

борной ошибки и статистического разброса экспериментальных данных составила 8—10%. Удовлетворительная корреляция наблюдается с аналитической зависимостью [8] для диоксида урана. Характер рассчитанной зависимости теплопроводности почти полностью коррелирует с соответствующей зависимостью температуропроводности. Максимальное снижение теплопроводности в сравнении с диоксидом урана наблюдается при минимальной температуре и достигает 47% для уран-гадолиниевого топлива с содержанием оксида гадолиния 8% по массе.

Авторы выражают благодарность Н.М. Рысеву, Н.А. Дегтяреву и В.Е. Рукосуеву за подготовку образцов, Д.С. Миссорину, И.С. Еремину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена по заказу АО «ТВЭЛ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Топливные таблетки.** Методика измерений плотности и пористости с использованием гидростатического взвешивания. СТК-66—2017. М., АО «ТВЭЛ», 2017. 25 с.
2. **Ohmichi T., Fukushima S., Maeda A., Watanabe H.** On the relation between lattice parameter and O/M ratio for uranium dioxide — trivalent rare earth oxide solid solution. — J. Nucl. Mater., 1981, v. 102, p. 40—46.
3. **Федотов А.В., Михеев Е.Н., Лысиков А.В., Новиков В.В.** Теоретическая и экспериментальная плотность соединений (U, Gd)O₂ и (U, Er)O₂. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 6, с. 344—347. // **Fedotov A.V., Mikhchev E.N., Lysikov A.V., Novikov V.V.** Theoretical and Experimental Density of (U, Gd)O₂ and (U, Er)O₂. — Atomic Energy, 2013, v. 113, № 6, p. 429—434.
4. **Оксиды урана.** Методика полярографического измерения кислородного коэффициента. СТК-85—2018. М., АО «ТВЭЛ», 2018. 28 с.
5. **Федотов А.В., Лысиков А.В., Лутков М.А.** Теплофизические свойства уран-гадолиниевых топливных таблеток ВВЭР с 6—10% по массе оксида гадолиния. — Атомная энергия, 2023, т. 135, вып. 3—4, с. 120—126. // **Fedotov A.V., Lysikov A.V., Lutkov M.A.** Thermophysical properties of VVER uranium-gadolinium fuel pellets with 6—10wt% of gadolinium oxide // Springer Link, Published online 17.06.2024, <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01096-6>.
6. **Martin D.** The thermal expansion of solid UO₂ and (U, Pu)O₂ mixed oxide — a review and recommendations. — J. Nucl. Mater., 1988, v. 152, p. 94—101.
7. **Федотов А.В., Миссорин Д.С., Михеев Е.Н.** Обзор термического расширения топливных таблеток UO_{2+x} и (U, Gd)O_{2+x}. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2020, т. 103, вып. 2, с. 97—116.
8. **Fink J.** Thermophysical properties of uranium dioxide. — J. Nucl. Mater., 2000, v. 279, p. 1—8.
9. **Миссорин Д.С., Федотов А.В., Михеев Е.Н.** Обзор температурной зависимости теплоемкости топливных таблеток UO_{2+x} и (U, Gd)O_{2+x}. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2023, т. 119, вып. 3, с. 95—113.
10. **Ronchi C., Sheindlin M., Musella M., Hyland G.** Thermal conductivity of uranium dioxide up to 2900 K from simultaneous measurement of the heat capacity and thermal diffusivity. — J. Appl. Phys., 1999, v. 85, p. 776—789.
11. **Hirai M., Ishimoto S.** Thermal diffusivity and thermal conductivity of UO₂—Gd₂O₃. — J. Nucl. Sci. Techn., 1991, v. 28, p. 995—1000.
12. **Brandt R., Neuer G.** Thermal conductivity and thermal radiation properties of UO₂. — J. Non-Equilib. Thermodyn., 1976, v. 1, p. 3—23.

Поступила в Редакцию 02.10.24

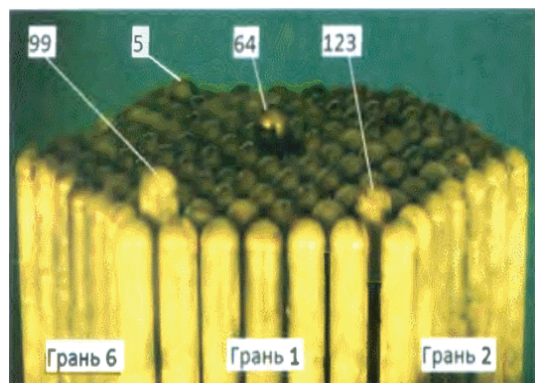
УДК 621.039.531

ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТВЭЛОВ СО СМЕШАНЫМ НИТРИДНЫМ УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ТОПЛИВОМ

Забудько Л.М., Грачев А.Ф. (АО «Прорыв», г. Москва), Поролло С.И., Мариненко Е.Е. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск), Звир Е.А., Беляева А.В., Крюков Ф.Н. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград), Скупов М.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: zlm@pnproryv.ru

Для обоснования работоспособности твэлов БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М в БОР-60 и БН-600 облучают экспериментальные ТВС со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом. Проведенные в АО «ГНЦ НИИАР» послереакторные исследования показали, что характер их формоизменения отличается от формоизмене-

ния твэлов с оксидным топливом. Ранее [1] было показано, что нитридные твэлы имеют большее удлинение и овализацию оболочки, чем облученные в тех же условиях в составе одной сборки оксидные (рис. 1). Причиной такого различия является более сильное механическое воздействие нитридного топлива на оболочку.



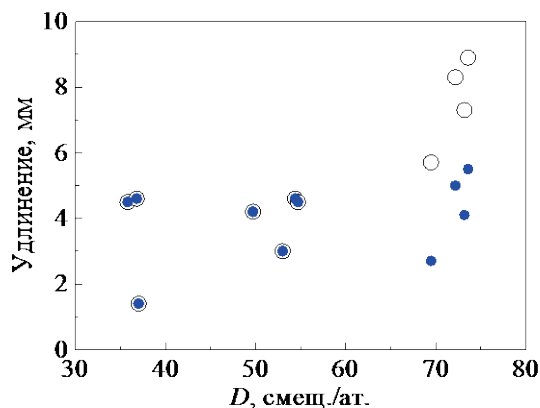
Р и с. 1. Внешний вид верхнего торца пучка твэлов КЭТВС-7 после облучения (цифрами указаны твэлы с нитридным топливом)

В настоящей статье приведен анализ формоизменения твэлов со смешанным нитридным топливом и оболочкой из стали ЧС68-ИД х.д., ЭК184-ИД х.д. и ЭП823-Ш после облучения в БН-600.

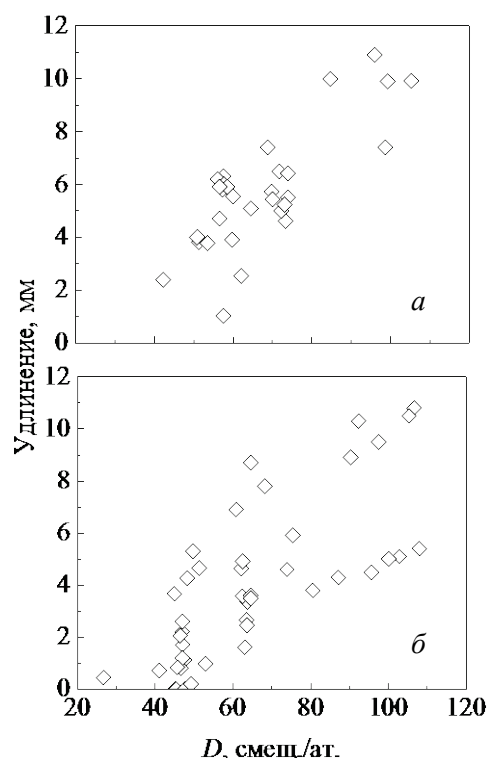
Материалы и методика исследования.

Исследования удлинения и овализации были проведены на 12 твэлах с оболочкой из стали ЧС68-ИД х.д., 38 — из стали ЭК164-ИД х.д. и 69 — из стали ЭП823-Ш. Твэлы облучали в составе 17 экспериментальных ТВС в диапазоне максимального выгорания топлива 3,1—9% тяж. ат. и повреждающей дозы 26—108 смещ./ат. Их длину измеряли дистанционным методом и сравнивали с аттестованным калибром. Суммарная погрешность измерения не превышала $\pm 0,3$ мм. Наружный диаметр твэлов определяли контактным методом на автоматизированном стенде в четырех азимутальных ориентациях 0, 45, 90 и 135° с шагом по длине 1 мм. Погрешность измерения не превышала $\pm 2,5$ мкм.

Послереакторные исследования. На рис. 2, 3 показано, что длина твэлов увеличивается и при повреждающей дозе ≥ 100 смещ./ат. достигает ~ 10 мм. Видно, что твэлы удлиняются в два этапа. На первом этапе оболочка деформируется в результате локального механического взаимодействия с топливным сердечником. Удлинение твэлов даже одной и той же экспериментальной ТВС значительно различается, достигая 4—6 мм, но при этом не возрастает с увеличением повреждающей дозы. На втором этапе при дозе более 60 смещ./ат. дальнейшее увеличение длины обусловлено вакансионным распуханием оболочки. На рис. 2 показана общая



Р и с. 2. Зависимость удлинения твэлов с оболочкой из стали ЧС68-ИД х.д. от повреждающей дозы после облучения в БН-600: ●, ○ — длина твэлов без учета и с учетом распухания оболочки соответственно



Р и с. 3. Зависимость удлинения твэлов с оболочкой из стали ЭК164-ИД х.д. (а) и ЭП823-Ш (б) от повреждающей дозы после облучения в БН-600

длина твэла без учета и с учетом распухания оболочки из стали ЧС68-ИД х.д. Исследования распухания образцов стали ЭК164-ИД х.д. и ЭП823-Ш, вырезанных из оболочек твэлов экспериментальных ТВС-14 и -11, также показали, что повышение длины твэлов при дозе более 80 смещ./ат. обусловлено распуханием их оболочек (см. рис. 3). Тем не менее механическое взаимодействие топлива с оболочкой, которое почти не зависит от выгорания, вносит значительный вклад в удлинение твэла.

Механическое локальное взаимодействие топливного сердечника с оболочкой проявляется не только в увеличении длины твэлов, но и в диаметральной деформации оболочки. Характерными признаками такого взаимодействия являются:

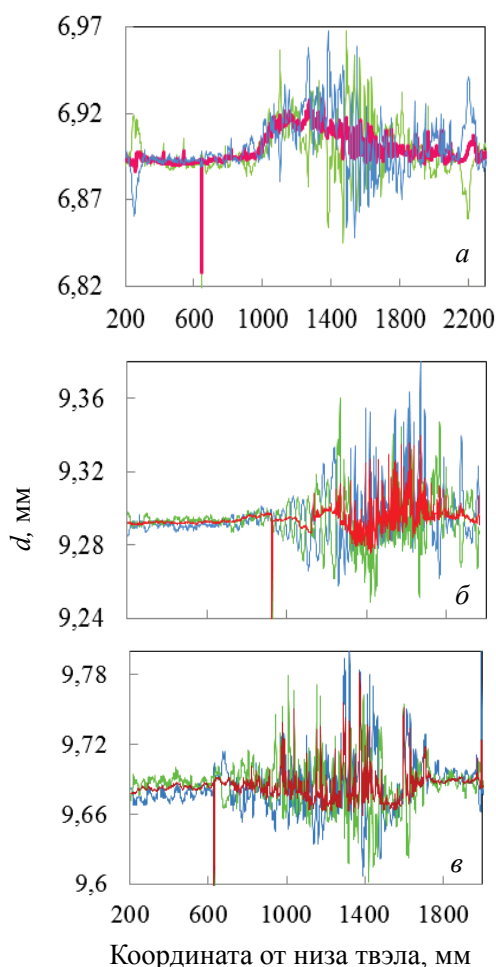
нерегулярная овализация оболочки по длине топливного сердечника (рис. 4);

регулярное повышение диаметра оболочки твэла в местах стыка топливных таблеток (рис. 5);

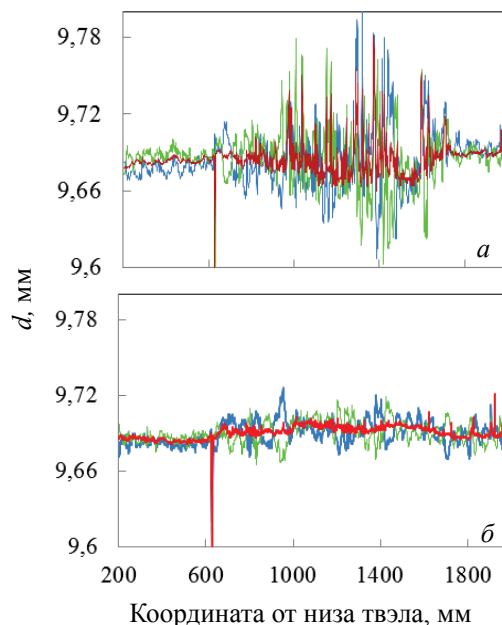
значительное скачкообразное изменение диаметра оболочки, ступенька на профилограмме;

снижение диаметра оболочки твэла ниже исходного (см. рис. 4, б, в).

Обсуждение результатов. Основная причина существенного отличия формоизменения твэлов с нитридным топливом, облученных в одинаковых условиях, от оксидных заключается



Р и с. 4. Профилограмма твэлов БН-600 с оболочкой из стали ЧС68-ИД х.д. (а), ЭК164-ИД х.д. (б) и ЭП823-Ш (в) после облучения: —, —, — ориентация 0°, 90° и средняя по четырем соответственно



Р и с. 5. Профилограмма твэлов с удлинением 5,29 (а) и 0,04 мм (б) с оболочкой из стали ЭП823-Ш после облучения в БН-600: —, —, — ориентация 0°, 90° и средняя по четырем соответственно

в его более высокой прочности. При сравнительно низкой температуре с более высокими прочностными свойствами нитридное топливо быстрых реакторов по своему поведению ближе к оксидному тепловых реакторов. Большинство из перечисленных эффектов наблюдали в твэлах легководных реакторов, и в настоящее время механизмы взаимодействия оксидного топливного сердечника с оболочкой изучены [2—4].

Исследования показали, что одной из главных причин механического воздействия сердечника на оболочку является фрагментация топливных таблеток при выходе реактора на мощность. В начальный период работы по радиусу топливной таблетки устанавливается температурный градиент, который создает в ней термические напряжения: растягивающие на периферии и сжимающие в центре [5—8]. Еще до достижения полной мощности реактора топливные таблетки твэлов разрушаются с образованием двух или более фрагментов, и дальнейшая мощность реактора повышается уже с фрагментированными таблетками.

При взаимодействии растрескавшейся топливной таблетки с оболочкой при повышении линейной мощности твэла можно выделить несколько стадий: термическое расширение таблетки и оболочки, приводящее к снижению исходного зазора, резкое снижение зазора в ре-

зультате растрескивания таблетки и смещения ее фрагментов в сторону оболочки, расширение таблетки из-за термоупругой деформации фрагментов, мягкое и начало жесткого механического воздействия топлива на оболочку [9]. После растрескивания таблетки оболочка контактирует с образовавшимися фрагментами только в нескольких точках.

При дальнейшем повышении мощности происходит термическое расширение топливных фрагментов, и эффективный диаметр таблетки увеличивается. Но на этой стадии свободное пространство в трещинах может компенсировать термическую деформацию фрагментов таблетки при их незначительном механическом воздействии на оболочку. Наконец, при определенной деформации топливные фрагменты крепко сцепляются между собой, и растрескавшаяся таблетка превращается в более жесткое тело. С этого момента сдерживающее влияние оболочки значительно снижается и скорость ее деформации увеличивается.

Несимметричное относительно оси твэла локальное механическое воздействие фрагментированного топливного сердечника на оболочку или как частный случай при случайном отклонении таблетки от осесимметричного положения приводит к ее эллипсности (овализации), превращению на определенном участке первоначально круглого сечения оболочки в овал. Такой вид овализации следует отличать от овализации твэлов с оксидным топливом и оболочкой из аустенитной стали в активной зоне быстрого натриевого реактора, которая обусловлена механическим взаимодействием с распухающей оболочкой через дистанционирующую проволоку. При этом максимум овализации достаточно регулярен и соответствует шагу навивки дистанционирующей проволоки.

Кроме овализации оболочек нитридных твэлов, наблюдается «бамбуковый эффект» — регулярные вздутия в местах стыка топливных таблеток. Такой вид деформации оболочки известен и для твэлов легководных реакторов с топливом из диоксида урана и связан со сложной формой деформации топливной таблетки, когда в результате растрескивания ее исходный правильный цилиндр превращается в гантель или песочные часы [10].

Следует отметить следующие общие закономерности изменения длины твэлов экспери-

ментальных сборок БН-600 с нитридным топливом:

твэлы с большим увеличением длины (см. рис. 5, *а*) имеют нерегулярные по форме профилограммы со значительной овализацией и участками, где диаметр меньше исходного. Твэлы с незначительным изменением длины (см. рис. 5, *б*) имеют плавные профилограммы и незначительную овализацию;

удлинение твэлов обратно пропорционально удлинению топливного столба;

осевая деформация твэлов, обусловленная механическим взаимодействием топливного сердечника с оболочкой твэла, в достаточно широком диапазоне не зависит от выгорания или повреждающей дозы. До получения данных об удлинении твэлов с оболочкой из стали ЭП823-Ш экспериментальной ТВС-11 в общем массиве данных повреждающая доза не превышает 64 смещ./ат., при которой распухание этой стали пренебрежимо мало [11]. Но при повреждающей дозе более 100 смещ./ат. уже необходимо при анализе учитывать распухание стали (см. рис. 3, *б*). При таком распухании обусловленное им удлинение составит ~3 мм. На такой же размер отличается длина твэлов экспериментальной ТВС-11 при минимальной 60 смещ./ат. и максимальной 108 смещ./ат. повреждающей дозе. Это позволяет утверждать, что прирост удлинения твэлов экспериментальной ТВС-11 с увеличением повреждающей дозы от 60 до 108 смещ./ат. связан лишь с распуханием оболочки. Это означает, что осевая деформация твэлов с оболочкой из стали ЭП823-Ш, обусловленная механическим взаимодействием топливного сердечника с оболочкой, в достаточно широком диапазоне также не зависит от выгорания топлива или повреждающей дозы. Аналогичный эффект наблюдается и для твэлов экспериментальной ТВС-14 (см. рис. 3, *б*) с максимальной дозой 105 смещ./ат.

Анализ экспериментальных данных позволяет утверждать, что основной причиной удлинения твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом является возникновение осевых сил вследствие термомеханического взаимодействия таблеток с оболочкой в условиях случайного смещения таблеток и/или их фрагментов от осесимметричного положения. При выгорании топлива таблетки, контактируя с оболочкой, перемещаются в осевом и радиаль-

ном направлениях. Осевые силы трения, возникающие при этом на участках контакта таблеток, растягивают оболочку и сжимают топливный столб.

Совместную аксиальную деформацию столба смешанного нитридного уран-плутониевого топлива и оболочки твэла экспериментальных ТВС БН-600 можно представить следующим образом:

нижняя часть топливного столба твэлов БН-600 закреплена в осевом направлении оболочки твэла с помощью пуклевки. В конструкции твэлов экспериментальных ТВС БН-600 топливный столб опирается на три пуклевки через стальную проставку;

при выходе реактора на мощность топливные таблетки фрагментируются и сцепляются с оболочкой в отдельных сечениях, что приводит в этих сечениях к увеличенной оваллизации. Дальнейшее повышение мощности вызывает аксиальную (увеличение длины) и радиальную (за счет оваллизации) деформацию оболочки. После выхода реактора на мощность деформирование оболочки может продолжаться в результате распухания топливного сердечника;

координаты точек закрепления топлива в оболочке на участке сердечника твэла носят случайный характер, связанный с многими переменными, но в любом случае усилие от деформации участка топливного столба между самой нижней точкой закрепления и нижним торцом сердечника будет передаваться на пуклевки через стальную прокладку;

аксиальная деформация оболочки в пределах топливного столба происходит неравномерно, локализуясь на отдельных участках;

отсутствие зависимости удлинения твэлов от выгорания и повреждающей дозы по результатам анализа формоизменения нитридных твэлов экспериментальных ТВС БН-600 свидетельствует о том, что основные деформационные процессы в оболочке происходят на начальной

стадии облучения. Тем не менее оболочка может удлиняться как при повторном выходе реактора на мощность, так и при работе на стационарном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Иванов Ю.А. и др. Результаты исследований твэлов комбинированных экспериментальных сборок реактора БН-600 со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом и оболочкой из стали ЧС68-ИД. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 3, с. 160—166.
2. Williford R. A cracked-fuel constitutive equation. — Nucl. Techn., 1984, v. 67, p. 208—220.
3. Лихачев Ю.И., Попов В.В., Николаев В.Н. и др. Оценка удлинения оболочки твэла РБМК при циклических изменениях мощности. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 6, с. 362—366.
4. Тутнов А.А., Ульянов А.И. Термомеханика твэлов энергетических реакторов. — Там же, 1987, т. 62, вып. 5, с. 326—334.
5. Verbeek H., Tobbe N., Hoppe B. Steinmetz liquid-metal fast breeder reactor fuel rod performance and modeling at high burnup. — Nucl. Techn., 1978, v. 39, p. 167—185.
6. Karahan A., Buongiorno J. Modeling of thermo-mechanical and irradiation behavior of mixed oxide fuel for sodium fast reactors. — Ibid., 2010, v. 396, p. 272—282.
7. Walton L., Matheson J. FUMAC — a new model for light water reactor fuel relocation and pellet-cladding interaction. — Ibid., 1984, v. 64, p. 127—138.
8. Лиханский В.В., Сорокин А.А., Зборовский В.Г. и др. Моделирование термомеханического поведения твэлов с выгорающим поглотителем на основе оксида гадолиния в коде РТОП-СА. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2021, вып. 4, с. 35—46.
9. Oguma M. Cracking and relocation behavior of nuclear fuel pellets during rise to power. — Nucl. Engng Des., 1983, v. 76, p. 35—45.
10. Gittus J. Theoretical analysis of the strains produced in nuclear fuel cladding tubes by the expansion of cracked cylindrical fuel pellets. — Ibid., 1972, v. 18, p. 69—82.
11. Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steel EP-823 after neutron irradiation to high doses in BOR-60. — J. Nucl. Mater., 2004, v. 329—333, p. 314—318.

Поступила в Редакцию 15.10.24