на выход ГПД.

2. Диффузионно-конвективную модель для описания выхода ГПД при наличии пластической деформации.

3. Постановка и решение стационарной задачи.

4. Сопоставление аналитического решения с экспериментом.

В восьмидесятые годы прошлого века на ИРТ-МИФИ выполнялась программа сотрудничества с Францией по исследованию пластических свойств ядерного топлива в радиационных условиях. Эксперименты по исследованию высокотемпературной ползучести в инициативном плане сопровождались регистрацией газов-продуктов деления (ГПД). На образцах технологии DCI, обладающих повышенной пластичностью и низкими значениями выходов ГПД, были получены нетривиальные результаты. При малых установившихся скоростях деформации ползучести выход ГПД был ниже стационарного выхода при отсутствии деформации и превышал его при больших скоростях.

Объяснить полученные результаты можно с помощью следующей модели:

- при высоких температурах в эксперименте (1400 К-1700 К) ГПД диффундируют в твердом теле по дефектам кристаллической решётки внутри зерна.

- в результате приложенного механического напряжения возникает направленное движение дефектов, приводящее к пластической деформации материала.

- движение ГПД описывается уравнением диффузионно-конвективного переноса.

- пластическая деформация образца в основном определяется деформацией зерна.

- эмиссия ГПД из зерна полностью определяет выход газа из поликристаллического образца в предположении, что коэффициент зернограничной диффузии значительно больше объёмного коэффициента.

- в поликристаллическом пористом образце при воздействии внешней сжимающей нагрузки на поверхности зерна возникают зоны с деформацией сжатия (плотный контакт между зернами) и зоны с деформацией растяжения (ослабленный пористостью контакт между зернами), соответственно потоки дефектов направлены из зоны с деформацией сжатия и в зону с деформацией растяжения, в этом случае суммарный поток ГПД с поверхности зерна можно представить в виде:

 , (1)

где Rc Rp -потоки газа с поверхности зерна при деформациях сжатия и растяжения. S, Sp, k=Sp/S –площадь поверхности зерна, площадь зоны растяжения, доля поверхности растяжения.

Для количественного определения выхода ГПД рассмотрим стационарное диффузионно-конвективное уравнение для полупространства с нулевыми граничными условиями, предполагая, что коэффициент диффузии весьма мал и основное падение концентрации происходит в тонком поверхностном слое зерна:

, (2)

где N – концентрация изотопа ,d –коэффициент диффузии ,u- скорость движения дефектов, λ – постоянная распада, b – плотность источников газа.

Решение системы (2) с учётом соотношения (1) можно выразить в следующем виде:

, (3)

Безразмерная скорость движения дефектов дается выражением:

 (4)

Выход с поверхности зерна при V=0 равен:

 (5)

Соотношение (3) дает возможность определить эффект влияния пластической деформации на выход ГПД:

W <1 при 0 <k < 0.5 и 0<V<V1 , W >1 при 0 <k <0.5 и V>V1 , где

 ;  при 

Для сопоставления экспериментальных результатов с уравнением (3) выразим величину V через параметры, регистрируемые в эксперименте:

- скорость движения дефектов u пропорциональна скорости ползучести:

u~έL, (6)

где έ – скорость ползучести, L – линейный размер зерна.

- относительный выход (отношение выходящего на внешнюю поверхность газа к образующемуся внутри объёма зерна- утечка) при u=0 определяется экспериментально и равен:

 , (7)

где S, *υ* -поверхность и объём зерна.

Используя систему уравнений (4,5,6,7) для определения V получим:

 (8)

В уравнении (8) выражение в скобках порядка единицы.

Сопоставление экспериментальных результатов по выходу 88Kr с уравнением (3) при ползучести диоксида урана в температурном интервале 1400-1800 К и механическом напряжении на образце от 0 до 40 МПа проведены с использованием стандартной программы Statistica 6, нелинейной её части. Определялся параметр **к** – доля поверхности растяжения. На графике представлены результаты сопоставления при **к** = 0,06. Полученное значение несколько ниже консервативной оценки [24] по соотношению:

,

где а- величина порядка единицы, зависит от выбранной геометрии зерна (типа многогранника), ξ- доля пористости сосредоточенная по границам зерен, p- пористость.

Если принять а = ξ =1 (консервативная оценка), то для топлива из диоксида урана **к** = 0,074 - 0,17 при изменении пористости р= 0,02-0,07.

В основу определения параметров переноса ГПД в диоксиде урана в процессе его облучения в ядерном реакторе положен весьма общий подход - феноменологическое рассмотрение процесса диффузии продуктов деления. Этот принцип изначально предполагает использование математического аппарата в однородной среде с учетом фундаментальных физических законов с последующей опорой на экспериментальные результаты для нахождения физических параметров вещества. Полученные таким образом физические параметры могут быть в последствии использованы для решения более сложных практических задач. Представленные результаты позволяют определить радиационно-стимулированные параметры переноса, существенно отличающиеся от соответствующих аналогов, получаемых вне поля облучения. Эти параметры могут быть использованы в программах расчета твэлов ядерных реакторов и при рассмотрении нестационарных явлений в твэлах.

В основу предложенной модели двухстадийного переноса ГПД включены положительные (с нашей точки зрения) качества предыдущих моделей. Предварительные расчеты показали, что использование общего решения стационарной задачи двухстадийной диффузии в стандартной программе нелинейной статистики либо не приводит к получению однозначных результатов, либо слишком сложно для стандартной программы из-за большого количества определяемых параметров. Так для решения аналогичной задачи в работах Елмановой в 90-е годы была разработана специальная программа, которая по утверждению автора справлялась с четырьмя параметрами, но требовала дополнительных связей между параметрами, если их было более четырех, при этом расчеты проводились только с одним радиоактивным изотопом.

Представленные для обработки экспериментальные результаты по выходу ГПД из двух исследованных образцов, в зависимости от постоянной распада, весьма близко соответствовали двум частным случаям, вытекающим из аналитической модели. Аналитические решения обладают значительной неопределенностью - это сомножители, каждый из которых должен иметь собственное значение, а их произведение соответствовать экспериментально полученной величине. Любые дополнительные экспериментальные или теоретические результаты для исследуемого материала способны снизить степень неопределенности.



Сопоставление результатов расчёта с экспериментом.