

## Гармонизация свойств твэла с нитридным топливом использованием теплопроводного подслоя с антикоррозионными свойствами

Орлов Виктор Владимирович, доктор физ-мат наук, академик РАЕН, г.н.с.  
АО «НИКИЭТ», Москва

Орлова Екатерина Андреевна, канд. техн. наук, доцент  
ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск

Орлов Михаил Андреевич, канд физ-мат наук, м.н.с.  
ЧУ ИТЦП «ПРОРЫВ», Москва

*Разработан не имеющий аналогов в мире подслоя в твэле на основе свинца, легированного магнием и цирконием, совместимый с оболочкой твэла. Цель работы – обеспечить высокую теплопроводность твэла использованием жидкометаллического подслоя вместо газового, что позволяет существенно (на сотни градусов) снизить температуру в центре топлива, повысить ресурс и, соответственно, экономичность ТВС, а также безопасность реакторной установки.*

**Ключевые слова:** нитридное топливо, теплоносители на основе свинца, антикоррозионное покрытие, внутритвэльный подслей.

Изначально в реакторной установке (РУ) БРЕСТ с естественной безопасностью в ядерном и пожаро – взрывном плане, с высокотеплопроводным нитридным уран-плутониевым топливом и свинцовым теплоносителем предполагали использовать теплопроводный свинцовый внутритвэльный подслей для обеспечения высокой теплопроводности и, соответственно, повышенных безопасности, ресурса и экономичности твэла в целом [1-3].

Однако экспериментальные исследования показали, несмотря на узость зазора, существенный массоперенос – коррозионное растворение в свинце компонентов оболочки твэла в горячей зоне и осаждение в холодной зоне, и была принята концепция твэла с гелиевым подслоем, что исключило финансирование разработок по жидкометаллическому подслою. Замена гелиевого внутритвэльного подслоя на теплопроводный жидкометаллический позволяет снизить температуру в центре нитридного топлива на сотни градусов, что приводит к уменьшению распухания топлива [4].

Для гармонизации свойств твэла по теплопроводности и коррозионной стойкости авторами разработан не имеющий аналогов в мире подслоя на основе свинца, легированного магнием (до 3 % по массе) и цирконием (до 0,2 %), совместимый с оболочкой твэла, обеспечивающий самопроизвольное формирование на поверхности стали защитного покрытия и, соответственно, самозалечивание случайных повреждений покрытия. Проведены экспериментальные исследования сталей в сплаве Pb-Mg-Zr с образованием защитного покрытия ZrN (ZrC) в интервале температуры 690 – 860 °С длительностью до 5700 ч, в том числе макетов твэла с сердечником из нитрида урана, испытанных при 700 °С в течение 5700 ч, имитаторов твэлов типа «труба в трубе» длиной 1100 мм при перепаде температуры 650 – 420 °С длительностью до 1000 ч. [5-13]. Коррозионное взаимодействие стали и сплава отсутствовало во всех испытаниях, что подтверждено современными методами анализа. Разработка находится в стадии пост испытательной выдержки экспериментальных твэлов ЭТВС - 4 с таким подслоем на РУ «БОР-60». Таким образом, решение проблемы высокотеплопроводного твэла близко к завершению.

Для подтверждения работоспособности предложенного метода внутри твэла проведены исследования по формированию в течение 50 ч защитного покрытия ZrN (ZrC) в

узком зазоре шириной 150 мкм между коаксиально расположенными трубками из стали 16X12ВМСФБР длиной до 1100 мм. Методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии подтверждено выделение Zr на внутренней поверхности имитатора твэла, как при температуре 650 °С вблизи источника, так и при температуре 420 °С на расстоянии 1180 мм от источника Zr и, следовательно, доказано успешное формирование покрытия в условиях функционирования твэла.

Максимальное проникновение циркония в сталь 16X12ВМСФБР обнаружено после испытаний в сплаве при температуре 750 - 860 °С в течение 3000 ч. на глубину 5 мкм и азота на глубину до 2 мкм, т.е. защитное покрытие является диффузионно плотным и не нуждается в контроле концентрации компонентов в сплаве.

Расчет распределения температуры в твэлах установки типа «БРЕСТ» [14] по методике [15] с использованием данных из литературных источников [16 - 21] показал снижение значения максимальной температуры в центре топлива с 1520 °С в твэле с гелиевым подслоем до 800 °С в твэле с жидкометаллическим подслоем из свинцово-магниевого эвтектики, насыщенной цирконием (рисунок 1). Температура на внешней и внутренней поверхностях оболочки из стали 16X12ВМСФБР в этом случае не превышает 620 °С.

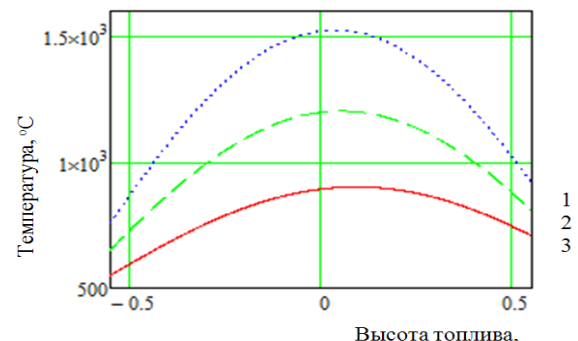


Рис. 2. Распределение температуры в центре топлива в зависимости высоты твэла.

1-температура в центре топлива с гелиевым подслоем ( $\Delta=0,1$ мм), 2- температура в центре топлива с гелиевым подслоем ( $\Delta=0,05$ мм), 3- температура в центре топлива со свинцово-магниевым подслоем ( $\Delta=0,1$ мм)

Таким образом, использование внутритвэльного подслоя на основе свинца, легированного магнием (до 3 % по

массе), насыщенного цирконием, решает триединую проблему гармонизации свойств твэла:

- повышается теплопроводность и, соответственно, снижается существенно (на сотни градусов) температура в центре топлива, снижается распухание топлива. При этом за счет снижения температуры в центре топлива повышается безопасность при авариях УТОР (неконтролируемое увеличение мощности), ULOF (прекращение расхода теплоносителя через реактор);
- повышается коррозионная стойкость оболочки твэла, в результате самопроизвольного формирования на поверх-

ности стали защитного покрытия и, соответственно, самозалечивания случайных повреждений покрытия, снижается массоперенос и повышается ресурс ТВС.

- высокая теплопроводность жидкометаллического подслоя позволяет увеличить ширину зазора между топливом и оболочкой твэла, что также позволяет повысить ресурс ТВС за счет геометрического фактора увеличения времени касания топливом оболочки твэла.

В результате повышается ресурс, безопасность и, соответственно, экономичность и конкурентоспособность РУ.

### Литература:

1. Adamov E.O., Orlov V.V., Smirnov V.S. Progress in lead cooled fast reactor design // Proc. Intern. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants. Tokyo, Japan, Oct. 25-29, 1992. v.2. Paper №16-6. — PP. 1-4.
2. Орлов В.В., Пикалов А.А., Сила-Новицкий А.Г. и др. Экспериментальный петлевой канал в реакторе БОР-60 для испытаний твэлов реакторов БРЕСТ. Сб. трудов ТЖМТ-98, 1999, Обнинск, — С. 521-528.
3. Кордюков А.Г., Леонов В.Н., Пикалов А.А. и др. Испытания макетов твэлов реактора Брест-ОД-300 в автономном свинцово-охлаждаемом канале БОР-60 // Атомная Энергия. 2004. т. 97. вып. 2. — С. 131-138.
4. Беляева А.В., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н. и др. Основные результаты исследований уран-плутониевого нитридного топлива после облучения в реакторе БОР-60. / Сб. докл. Международной научн.-техн. конф. «Инновационные продукты и технологии ядерной энергетики», 27-29 ноября 2012 г. М.: НИКИЭТ, 2012. — С. 223-228.
5. Орлов В.В., Орлова Е.А., Цикунов В.С. и др. Формирование защитных нитридных покрытий на поверхности сталей. Препринт № ЕТ – 08/77. Москва: НИКИЭТ, 2008.
6. Орлова Е.А., Гурбич А.Ф., Молодцов С.Л. и др. Формирование и исследование защитных покрытий, совместимых с нитридным топливом, на сталях ферритно-мартенситного класса // Атомная энергия. 2008. Т. 105. Вып. 5. — С. 269-274.
7. Орлова Е.А., Орлов Ю.И., Крючков Е.А., Комышный В.Н., Жмурич В.Г., Загребав С.А., Котовский Н.А., Дворцевой В.Г. Самоорганизующееся карбонитридное покрытие на стали из расплавленной эвтектики свинец-магний. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 1. — С. 45-55.
8. Орлова Е.А., Букин Е.А. Формирование карбонитридных защитных покрытий на стали. [Эл. ресурс] / Сб. докл. на межведомственном семинаре «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» 20-22 октября 2010 г. — Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2010. — С. 406-414 (CD-ROM).
9. Орлов В.В., Леонов В.Н., Орлова Е.А. Способ формирования защитного покрытия на поверхности металла. / Патент РФ 2439203. Оpubл. 10.01.12. Бюлл. № 1.
10. Орлова Е.А. Устройство для создания защитного покрытия на металлической поверхности изделия. Патент на полезную модель № 99484. Оpubл. 20.11.2010, Бюлл. № 32.
11. Орлова Е.А., Орлов Ю.И., Крючков Е.А. и др. Самоорганизующееся карбонитридное покрытие на стали из расплавленной эвтектики свинец-магний. / Сб. докл. Международной научно-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики (МНТК НИКИЭТ-2012)», 27-29 ноября 2012 г. М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. С. 174-182.
12. Орлова Е.А., Крючков Е.А., Комышный В.Н., Загребав С.А., Жмурич В.Г., Котовский Н.А., Засорин И.И., Соломатин А.Е., Волон А.Н., Воробьев Н.В., Толмачев Д.В., Санникова З.О., Зайцев П.А. Жидкометаллический подслей с антикоррозионными свойствами для твэлов с нитридным топливом // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2015. № 1 (80). — С. 80-88.
13. Орлова Е.А., Агафонов В.Р., Алексеев В.В., Аракчеев А.А., Воробьев Н.В., Жмурич В.Г., Загребав С.А., Засорин И.И., Крючков Е.А., Орлов М.А., Соломатин А.Е. Синергетика системы конструкционные материалы — сплавы жидких металлов. // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Вып. 22. Калуга: Изд. ГАОУ ДПО «Калужский государственный институт развития образования», 2017. — С. 272–281.
14. Орлова Е.А., Круглов А.Б., Чуваев Д.В., Стручалин П.Г., Загребав С.А., Жмурич В.Г. Тепловые характеристики твэла со свинцово-магниевым подслоем // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2016. №4. — С. 95-100.
15. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В.: Инженерные расчеты ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1980.
16. Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С., Стручалин П.Г., Орлова Е.А., Загребав С.А., Жмурич В.Г. Теплопроводность сплавов Рb-Mg в диапазоне температур 300-650°C / Сб. тезисов докл. НТК «Теплофизика реакторов нового поколения. Теплофизика-2015». Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2015. — С.28-29.
17. Рогозкин Б.Д., Бибилашвили Ю.К., Казеннов Ю.И. и др. Предварительное экспериментальное обоснование конструкции твэла с моноснитридным топливом и свинцовым подслоем для реактора БРЕСТ // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. Т.2. ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. — С.458-466.
18. Наумов В.В., Сила-Новицкий А.Г., Смирнов В.С. и др. Требования к активной зоне реакторов БРЕСТ // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. Т.2. ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. — С.511-520.
19. Рогозкин Б.Д., Степеннова Н.М., Прошкин А.А. Моноснитридное топливо для быстрых реакторов // Атомная энергия. 2003. Т.95. Вып.3. — С.208-221.
20. Bauer A. Nitride Fuels: Properties and Potentials // J. Reactor Technology. Summer 1972. V.15. No2. — P.87.
21. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Учебное пособие 2-ое издание перер. и доп. М.: ИздАт, 2007. — 360 с.