

УДК 621.039.55:621.762.4

Модель реакторного уплотнения ядерного топлива ВВЭР

П.Г. Демьянов

**АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва
PGDemyanov@bochvar.ru**

Во время осмотров ТВС легководных реакторов было обнаружено, что удлинение твэлов и твэгов различается. При проведении специальных реакторных экспериментов также выявлено различное размерное поведение таблеток UO_2 и УГТ, а именно пониженное уплотнение УГТ по сравнению с UO_2 или даже отсутствие уплотнения на начальных этапах облучения в реакторе. Такое различие в поведении топлива требует объяснения и разработки общей модели размерного поведения топлива для обеспечения надежности конструкций твэлов и их безопасной эксплуатации. Показано, что причинами разного размерного поведения UO_2 и УГТ являются технологические параметры, а именно плотность топлива, размер зерна и содержание гадолиния. Систематизированы данные по размерному изменению топлива в реакторных экспериментах, проведенных в исследовательском реакторе Halden на топливе с различным содержанием Gd_2O_3 и, соответственно, с различными технологическими параметрами. Разработана и верифицирована общая модель реакторного уплотнения топлива для ВВЭР, включая UO_2 , УГТ и МОКС-топливо.

Ключевые слова: ВВЭР, УГТ, МОКС, IFA-503, IFA-636, IFA-676, IFA-681, уплотнение, распухание, крупное зерно

Model of in-pile densification of WWER nuclear fuel

P.G. Demyanov

**JSC « A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow
PGDemyanov@bochvar.ru**

During inspections of fuel assemblies of light water reactors, it was found that the elongation of the UO_2 fuel rods and U-Gd fuel rods differed. During special reactor experiments, different dimensional behavior of the UO_2 and U-Gd fuel pellets was also revealed, namely, reduced densification of U-Gd fuel compared to UO_2 or even the absence of densification at the initial stages of reactor irradiation. Such a difference in fuel behavior require an explanation and development of a general model of the dimensional behavior of fuel to ensure the reliability of fuel rod designs and their safe operation. It is shown, that the reasons for the different dimensional behavior of UO_2 and U-Gd are the process parameters, namely, fuel density, grain size and gadolinium oxide content. The data on the size change of fuel in reactor experiments conducted in the Halden research reactor on fuel with different Gd_2O_3 content and microstructure parameters are systematized. The general model of in-pile fuel densification for WWER, including UO_2 , U-Gd and MOX fuel, has been developed and verified.

Key words: Fe-Cr-Al, short-term mechanical properties, aging, texture, Laves phase.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации оксидного топлива ВВЭР-1000 с выгорающим поглотителем, $UO_2+Gd_2O_3$ (уран-гадолиниевое топливо, УГТ), показал, что удлинение твэгов в начальный период эксплуатации выше, чем удлинение твэлов с UO_2 , однако к концу эксплуатации топлива длина твэлов и твэгов уравнивается, что

наблюдается по результатам визуального осмотра и данных ПРИ [1]. Эффект наблюдается как в реакторах типа ВВЭР, так и в PWR, но в реакторах PWR большее удлинение твэгов наблюдалось и после второй, и третьей топливной кампании (ТК). Изображения сборок Westinghouse с более удлиненными (выступающими) твэгами после 1-й, 2-й и 3-й топливной кампании [2] представлены на рис. 1 и 2.



А В С
Рис. 1. Изображения сборок Westinghouse с выступающими твэгами (отмечено о):
А - после 1-й ТК, В - после 2-й ТК, С - после 3-й ТК [2]

Изображение сборки ВВЭР после 1-й ТК [3] показано на рис. 1.

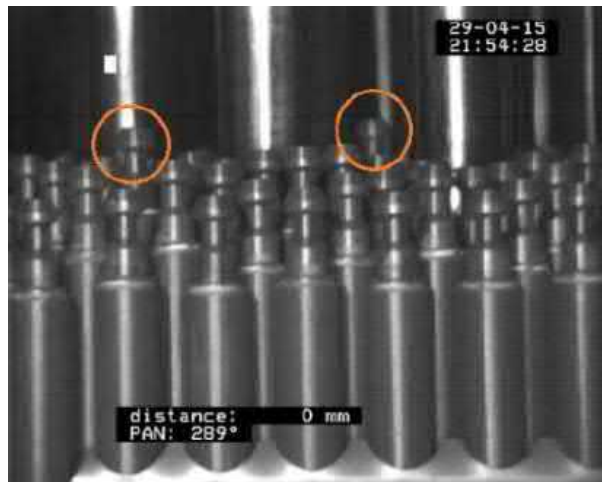


Рис. 2. Изображение сборки ВВЭР с выступающими твэгами (отмечено о) [3]

Такое поведение твэгов не приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик и является физически обоснованным. Но для учета особенностей реакторного поведения ядерного топлива при конструировании требуется детальное понимание процессов, происходящих под облучением, а обоснование работоспособности и безопасности твэлов и твэгов требует тщательного учета всех явлений, происходящих в топливных элементах, включая эффекты,

связанные с наличием выгорающего поглотителя. Таким образом, расчетные коды, используемые для лицензирования топлива, должны иметь адекватные модели физических процессов, верифицированные на экспериментальных данных.

Данная работа посвящена разработке модели реакторного уплотнения оксидного ядерного топлива для ВВЭР.

ОСОБЕННОСТИ УПЛОТНЕНИЯ И РАСПУХАНИЯ ТОПЛИВА

В работе [4] был проведен обзор и анализ публикаций по теме размерных изменений топлива и были выделены основные особенности данного процесса и факторы влияния:

- Твердотельное распухание топлива имеет линейную зависимость от выгорания.
 - Кинетика уплотнения топлива в реакторе носит экспоненциальный характер в зависимости от выгорания.
 - УГТ в начале облучения имеет более низкие температуры.
 - Основной вклад в радиационное уплотнение на ранних стадиях облучения вносят субмикронные поры.
 - Физические принципы уплотнения UO_2 и УГТ едины, но требуют учета особенностей микроструктуры топлива.
- Эти факторы были использованы при разработке модели размерных изменений топлива.

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для разработки и верификации модели уплотнения были использованы результаты экспериментов IFA-503, IFA-636, IFA-676 IFA-681, проведенных в исследовательском реакторе Halden (Норвегия).

IFA в названии экспериментов означает Instrumented Fuel Assembly (инструментированная топливная сборка), экспериментальные твэлы таких сборок были оснащены датчиками, позволяющими получать данные о состоянии топлива во время облучения, а именно: термоэлектрическими преобразователями, датчиками удлинения топливного столба, датчиками давления.

Эксперимент IFA-503 по исследованию радиационно-термического уплотнения топлива ВВЭР и PWR состоял из двух этапов. В первой части эксперимента проводилось облучение твэлов с топливом ВВЭР-440 и PWR, оснащенных датчиками удлинения топливного столба. Исследование [5] показало, что реакторное поведение стандартного топлива ВВЭР-440 и топлива PWR почти не отличалось, за исключением терморadiационного уплотнения в начальный период облучения. Вторая часть эксперимента проводилась уже для исследования терморadiационной размерной стабильности модифицированного топлива ВВЭР. Тест был проведен на нескольких типах топлива ВВЭР с модифицированной исходной

микроструктурой, которые отличались размером зерна, количеством субмикронных пор и плотностью топлива [6].

Эксперимент IFA-636 был направлен на расширение базы данных о поведении УГТ по сравнению с UO_2 . Твэлы и твэги были оснащены датчиками удлинения топливного столба, что позволяло получать внутриреакторные данные о состоянии топлива. В ходе эксперимента было отмечено, что уплотнение происходило только в топливе UO_2 , тогда как измерения удлинения топливного столба в твэгах демонстрировали постоянное распухание с увеличением выгорания [7].

Основной задачей эксперимента IFA-676 [8] было изучение поведения топлива ВВЭР-1000 с увеличенным размером зерна ~ 26 мкм по сравнению с поведением топлива со стандартным зерном ~ 11 мкм, а также по сравнению с поведением уран-гадолиниевого топлива. Расположение твэлов в сборке IFA-676 представлено на рис. 3.

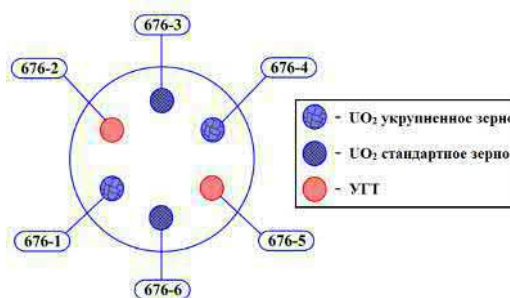


Рис. 3. Расположение твэлов в сборке IFA-676

В эксперименте IFA-681 [8] проводились сравнительные исследования топлива UO_2 и уран-гадолиниевого топлива с различным содержанием оксида гадолия.

Практически все исследования показали, что уран-гадолиниевое топливо уплотняется в значительно меньшей степени, чем диоксид урана, либо не уплотняется совсем.

Однако, как будет показано ниже, анализ данных внутриреакторных измерений позволяет выделить вклад уплотнения в размерные изменения УГТ и построить физическую модель уплотнения, которая удовлетворительно описывает экспериментальные данные по реакторному уплотнению как UO_2 , так и УГТ, и МОКС-топлива.

Обозначения экспериментальных твэлов и твэгов далее будут использоваться в соответствии с обозначениями, принятыми в Институте Энерготехнологии (IFE, Норвегия). Например, IFA-676-1 означает «твэл №1 сборки IFA-676».

В таблице 1 приведены основные параметры твэлов и твэгов исследуемых сборок.

Таблица 1.

Основные параметры твэлов и твэгов, оснащенных датчиком удлинения топливного столба

Обозначение твэла/твэга	Содержание Gd ₂ O ₃ , мас. %	Размер зерна, мкм	Тип распределения пор	Пористость топлива*, %
IFA-503-17	0	11,0	бимодальное	3,90
IFA-636-5	0	13,0	мономодальное	3,90
IFA-636-6	8	6,0	мономодальное	2,10
IFA-676-1	0	26,0	мономодальное	4,20
IFA-676-2	5	12,8	мономодальное	2,05
IFA-676-3	0	10,7	мономодальное	4,20
IFA-676-4	0	26,0	мономодальное	4,20
IFA-676-5	5	12,8	мономодальное	2,05
IFA-681-1	0	10,9	мономодальное	4,50
IFA-681-2	2	7,3	мономодальное	3,07
IFA-681-3	8	8,4	мономодальное	2,10

*пористость пересчитана с учетом зависимости теоретической плотности УГТ от содержания Gd₂O₃

Для исследования размерных изменений топливного столба (ТС) на начальных стадиях облучения были обработаны показания датчиков удлинения ТС.

Удлинение ТС твэла IFA-676-1 и твэга IFA-676-2 представлено на рис. 4.

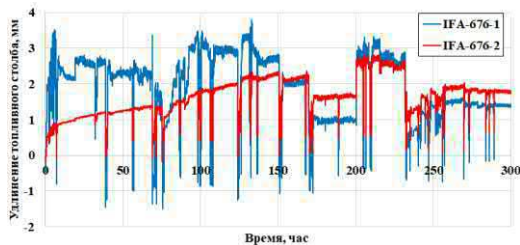


Рис. 4. Удлинение ТС твэла IFA-676-1 и твэга IFA-676-2

Для дальнейшего анализа данные по удлинению ТС были пересчитаны в относительное изменение объема, пример приведен на рис. 5.

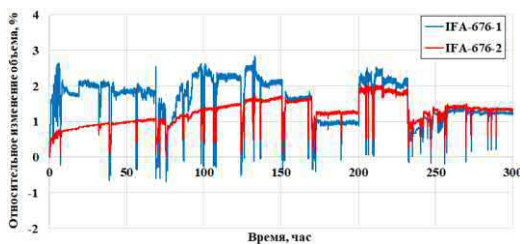


Рис. 5. Относительное изменение объема ТС твэла IFA-676-1 и твэга IFA-676-2

Для пересчета удлинения ТС в изменение объема использовалось предположение об изотропности топлива [9]. Расчет проведен по формуле (1):

$$\frac{\Delta V}{V_{all}} = 3 \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta V}{V_{all}}$ - относительное изменение объема топлива,
%; ΔL – приращение длины ТС, мм;
 L – длина топливного столба, мм.

Корректность пересчета проверена по данным о температуре топлива (показания ТЭП) и данным о температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) UO₂ и УГТ [10]. В случае, если бы коэффициент пересчета в формуле (1) составлял не 3, а 2, как рекомендует US NRC [11], размерные изменения не согласовались бы с температурным расширением топлива. Например, при выгорании 0,01 МВт-сут/кгU и температуре 805°C температурное расширение составляет 2,35% [10], вычисленное значение по формуле (1) составляет 2,43%, а в случае множителя «2» - 1,62%.

Размерные изменения, полученные по формуле (1), следует разделять на обратимые и необратимые (2):

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{all}}} = \frac{\Delta V}{V_{\text{te}}} + \frac{\Delta V}{V_{\text{size}}}, \quad (2)$$

где $\frac{\Delta V}{V_{\text{te}}}$ – термическое объемное расширение, %; $\frac{\Delta V}{V_{\text{size}}}$ – необратимые размерные изменения (уплотнение и распухание), %.

При работе на мощности температурное поле по радиусу таблетки имеет форму, близкую к параболической, что приводит к неравномерному расширению топлива. Для исключения влияния термического расширения из всего набора данных по изменению объема были выбраны данные в режиме «горячего ожидания» реактора (Hot Standby, далее HSB).

HSB - режим реактора, при котором топливо находится в активной зоне при постоянной температуре во время остановов реактора, обусловленных перегрузками экспериментальных сборок, проведением краткосрочных реакторных экспериментов в петлях реактора и плано-предупредительными работами. При этом энерговыделение в топливе практически отсутствует и температурный профиль по радиусу таблетки можно считать равномерным, а температуру, равной температуре теплоносителя.

Температура теплоносителя в режиме HSB в активной зоне реактора Halden составляет 235 °С, а в петлевом канале сборки IFA-676 – 100 °С. Далее из данных по изменению объема топлива в режиме HSB для каждой исследуемой сборки было вычтено соответствующее температурное расширение. Таким образом был получен набор данных по необратимому изменению объема топлива при комнатной температуре с равномерным температурным профилем по радиусу таблетки. Эти данные были в дальнейшем использованы для верификации модели радиационно-термического уплотнения оксидного ядерного топлива.

МОДЕЛЬ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО УПЛОТНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

При исследовании размерных изменений оксидного ядерного топлива предполагалось, что необратимые размерные изменения являются следствием двух конкурирующих процессов: распухания и уплотнения топлива (3):

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{size}}} = \frac{\Delta V}{V_{\text{sw}}} + \frac{\Delta V}{V_d}, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta V}{V_{\text{sw}}}$ – твердотельное распухание топлива, %; $\frac{\Delta V}{V_d}$ – радиационно-термическое уплотнение топлива, %.

Зависимость твердотельного распухания топлива принята линейной, зависящей только от выгорания (4):

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{sw}}} = k \cdot \text{Bu}, \quad (4)$$

где k – скорость распухания топлива, % / (МВт·сут/кгU);

Bu – выгорание топлива, МВт·сут/кгU.

Для описания радиационно-термического уплотнения топлива использована экспоненциальная зависимость (5):

$$\frac{\Delta V}{V_d} = d \cdot (e^{-\frac{\text{Bu}}{\text{Bu}_d}} - 1), \quad (5)$$

где $\frac{\Delta V}{V_d}$ – относительное изменение объема топлива за счет уплотнения, %; d – величина уплотнения топлива, %; Bu – выгорание топлива, МВт·сут/кгU; Bu_d – значение выгорания, при котором происходит основной вклад в уплотнение топлива (знаменатель в показателе экспоненты), МВт·сут/кгU.

Характерный вид размерных изменений оксидного ядерного топлива в соответствии с выражениями (4) и (5) представлен на рис. 6

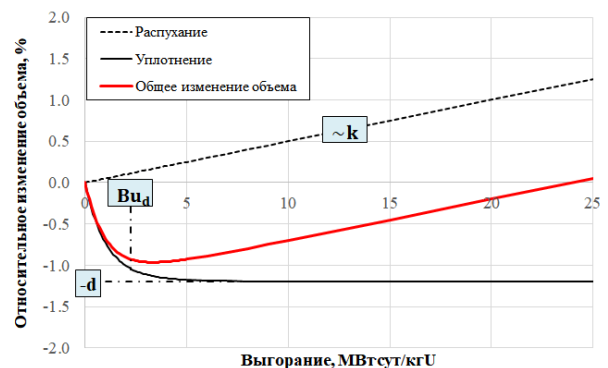


Рис. 6. Характерный вид размерных изменений топлива

Дальнейшее преобразование данных с помощью методов линейной регрессии заключалось в разделении относительного изменения объема топлива на изменение от распухания

и изменение от уплотнения. Пример такого разделения для твэла IFA-676-1 приведен на рис. 7.

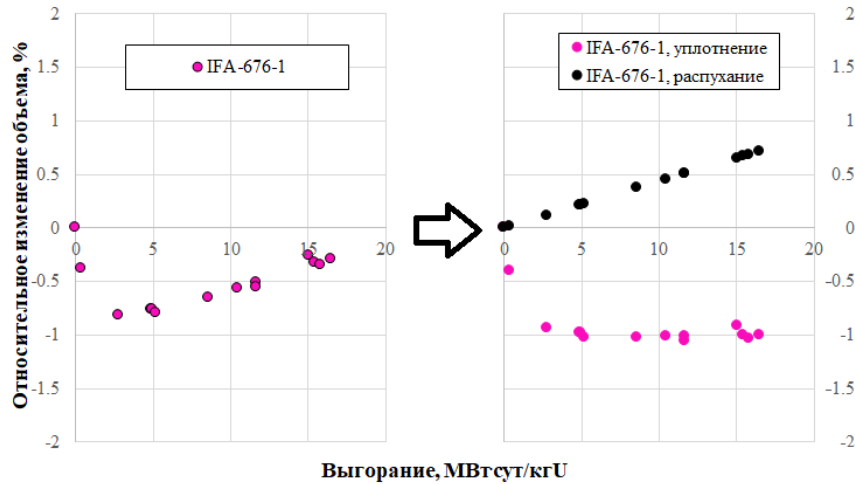


Рис. 7. Разделение данных о размерных изменениях топлива на распухание и уплотнение

Для дальнейшего анализа данных и построения модели размерных изменений топлива все данные были упорядочены в зависимости от относительной плотности топлива в долях теоретической, для чего по экспериментальным данным [12] была построена зависимость теоретической плотности УГТ от содержания оксида гадолиния (6):

$$\rho_{th}(Gd) = 10,96 - Gd \cdot 0,0378, \quad (6)$$

где ρ_{th} – теоретическая плотность УГТ, г/см³; Gd – содержание оксида гадолиния, масс. %; 10,96 – теоретическая плотность UO₂, г/см³.

Плотность в долях теоретической вычисляется по формуле (7):

$$\rho = 100 \cdot \frac{\rho_{th} - \rho_{fact}}{\rho_{th}}, \quad (7)$$

где ρ – плотность топлива в долях теоретической, %; ρ_{fact} – фактическая плотность топлива, г/см³.

Для исследуемых твэлов и твэгов был определен коэффициент распухания топлива на единицу выгорания в зависимости от плотности топлива, результат представлен на рис. 8. Средняя скорость распухания топлива на единицу выгорания составила $k = 0,04 \pm 0,01$ %/(МВт·сут/кгU).

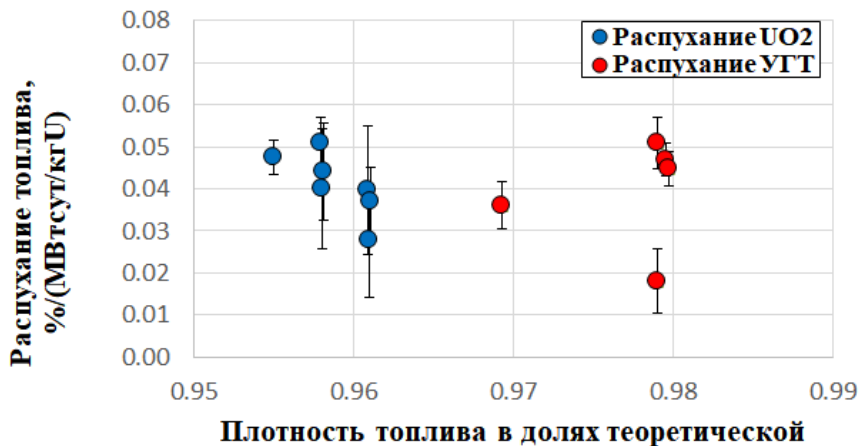


Рис. 8. Твердотельное распухание твэлов и твэгов на единицу выгорания

Дальнейший анализ экспериментальных данных по изменению объема топлива был направлен на разработку модели уплотнения топлива. Основной вклад в радиационное уплотнение вносят поры малых размеров. Большинство исследователей используют термин «субмикронные поры», однако деление пор по размеру на меньше или больше именно 1 мкм является условным и скорее связано с экспериментальными возможностями по определению количества и размера пор в исследуемых образцах. В данной работе автор пришел к выводу, что размер пор, влияющих на радиационное уплотнение (уплотняемые поры), составляет ~2,5 мкм, аналогичный результат был получен в работе [13].

Для определения явного вида модели уплотнения требуется более подробно рассмотреть распределение пористости в топливе.

На рис. 9 представлено мономодальное распределение пор по размерам, характерное для производства топлива ВВЭР [14], а также бимодальное распределение пор по размерам, полученное при исследовании экспериментальных таблеток, изготовленных с применением порообразователя в сборке IFA-503 [15].

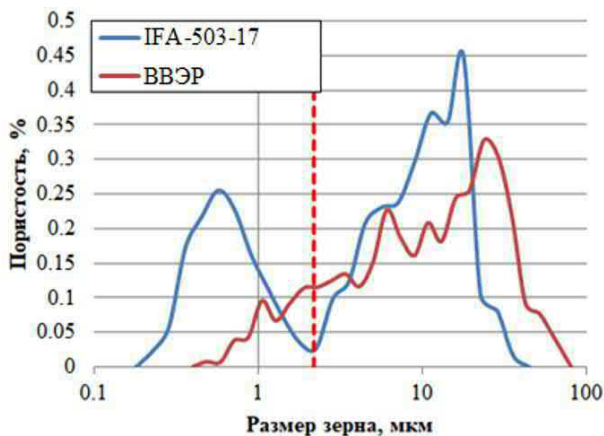


Рис. 9. Распределение пористости по размерам

На рис. 9 поры, которые участвуют в радиационном уплотнении топлива, находятся слева от красной пунктирной линии, соответствующей размеру поры 2,5 мкм.

При построении модели необходимо было количественно оценить объем, приходящийся на уплотняемые поры, для этого были проанализированы данные по субмикронной пористости топлива ВВЭР. Анализ открытых источников [14], [16] показал наличие корреляции между субмикронными порами и плотностью топлива в долях теоретической (рис. 10).

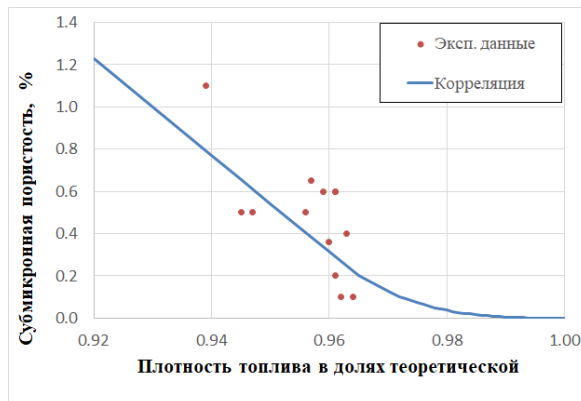


Рис. 10. Субмикронная пористость в зависимости от плотности топлива

С учетом обнаруженной корреляции и предположения о том, что форма распределения пор по размерам для топлива ВВЭР стандартной технологии сохраняется и является мономодальной, была получена зависимость «радиационно-уплотняемой» пористости (размер менее 2,5 мкм) от плотности топлива (8):

$$P_d = \begin{cases} a_1 \cdot (100 - \rho)^3, & \text{при } \rho \geq 96,5 \\ a_2 - a_3 \cdot \rho, & \text{при } \rho < 96,5 \end{cases} \quad (8)$$

где P_d — объем уплотняемых пор, %; $a_1=1,469 \cdot 10^{-2}$; $a_2=70,1095$; $a_3=0,7199$.

Значения величины реакторного уплотнения твэлов и твэгов сборок IFA-636, IFA-676, IFA-681 с мономодальным распределением пор и объем уплотняемых пор, рассчитанный по формуле (8), в зависимости от плотности топлива представлены на рис. 11.

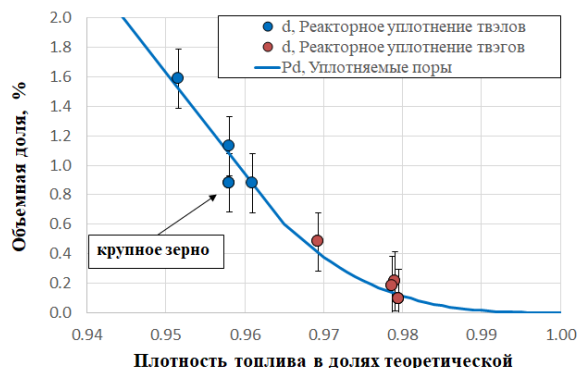


Рис. 11. Максимальное реакторное уплотнение в зависимости от плотности топлива

Из рис. 11 видно удовлетворительное совпадение между объемом уплотняемых пор, рассчитанным по формуле (8), и максимальной величиной реакторного уплотнения твэлов

и твэгов. Отклонение величины реакторного уплотнения от доли уплотняемых пор на рис. 11, по мнению автора, вызвано влиянием размера зерна топлива.

Анализ данных показал наличие корреляции между размером зерна в топливе и отклонением величины реакторного уплотнения d от объема уплотняемых пор P_d , рассчитанного по формуле (8). Графически корреляция представлена на рис. 12.

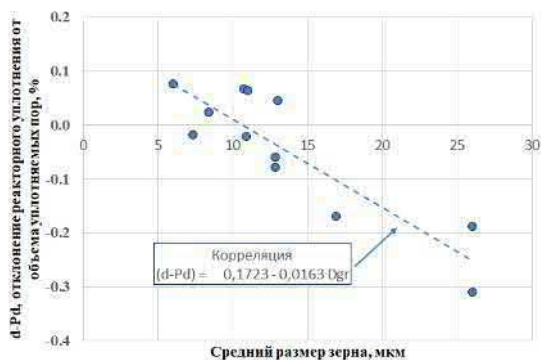


Рис. 12. Отклонение величины реакторного уплотнения d от объема уплотняемых пор P_d , в зависимости от размера зерна топлива

Вклад размера зерна в уплотнение топлива выражается следующей формулой (9):

$$P_{gr} = b_1 - b_2 \cdot D_{gr}, \quad (9)$$

где P_{gr} – вклад влияния размера зерна топлива в уплотнение, %; D_{gr} – размер зерна, мкм; $b_1=0,1723$; $b_2=0,0163$.

С учетом выражений (5) - (9) модель уплотнения принимает следующий вид (10):

$$\frac{\Delta V}{V_d} = (P_d + P_{gr}) \cdot \left(e^{-\frac{Vu}{Vu_d}} - 1 \right), \quad (10)$$

где $\frac{\Delta V}{V_d}$ – относительное изменение объема топлива за счет радиационно-термического уплотнения, %; Vu – выгорание топлива, МВт·сут/кгU; $Vu_d = 1$ МВт·сут/кгU.

На рис. 13 приведено сопоставление результатов расчета по формуле (10) и экспериментальных данных по размерному изменению топлива. Для бимодального распределения выражение (8) неприменимо, поэтому объем уплотняемых пор P_d был определен по экспериментальным данным [15]

(см. рис. 9). Для мономодального распределения объем уплотняемых пор P_d был рассчитан по формуле (8).

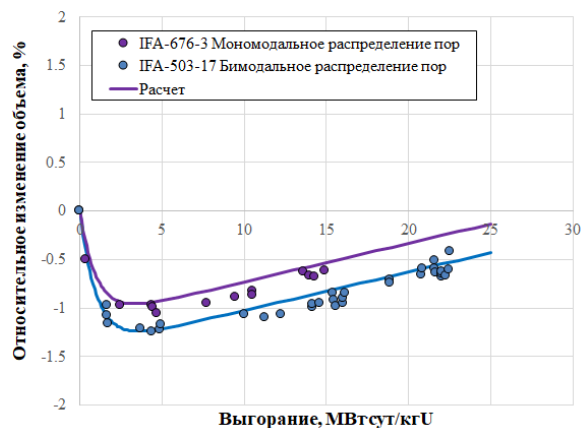


Рис. 13. Размерные изменения топлива с мономодальным (твэл IFA-676-3) и бимодальным (твэл IFA-503-17) распределением пористости

Как видно из рис. 13, вычисленные параметры пористости, использованные для расчета размерных изменений топлива, дают удовлетворительное совпадение с экспериментом как в случае мономодального, так и в случае бимодального распределения пор.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по размерным изменениям топлива UO_2 со стандартным (11 мкм) и укрупненным (26 мкм) размером зерна приведено на рис. 14.

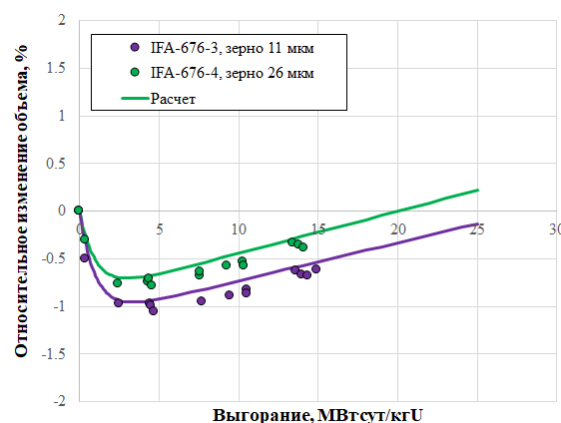


Рис. 14. Изменение объема топлива UO_2 с разным размером зерна

Из рис. 14 видно, что модель удовлетворительно описывает уплотнение топлива как с крупным, так и со стандартным размером

зерна. Следует отметить, что пониженное уплотнение топлива с крупным зерном по сравнению с топливом со стандартным зерном при равной плотности топлива может быть вызвано как дополнительным отжигом уплотняемых пор при изготовлении таблеток, так и со снижением суммарной поверхности зерен в топливе, или иными причинами. Данный аспект требует дополнительного исследования.

Данные для уран-гадолиниевого топлива с разным содержанием оксида гадолиния представлены на рис. 15.

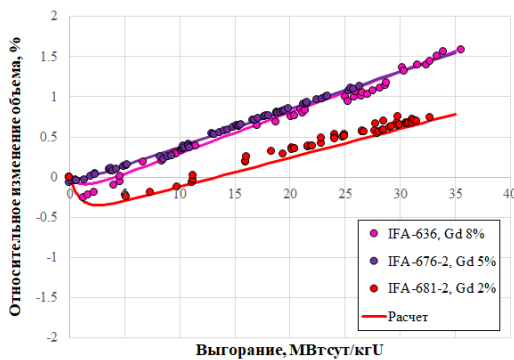


Рис. 15. Изменение объема УГТ с различным содержанием оксида гадолиния

Из рис. 14 и 15 видно, что уплотнение твэгов с содержанием 5% и 8% оксида гадолиния мало по сравнению с уплотнением UO_2 , в то время как уплотнение топлива с содержанием 2% оксида гадолиния более близко к уплотнению твэлов, что объясняется меньшим количеством уплотняемых пор в твэгах с более высокой плотностью относительно теоретической.

Модель радиационного уплотнения была верифицирована по данным для МОКС-топлива [17] (рис. 16). Для расчета теоретической плотности МОКС-топлива была использована следующая зависимость (11):

$$\rho_{th}(Pu) = 10,96 + 0,005 \cdot Pu, \quad (11)$$

где ρ_{th} – теоретическая плотность МОКС-топлива, г/см³; Pu – содержание оксида плутония, масс. %.

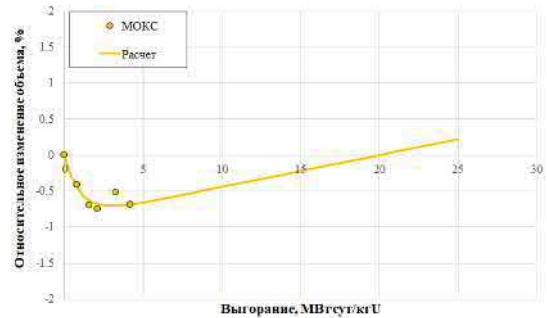


Рис. 16. Размерные изменения МОКС-топлива

Удовлетворительное совпадение расчетных данных с экспериментальными позволяет говорить о применимости модели к оксидному ядерному топливу, включая уран-гадолиниевое и уран-плутониевое топливо.

Верификация модели для разных видов топлива, проведенная по размерным изменениям, включающим уплотнение и распухание, представлена на рис. 17; статистические параметры верификации приведены в таблице 2

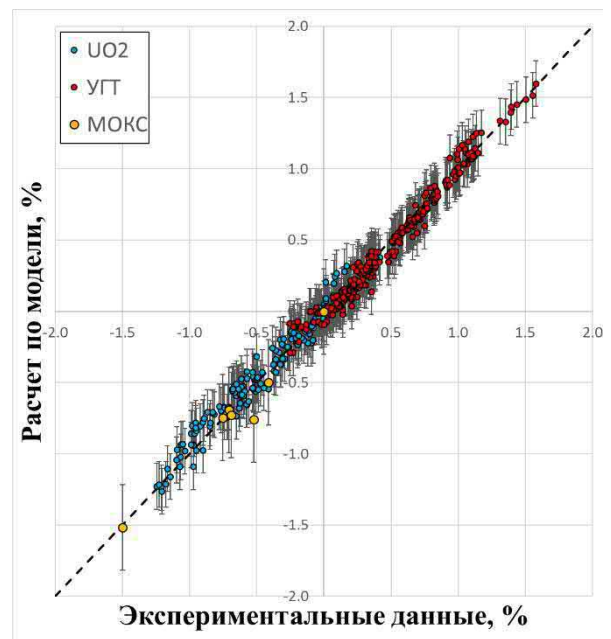


Рис. 17. Верификация модели размерных изменений оксидного ядерного топлива

Таблица 2.

Основные статистические параметры для верификации модели размерных изменений топлива.	
Параметр	Значение
Число точек UO_2 / УГТ / МОКС	176 / 296 / 6
Общее число точек	478
СКО, %	0,07
Критерий достоверности Пирсона для нормального распределения ошибки	0,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен анализ данных реакторных экспериментов, проведенных в исследовательском реакторе Halden. Систематизированы данные по размерному изменению топлива UO_2 и УГТ.

Определены параметры распухания топлива UO_2 и УГТ в экспериментах IFA-503, IFA-636, IFA-676, IFA-681: средняя скорость распухания топлива на единицу выгорания составила $k = 0,04 \pm 0,01 \%$ /(МВт-сут/кгU).

Показано, что основной вклад в реакторное уплотнение топлива вносят мелкие поры размером менее 2,5 мкм. Разработана корреляционная зависимость для объема уплотняемых пор в зависимости от плотности топлива. Также выявлено влияние размера зерна топлива на величину реакторного уплотнения.

Разработана и верифицирована модель реакторного уплотнения топлива для ВВЭР, включая UO_2 , УГТ и МОКС-топливо.

Одним из достоинств модели является использование в качестве входных данных ограниченного набора параметров:

- плотность топлива;

- средний размер зерна топлива;
- содержание оксида гадолиния или плутония.

Таким образом, получена простая в применении модель реакторного уплотнения российского топлива для ВВЭР, которая не требует дополнительных входных данных, кроме представленных в паспорте на партию топлива. Модель в дифференциальном виде легко имплементируется в расчетные коды.

Областью применения модели является топливо ВВЭР высокой плотности (выше 0,94 теоретической плотности) с мономодальным распределением пористости, однако при известном распределении пор по размерам модель может быть применена и к нестандартному топливу.

Показано, что малое уплотнение уран-гадолиниевого топлива по сравнению с уплотнением диоксида урана объясняется меньшим количеством уплотняемых пор в твэгах из-за высокой плотности.

Модель верифицирована на широком наборе входных данных, получено удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demyanov P.G., Kuznetsov V.I., Novikov V.V. et al.: *UO_2 and UO_2 - Gd_2O_3 Fuel Rods of WER-1000 Size Change Modelling / International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Nesebar, Bulgaria, 15–21 сентября 2019 года, Prague, – Nesebar, Bulgaria: Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, 2020. P. 326-331. EDN SQHVBV.*
2. Yoo, J., Kim, J., Jang, Y., Jeon, K.: *Examination of the Irradiation Growth Behavior of Gd_2O_3 - UO_2 Fuel Rod in PWR, / Proceedings of Top Fuel Conference, Paris, 2009.*
3. Ernst D., Milisdörfer L.: *5 years of experience with TVEL fuel at NPP Temelín / Proceedings of the 11th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, vol. 1, 2015. P. 251-264.*
4. Демьянов П.Г.: *Радиационно-термическое уплотнение, релокация и распухание топлива (обзор) / Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2023. № 3(119). С. 160-179. EDN RWEVML.*
5. Волков Б.Ю., Рязанцев Е.П., Яковлев В.В. и др.: *Исследования поведения топлива ВВЭР и PWR, облученного в реакторе HBWR (Халден, Норвегия) / Атомная энергия. 2011. т. 111. вып. 6, с. 342—348.*
6. Волков Б.Ю., Висенак В., Яковлев В.В. и др.: *Исследование модифицированного топлива ВВЭР и типового PWR в реакторе HBWR (Норвегия) / Атомная Энергия. т. 113, вып. 3. 1985. С. 140-145.*
7. Tverbeg T., Volkov B., Kim J. C.: *Final Report on the UO_2 - Gd_2O_3 Fuel Performance Test in IFA-636 / Technical Report HWR-817. OECD Halden Reactor Project. Halden. Norway. 2005.*
8. Demyanov P. G., Novikov V.V., Kuznetsov V. I. et al.: *U-Gd Fuel Size Change Modelling in START-3A Fuel Performance Code / IAEA-TECDOC-1960. 2021. P. 292-300.*
9. Малыгин В.Б.: *Механические Свойства и Размерная Стабильность Топлива Энергетических Ядерных Реакторов / Диссертация на соискание ученой степени доктора наук. 1997. P. 210-219.*
10. *Characteristics and Use of Urania-Gadolinia Fuels, IAEA-TECDOC-844, IAEA, Vienna. 1996.*
11. *An acceptable model and related statistical methods for the analysis of fuel densification, Regulatory*

Guide 1.126. Rev. 2. U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2010. P. 10.

12. Федотов А.В., Михеев Е.Н., Лысиков А.В. и др.: Теоретическая и экспериментальная плотность соединений $(U,Gd)O_2$ и $(U,Er)O_2$ / Атомная Энергия. т.113. вып. 6. 2012. с. 344-347.

13. Малыгин В.Б., Расчетно-Экспериментальные Исследования Радиационного Уплотнения Диоксида Урана / Инженерная Физика. №2. 1999. С. 20-22.

14. Михеев Е.Н., Федотов А.В., Рысеев Н.М. и др.: Реакторные ползучесть и доспекаемость крупнозернистого топлива UO_2 / Ядерная Физика и Инжиниринг. 2023. том 14. № 5. С. 419–433.

15. Волков Б.Ю., Йенсен Х. и др.: Исследование влияния структурно-технологических параметров на терморадикационную стабильность топлива ВВЭР и PWR / Атомная Энергия. т.114. вып. 6. 2013. С. 325-331.

16. Бахтеев О.А., Лысиков А.В., Дегтярев Н.А.: Разработка методики измерения распределения пор в объеме топливных таблеток из диоксида урана / Вестник Томского Государственного Университета. Математика и Механика №2 (34). 2015. С. 52-60.

17. Caillot L., Malgouyres P.P., Souchon F. et al: Thermal and in-pile densification of MOX fuels: Some recent results / IAEA-TECDOC-941. 1997. P.363-372.

Сведения об авторе:

Демьянов П.Г. – руководитель группы экспериментальной поддержки технических проектов.
PGDemyanov@bochvar.ru

Научно-исследовательский конструкторско-технологический отдел разработки твэлов с урановым топливом тепловых реакторов.

Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»

Поступила в редакцию / Received 16.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.06.2025

Принята к публикации / Accepted 20.06.2025