

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
по фундаментальным исследованиям
НИЦ «Курчатовский институт»
В.Ю. ЕГОРЫЧЕВ

«28» октября 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию *Воробьева Егора Евгеньевича «Кинетика ползучести и неустойчивость циркониевых труб под давлением»*, представленной на соискание учёной степени кандидата *физико-математических наук* по специальности *01.04.07 – Физика конденсированного состояния*.

На сегодняшний день основу мировой ядерной энергетики составляют реакторы водо-водяного типа, в которых в качестве топлива используется диоксид урана, а материала оболочки твэла - сплавы циркония. Оболочка твэла эксплуатируется в жестких условиях повышенных рабочих температур (350-380°C), нейтронного облучения, воздействию наружного и внутреннего давления, а также подвергается коррозионному взаимодействию с теплоносителем с внешней стороны и продуктами деления и топливом с внутренней стороны. Герметичность и размерная стабильность твэлов являются одними из основных критериев работоспособности топлива реактора.

Наличие давления при повышенных рабочих температурах вызывает ползучесть оболочки твэла в процессе эксплуатации. Традиционно ресурс работы оболочек твэлов прогнозируют при ползучести под внутренним давлением – по медленному увеличению диаметра и сжатию стенки трубки. Однако ресурс ТВС иногда ограничен «нештатной» местной деформацией одного из твэлов под наружным давлением: образованием резких гофров над фасками таблеток, сплющиванием оболочки (вплоть до соприкосновения сторон) в месте повреждения и несплошности топливного столба. Замена внутреннего давления наружным не сводится к замене растяжения стенки на сжатие. Сплющивание и

гофры представляют собой пластическую неустойчивость и большой изгиб оболочки переменной овальности, которой из уравнений ползучести при сжатии кольца не следует. Таким образом, возникает необходимость получить общее решение задачи теории ползучести о совместном изменении формы и размеров трубы любой овальности, что было сделано в данной **диссертационной работе и определяет ее актуальность.**

В работе Е.Е.Воробьева поставлена и решена задача о формоизменении труб при ползучести под действием гидростатического давления и экспериментальная проверка решения сериями долговременных испытаний труб из сплавов циркония на ползучесть во всем диапазоне условий эксплуатации оболочек твэл – при температурах 350-380°C и окружных напряжениях 70-130 МПа вне облучения. Оптимизирована методика испытаний на ползучесть под гидростатическим давлением, в том числе, приемы измерений овальности и ее неравномерности, анализ данных с предельным извлечением информации о константах кинетики, их надежности и об адекватности сопоставляемых моделей ползучести. Основные выводы из аналитического решения задачи ползучести подтверждены системой экспериментов.

В качестве **новых и наиболее научно-практически значимых результатов** работы отметим:

1. Автором получены единые уравнения ползучести трубы любой овальности под наружным или внутренним гидростатическим давлением. Из их исследования вытекают, в частности, качественные закономерности процессов:

- для любой исходной конфигурации трубы есть единый путь её эволюции: траектория взаимосвязанных изменений овальности и длины периметра. Температура и напряжения влияют только на скорость движения по этой траектории, а знак давления – на направление движения;

- сплющивание при ползучести происходит при много меньших напряжениях, чем упругая потеря устойчивости контура;

- время сплющивания существенно зависит от начальной технологической овальности трубы.

2. Автором отработана методика испытаний труб на ползучесть под наружным гидростатическим давлением с прецизионными измерениями овальности, периметра, их неравномерности и с предельным извлечением информации из массива данных для описания процесса. Выполненные испытания 59 труб из сплавов типа Э110 до 4250 ч во всём диапазоне напряжений и температур эксплуатации твэл показали, что ползучесть под внутренним давлением следует обычному «двухстадийному» закону с переходом в стационарный процесс за время ~ 1000 ч. Указана возможность прогнозировать время в эксплуатации: до посадки оболочки твэла на топливо и до «нештатного» повреждения оболочки сплющиванием. Экспериментально найдены необходимые константы кинетики ползучести. Указана взаимозаменяемость испытаний под наружным и под внутренним давлением и её пределы. Предложено оценивать предел возможного совершенствования структуры за счёт режимов термомеханической обработки – по полной величине деформации в переходном процессе ползучести.

3. Системой экспериментов подтверждены основные выводы модели: в одинаковых условиях ползучести скорости удлинения периметра под внутренним и под наружным давлением совпадают. Они определяют скорость изменения овальности под наружным давлением, и эта жёсткая связь не зависит от условий ползучести.

Основные результаты работы автора апробированы научным сообществом на российских научных конференциях и семинарах, опубликованы в 4 работах, каждая из которых входит в перечень журналов, рекомендованных ВАК.

Автореферат диссертационной работы полностью соответствует её содержанию. Диссертационная работа написана чётким и ясным языком с достаточным количеством табличного и графического материала, поясняющего и иллюстрирующего результаты и обсуждения полученных результатов.

По содержанию и оформлению работы можно сделать следующие замечания и дать следующие комментарии:

1. В работе построена модель ползучести циркониевых оболочек твэлов для прогнозирования их неустойчивости и сплющивания в процессе эксплуатации. Модель построена на основе данных по механическим характеристикам циркониевых оболочек твэлов в исходном состоянии. При этом непонятно, как построенная модель учитывает изменения механических свойств оболочек твэлов под действием эксплуатационных факторов?

2. В предложенной автором модели ползучести рассматриваются только тангенциальные нагрузки, действующие на оболочку твэла. При этом не рассматриваются аксиальные нагрузки, которые существуют в реальных условиях, и не учитывается текстура материала. Как учитывать эти факторы и насколько адекватной будет построенная модель ползучести при их учете?

3. На рисунке 5 автореферата и 5.3 диссертации показана связь деформации $\lambda(\tau)$ окружного сжатия под наружным давлением и деформации $\lambda(\tau)$ за это же время под равным внутренним давлением. Автором делается вывод, что в одинаковых условиях ползучести изменения длины периметра под внутренним и наружным давлением совпадают. Данный вывод требует пояснения, поскольку из рисунка это совсем не очевидно, а статистическая обработка данных графика не приводится.

4. В качестве пожелания на будущее хотелось бы отметить, что в работе не проводились структурные исследования материалов оболочек твэлов, а, как известно, ползучесть контролируется движением дислокаций. Представляет интерес адаптация разработанной модели ползучести с учетом реальных данных по микроструктуре материала, в том числе с учетом сложных закономерностей ее изменения при облучении. Кроме того, было бы полезным на основе результатов исследований разработать рекомендации конструкторам по допускам к овальности и эллиптичности циркониевых оболочек твэлов для повышения их устойчивости к формоизменению в процессе эксплуатации.

Перечисленные замечания и комментарии не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Поставленная цель

диссертационного исследования достигнута благодаря решению всех соответствующих задач на достаточно высоком научном уровне.

Закключение. Диссертационная работа Воробьева Егора Евгеньевича «Кинетика ползучести и неустойчивость циркониевых труб под давлением», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Отзыв составил
Д.т.н., профессор,
Главный научный сотрудник
Отделения реакторных материалов
и технологий Курчатовского комплекса
НБИКС-природоподобных технологий



Кулешова Евгения Анатольевна

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсужден и одобрен в Отделении реакторных материалов и технологий Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт» (Протокол заседания №17 от 10 октября 2019 г.).

Руководитель отделения реакторных
материалов и технологий Курчатовского
комплекса НБИКС-природоподобных технологий
д.т.н., профессор



Гурович Борис Аронович

Ученый секретарь отделения реакторных
материалов и технологий Курчатовского
комплекса НБИКС-природоподобных технологий
к.т.н.



Мальцев Дмитрий Андреевич

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»
Д.ф.-м.н.



Форш Павел Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт»)

Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, <http://www.nrcki.ru>