

# МОДЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ ПОД ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Боков А.А.<sup>1,2</sup>, Павлов С.В.<sup>2</sup>, Ильин П.А.<sup>1</sup>, Теплов В.Г.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> АО «ГНЦ НИИАР»

433510, Ульяновская обл., г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9

<sup>2</sup> ДИТИ НИЯУ МИФИ

433511, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, д. 294



В работе обобщены и проанализированы данные результатов послереакторных исследований давления и состава газов под оболочкой более чем 300 твэлов ВВЭР-1000 различного конструктивного исполнения из состава 26-ти тепловыделяющих сборок, эксплуатировавшихся на различных АЭС. По конструктивному исполнению (диаметр топливной таблетки и центрального отверстия в ней, толщина стенки оболочки) все твэлы разделены на три группы. Выгорание топлива в исследованных твэлах находится в диапазоне от 16 до 72 МВт·сут/кгU. Показано, что для каждой группы твэлов давление газа под оболочкой увеличивается с ростом выгорания топлива и в исследованном диапазоне выгораний хорошо аппроксимируется линейными зависимостями. Скорость увеличения давления для твэлов с утоненной оболочкой и топливной таблеткой диаметром 7,8 мм без центрального отверстия (первая группа твэлов) больше, чем для твэлов со штатной оболочкой и с таблетками, имеющими центральное отверстие (вторая и третья группы твэлов). Разработана феноменологическая модель давления газа под оболочкой твэлов после их эксплуатации. В основу модели положены закон Дальтона для смеси газов и эмпирические зависимости изменения свободного объема твэлов и количества криптона и ксенона под оболочкой твэлов от выгорания топлива. Показано, что для каждой группы твэлов количество газообразных продуктов деления ядерного топлива (ксенон и криптон), вышедших под оболочку, хорошо описывается соответствующей конкретной группе твэлов степенной функцией от выгорания топлива. Расчеты давления газа по феноменологической модели показали, что для каждой группы твэлов начиная с выгорания ~ 55 МВт·сут/кгU скорость роста давления в них начинает увеличиваться при повышении выгорания. Для экспериментального подтверждения этого эффекта необходимо провести дополнительные исследования твэлов с повышенным выгоранием топлива. Разработанная феноменологическая модель может быть использована для верификации расчетных кодов, описывающих поведение твэлов ВВЭР-1000 при штатной эксплуатации в реакторе и при длительном «мокром» и «сухом» хранении отработавших ТВС.

**Ключевые слова:** тепловыделяющий элемент, выгорание, ядерное топливо, водо-водяной энергетический реактор, давление газа, модель.

**Для цитирования:** Боков А.А., Павлов С.В., Ильин П.А., Теплов В.Г. Модель давления газов под оболочкой твэлов ВВЭР-1000 после эксплуатации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 147 – 158. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.12>

### ВВЕДЕНИЕ

Давление газов под оболочкой является одним из параметров, который необходим для проведения расчетного обоснования прочности и работоспособности тепловыделяющего элемента [1]. В процессе эксплуатации твэла происходит изменение его внутреннего давления за счет действия двух факторов: изменения свободного объема твэла (объема свободного пространства) под действием процессов, приводящих к изменению геометрических параметров оболочки и топливного сердечника; выхода газообразных продуктов деления (ксенона и криптона) из топлива. Величина давления газов влияет на уровень механических напряжений в оболочке твэла [2]. От величины напряжений зависит интенсивность протекания таких процессов, как ползучесть, переориентация гидридов, замедленное гидридное растрескивание, коррозионное растрескивание под напряжением, которые влияют на геометрическую стабильность оболочки и могут приводить к её разрушению. Поэтому давление газов под оболочкой необходимо учитывать не только при штатной эксплуатации твэлов в ядерных реакторах, но и при обосновании поведения твэлов при длительном сухом хранении [3, 4]. Давление газов под оболочкой является одним из параметров, которые рассчитываются российскими и зарубежными расчетными кодами, описывающими поведение твэлов в различных режимах эксплуатации и при сухом хранении, такими как FRAPCON [5, 6], СТАРТ-3А [7] и TOPRA-2 [8, 9]. Верификация расчетных кодов проводится методом сопоставления результатов, полученных с использованием кода, с экспериментальными данными и моделями, описывающими экспериментальные данные [10, 11]. Поэтому обобщение и анализ экспериментальных данных по давлению газов под оболочкой твэлов является актуальной научно-технической задачей. Результаты расчетов изменения количества газов под оболочкой и их давления с применением расчетных кодов показывают значительное расхождение при высоких выгораниях топлива (больше 50 МВт·сут/кгU) [9, 12], что является следствием недостатка экспериментальных данных и затрудняет экстраполяцию результатов расчетов на более высокие выгорания. Целью данной работы являлось обобщение экспериментальных данных по определению давления газов под оболочкой твэлов ВВЭР-1000 различной конструкции после штатной эксплуатации и разработка феноменологической модели изменения давления газов от выгорания, позволяющей проводить экстраполяцию данных в сторону увеличения выгорания топлива.

Реализация поставленной цели осуществлялась путем решения следующих задач:

- установление взаимосвязи между давлением газов под оболочкой твэлов и выгоранием топлива;
- установление взаимосвязи накопления ксенона и криптона под оболочкой твэлов и выгоранием топлива;
- разработка феноменологической модели изменения давления газов под оболочкой с выгоранием топлива на основании зависимостей накопления ксенона и криптона под оболочкой от выгорания топлива и зависимости изменения свободного объема твэлов от выгорания, полученной в работе [13].

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами послереакторных исследований являлись твэлы ВВЭР-1000 после штатной эксплуатации, отработавшие в диапазоне выгораний от 16 до 72 МВт·сут/кгU на различных АЭС. По параметрам конструкции твэлов весь массив данных можно разделить на три группы [13]:

- твэлы с утонченной оболочкой (толщина 0,585 мм) и топливными таблетками наружного диаметра 7,8 мм без центрального отверстия;
- твэлы со штатной оболочкой (толщина 0,685 мм) и топливными таблетками наружного диаметра 7,6 мм и центральным отверстием диаметром 1,2 мм;
- твэлы со штатной оболочкой (толщина 0,685 мм) и топливными таблетками наружного диаметра 7,57 мм и центральным отверстием диаметром 1,4 – 1,5 мм.

Исходное давление газа-наполнителя (гелия) под оболочкой всех твэлов находилось в диапазоне от 1,8 до 2,3 МПа. Максимальная линейная мощность твэлов находилась в диапазоне от 160 до 300 Вт/см.

Определение давления газов под оболочкой в процессе послереакторных исследований проводилось методом прокола оболочки. Состав газовой среды определялся масс-спектрометрическим методом [14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты определения давления газов под оболочкой твэлов, отнесенного к исходному давлению, в зависимости от выгорания топлива представлены на рис. 1.

В представленном диапазоне экспериментальных данных давление газов под оболочкой твэлов всех трех групп увеличивается с выгоранием топлива. Наименьшая скорость увеличения давления наблюдается для твэлов третьей группы, наибольшая – для твэлов первой группы. Уменьшение толщины оболочки, исходного зазора между топливным сердечником и оболочкой, диаметра центрального отверстия (или отказ от него) приводит к более резкому увеличению давления с выгоранием топлива.

Аппроксимация данных, представленных на рис. 1, линейной функцией от выгорания является эмпирической инженерной моделью, т.е. есть обобщением результатов измерения давления в облученных твэлах ВВЭР-1000.

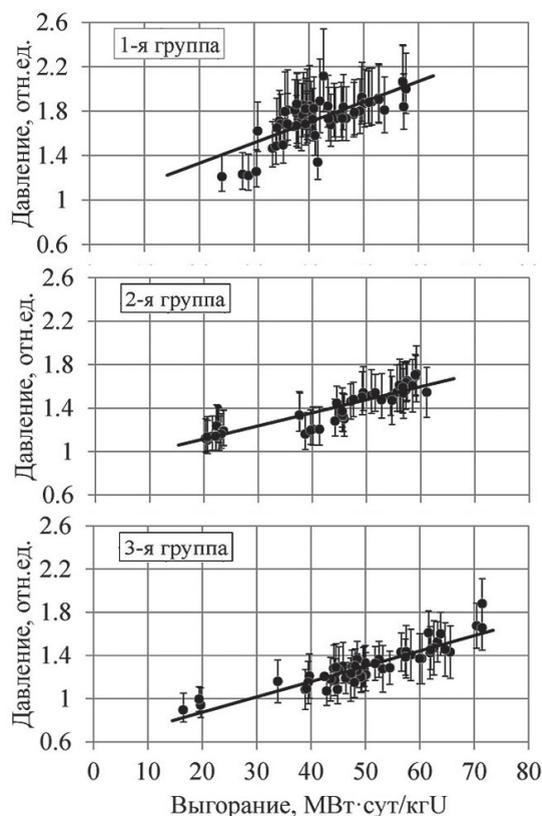


Рис. 1. Давление газов под оболочкой твэлов ВВЭР-1000 в зависимости от выгорания топлива

Но большинство реальных процессов и соответствующих им математических моделей нелинейны. В данном случае эмпирическая модель не рассматривает вклад отдельных механизмов, приводящих к изменению давления, таких как изменение свободного объема твэла и выход газообразных продуктов деления под оболочку. Для учета вкладов этих механизмов была разработана феноменологическая модель. Феноменологические модели описывают явление в наиболее общем виде (устанавливая основные закономерности), без использования модельных представлений о строении вещества и молекулярно-кинетическом механизме явления [15].

Согласно закону Дальтона, давление газовой смеси под оболочкой твэла можно представить в виде суммы парциальных давлений ее компонентов (ксенона, криптона и гелия). При допущении, что количество гелия в твэлах не изменяется с выгоранием (не учитывая накопление гелия в результате ядерных реакций), давление газов под оболочкой при температуре 273 К в зависимости от выгорания топлива можно представить в виде

$$P(B) = \frac{P_{н.у.}}{V_{св}(B)} (V_{н.у.}^{Kr}(B) + V_{н.у.}^{Xe}(B) + V_{н.у.}^{He}), \quad (1)$$

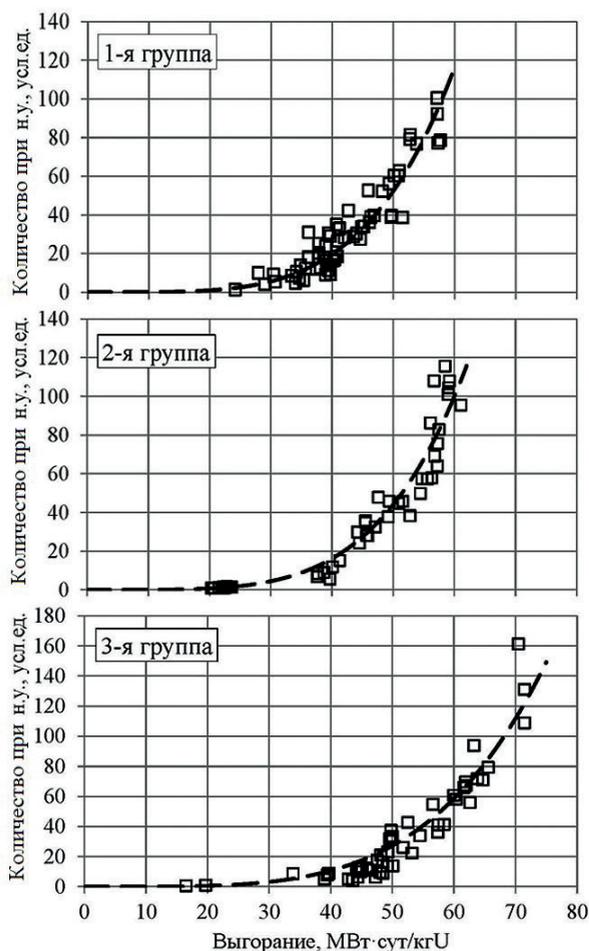


Рис. 2. Зависимость количества ксенона, вышедшего под оболочку, от выгорания топлива

где  $B$  – выгорание топлива, МВт·сут/кгU;  $V_{св}(B)$  – свободный объем твэла, см<sup>3</sup>;  $V_{н.у.}^{Kr}(B)$  и  $V_{н.у.}^{Xe}(B)$  – объемы при нормальных условиях (количество) криптона и ксенона, вышедших из топлива в свободный объем твэла, см<sup>3</sup>;  $P_{н.у.}$  – нормальное атмосферное давление, равное 101,325 кПа;  $V_{н.у.}^{He}$  – объем при нормальных условиях (количество) гелия под оболочкой твэла, см<sup>3</sup>.

Аналогичный подход применялся в работах [5, 16].

Зависимости количества ксенона и криптона в свободном объеме твэла от выгорания топлива, определенные по результатам прокола и масс-спектрометрического анализа состава внутритвэльного газа, представлены на рис. 2, 3. Погрешность определения количества криптона не превышала 0,7 усл. ед., ксенона – 7 усл. ед. Зависимости имеют нелинейный вид, при выгорании больше ~35 МВт·сут/кгU для всех групп твэлов наблюдается резкое увеличение количества вышедших газообразных

продуктов деления (ГПД). Полученные результаты согласуются с результатами анализа выхода ГПД из оксидного топлива, представленными в работах [17 – 20], в которых резкое увеличение выхода ГПД объясняется активизацией механизма термической диффузии и реструктуризацией периферийной зоны таблетки. При выгорании меньше ~35 МВт·сут/кгU выход газа происходит по атермическим механизмам отдачи и выбивания атомов с поверхности топлива.

Результаты, представленные на рис. 2, 3, хорошо аппроксимируются степенными функциями от выгорания. Тогда, формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$P(B) = \frac{P_{\text{н.у.}}}{V_{\text{св}}(B)} (a_1 B^{a_2} + x_1 B^{x_2} + V_{\text{н.у.}}^{\text{He}}), \quad (2)$$

где  $a_1, a_2$  – параметры степенной функции, характеризующие увеличение количества криптона под оболочкой с выгоранием;  $x_1, x_2$  – параметры степенной функции, характеризующие увеличение количества ксенона под оболочкой с выгоранием.

Для свободного объема в формуле (2) использовалась следующая аппроксимирующая формула, полученная по экспериментальным данным (отнесенным к исходному свободному объему твэлов первой группы), представленным на рис. 4 [13]:

$$V_{\text{св}}(B) = \begin{cases} k_1 B + b_1, & B \leq B_1, \\ k_2 B^2 + b_2 B + c, & B_1 < B < B_2, \\ k_3 B + b_3, & B \geq B_2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $V_{\text{св}}(B)$  – свободный объем твэла, отн. ед.;  $B_1$  – выгорание, при котором топливный сердечник начинает контактировать с оболочкой, МВт·сут/кгU;  $B_2$  – выгорание, при котором 95% топливного сердечника находится в контакте с оболочкой, МВт·сут/кгU;  $k_1, k_3$  (отн. ед./МВт·сут/кгU);  $k_2$  (отн. ед./МВт·сут/кгU)<sup>2</sup>;  $b_1, b_2, b_3$  (отн. ед.) – полиномиальные коэффициенты.

Результаты аппроксимации экспериментальных результатов определения давления внутри твэльного газа (отнесенные к исходному давлению) с помощью эмпирической и феноменологической моделей представлены

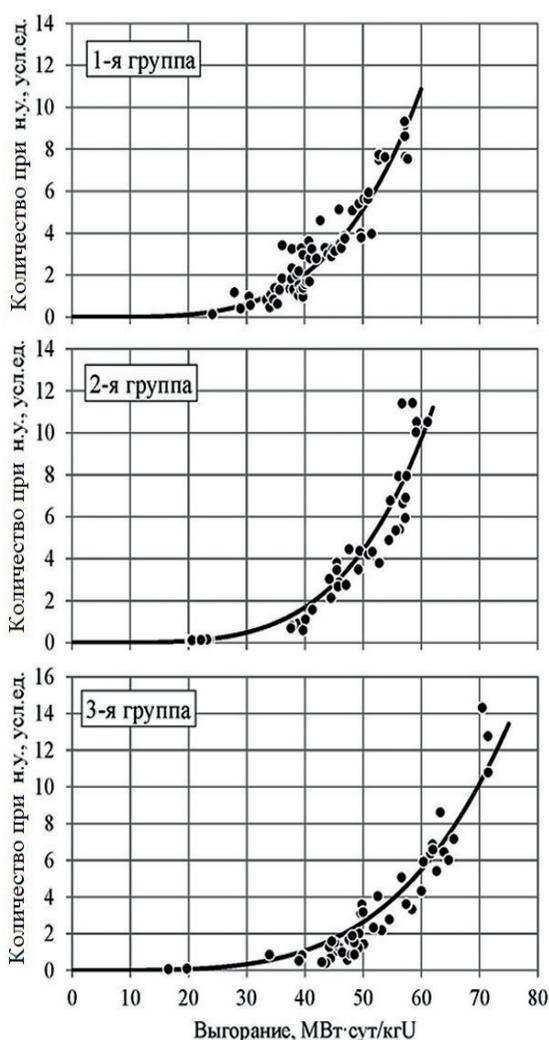


Рис. 3. Зависимость количества криптона, вышедшего под оболочку, от выгорания топлива

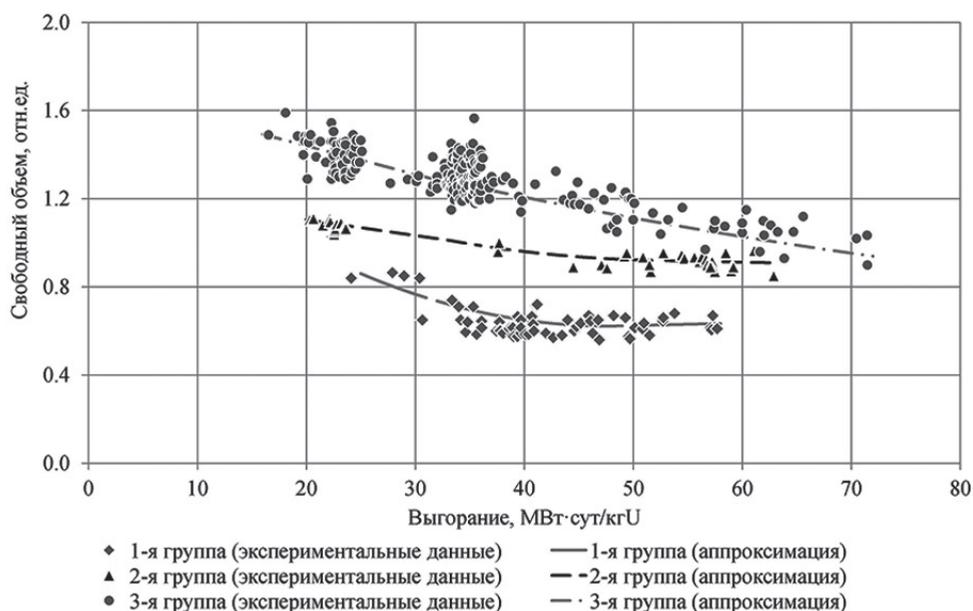


Рис. 4. Экспериментальные данные по изменению свободного объема твэлов от выгорания топлива, аппроксимированные формулой (3)[13]

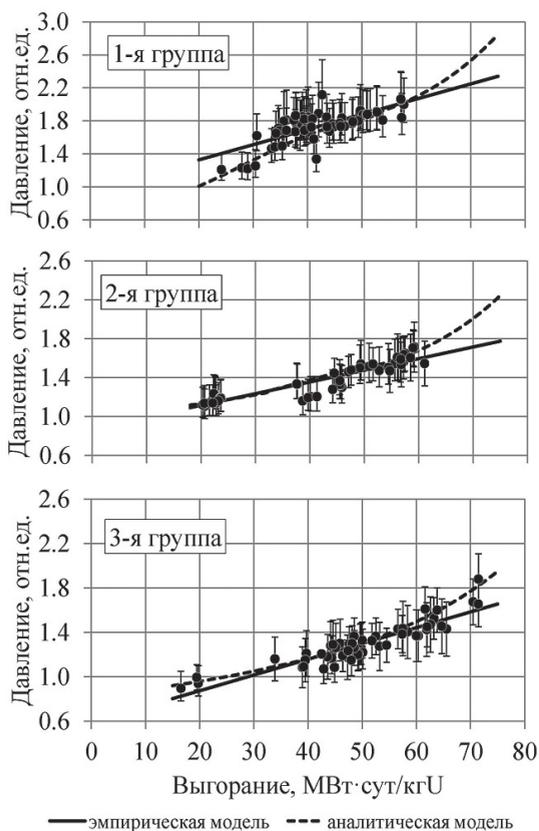


Рис. 5. Результаты аппроксимации экспериментальных данных с помощью эмпирической и феноменологической моделей

на рис. 5. Для первой группы твэлов наблюдается расхождение между эмпирической и феноменологической моделями в диапазоне выгораний от 25 до 40 МВт·сут/кгU. При выгораниях топлива от 40 до 60 МВт·сут/кгU результаты вычислений по обеим моделям хорошо согласуются.

Хорошую степень сходимости обе модели показывают для второй и третьей групп твэлов в диапазоне выгораний от 16 до 55 МВт·сут/кгU. Начиная с выгорания ~ 55 МВт·сут/кгU расхождение между моделями для всех трех групп твэлов увеличивается с ростом выгорания топлива. Это вызвано тем, что при незначительном изменении свободного объема при больших выгораниях топлива происходит резкое увеличение количества ксенона и криптона, вышедших под оболочку, зафиксированное по результатам масс-спектрометрического анализа газа.

Оценка качества аппроксимации экспериментальных данных с помо-

Таблица 1

### Значения критерия корреляции Пирсона для приведенных моделей

Модель	Первая группа	Вторая группа	Третья группа
Эмпирическая	0,73	0,92	0,90
Феноменологическая	0,77	0,92	0,93

стью приведенных моделей проводилась с использованием критерия корреляции Пирсона, значения которого представлены в табл. 1.

Как видно по данным, представленным в таблице, обе модели описывают экспериментальные данные почти с одинаковой адекватностью.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе приведены экспериментальные данные по давлению газов под оболочками твэлов ВВЭР-1000 различной конструкции, отработавших в диапазоне выгораний от 16 до 72 МВт·сут/кгU на различных АЭС. Экспериментальные данные были разбиты на группы по параметрам конструкции твэлов и описаны двумя моделями в зависимости от выгорания топлива: эмпирической (линейная зависимость) и феноменологической (основанной на законе Дальтона и учитывающей вклад отдельных механизмов изменения свободного объема твэлов и изменения количества ксенона и криптона под оболочкой).

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Давление газов под оболочками твэлов ВВЭР-1000 увеличивается с ростом выгорания топлива, причем скорость увеличения давления зависит от параметров конструкции твэлов. Наибольшая скорость увеличения давления наблюдается для твэлов с утоненной оболочкой и диаметром топливных таблеток 7,8 мм без центрального отверстия.

Количество газообразных продуктов деления (ксенона и криптона), вышедших под оболочку, хорошо описывается степенной функцией от выгорания топлива.

С использованием критерия корреляции Пирсона установлено, что обе модели описывают экспериментальные данные почти с одинаковой адекватностью.

Расхождение между эмпирической и феноменологической моделями начинает увеличиваться при выгорании топлива более ~ 55 МВт·сут/кгU, причем феноменологическая модель показывает более высокую скорость увеличения давления в твэлах с выгоранием. Для подтверждения этого эффекта необходимо большее количество экспериментальных данных по давлению в твэлах с высоким выгоранием.

Представленные экспериментальные данные приведены к температуре нормальных условий (273 К). Однако, используя эти данные и историю линейной мощности твэлов, можно оценить давление в твэлах при рабочей температуре. Поэтому полученные результаты могут быть использованы для верификации расчетных программ для ЭВМ, описывающих поведение твэлов ВВЭР-1000 как при штатной эксплуатации в реакторе, так и при длительном сухом хранении.

### Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов» (НП-094-15). Москва, 2016.
2. Фадин С.Ю., Мурашов В.Н., Яковлев В.В. Экспериментальное исследование давления в твэлах контейнерного типа с топливом из двуоксида урана. Препринт ИАЭ-4133/4. – Москва, 1985. – 15 с.
3. Плясов А.А. Механизмы деградации свойств оболочек твэлов тепловых реакторов в условиях сухого контейнерного хранения. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – № 4 (100). – С. 144–159. Электронный ресурс: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44630380\\_16352517.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44630380_16352517.pdf) (дата доступа 01.07.2023).
4. Лиханский В.В., Алиев Т.Н., Колесник М.Ю., Хоружий О.В., Зборовский В.Г., Евдокимов И.А., Сорокин А.А., Улыбышев К.Е., Гурович Б.А., Забусов О.О., Журко Д.А., Фролов А.С., Звир Е.А., Ильин П.А. Моделирование механических свойств твэльных оболочек для условий сухого хранения / Тезисы докладов XI конференции по реакторному материаловедению, посвященной 55-летию отделения реакторного материаловедения АО «ГНЦ НИИАР». – г. Димитровград, 2019. С. 93–94.
5. Bratton R.N., Jessee M.A., Wieselquist W.A. Rod Internal Pressure Quantification and Distribution Analysis Using FRAPCON. Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL/TM-2015/557. – 2015. – 61 p.
6. Feria F., Herranz L.E. Internal pressure of spent PWR fuel rod at high burnup: prediction enhancement through FRAPCON-3.5 uncertainty analysis. / Top Fuel conference proceeding, part 2. – 2015. – P. 194–203.
7. Demyanov P.G., Kuznetsov V.I., Novikov V.V., Zvir E.A., Zhitelev V.A. UO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fuel Rods of VVER-1000 Size Change Modeling / Proceedings of the 13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. – Nesebar, Bulgaria, 15–21 September 2019. – PP. 326–332.
8. Щеглов А.С. Разработка методик, моделей и инженерных программ расчета теплофизических параметров твэла ВВЭР. – Автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук. – М., 2008. – 27 с.
9. Пассаж Г., Стефанова С., Щеглов А.С., Проселков В.Н. Сопоставление результатов расчета и послереакторных исследований твэлов ВВЭР-1000 выгоранием 49 МВт·сут/кг. // Атомная энергия. – 2006. – Т. 101, – № 6. – С. 413–420.
10. Порядок проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии: утв. Приказом Ростехнадзора от 30.07.2018 № 325 (зарегистрирован в Минюсте России 12.11.2018 № 52650).
11. Богдан С.Н., Жылмаганбетов Н.М., Козлова Н.А., Понизов А.В., Шарафутдинов Р.Б., Шевченко Р.А., Шевченко С.А., Яшников Д.А. Актуальные вопросы экспертизы программ для электронных вычислительных машин, применяемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2022. – № 2 (104). – С. 31–49. DOI: <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2022.104.2.002>
12. Kileen J.C., Turnbull J.A., Sartori E. Fuel Modelling at Extended Burnup: IAEA Coordinated Research Project FUMEX-II. / Proceeding of the 2007 International LWR Fuel Performance Meeting. – San Francisco, California, September 30 – October 3, 2007. – Paper 1102.
13. Боков А.А., Павлов С.В., Теплов В.Г. Особенности изменения свободного объема твэлов ВВЭР-1000 в зависимости от выгорания топлива. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – Вып. 1. – С. 159–169. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2023/issue2023-1-159-169.pdf> (дата доступа 01.07.2023).

14. Пимонов Ю.И., Бульгин В.А., Дворецкий В.Г. Методические аспекты измерения количества и состава газа под оболочкой облученных твэлов. // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – 1998. – №1. – С. 37–41.

15. Гуров К.П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов (физические основы). М.: Изд-во «Наука», 1978. – 128 с.

16. Дмитриев Д.В., Гончар Н.И., Жилкин А.С. Моделирование выхода и распределения стабильных газообразных продуктов деления в герметичном твэле контейнерного типа. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 2. – С. 53–60. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2022/issue2022-2-53-60.pdf> (дата доступа 01.07.2023).

17. Struzik C., Garcia Ph., Noirot L. A comparative study of fission gas behaviour in UO<sub>2</sub> and MOX fuels using the meteor fuel performance code. / Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. – Cadarache, France, 2000. – PP. 511–522.

18. Noirot J., Desgranges L., Marimbeau P. Contribution of the RIM to the overall fission gas release: what do isotopic analyses reveal? / Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. – Cadarache, France, 2000. – PP. 223–234.

19. Bernard L.C., Jacoud J.L., Vesco P. FRAMATONE analysis of fission gas release and related topics. / Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. Cadarache, France, 2000. – P. 463–478.

20. Bibilashvili Yu.K., Medvedev A.V., Khvostov G.A., Bogatyr S.M., Korystine L.V. Development of the fission gas behaviour model in the START-3 code and its experimental support. / Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. Cadarache, France, 2000. – PP. 407–431.

Поступила в редакцию 08.07.2023

#### **Авторы**

Боков Артем Александрович, младший научный сотрудник,

E-mail: bokov\_artem@rambler.ru

Павлов Сергей Владленович, профессор, д.т.н.,

E-mail: pavlov@sosny.ru

Ильин Павел Александрович, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.,

E-mail: ilyinpavel74@yandex.ru

Теплов Вадим Геннадьевич, ведущий инженер

E-mail: Saurial@live.ru

UDC 621.039.548

**Model of Gas Pressure under the Cladding of WWER-1000 Fuel Rods after Operation****Bokov A.A.<sup>1,2</sup>, Pavlov S.V.<sup>2</sup>, Ilyin P.A.<sup>1</sup>, Teplov V.G.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> JSC «SSC RIAR»

9 Zapadnoye Sh., 433510 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg. Russia

<sup>2</sup> DETI MEPhI

294 Kujbysheva Str., 433511 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg. Russia

**Abstract**

The paper summarizes and analyses the results of post-irradiation examinations of under-cladding gas pressure and composition in more than 300 fuel rods of different designs from 26 fuel assemblies of the VVER-1000 reactors operated at different nuclear power plants. In their design (the diameter of the fuel pellet, its central hole, and the cladding wall thickness), all the fuel rods fall into three groups. The fuel burnup in the fuel rods under study varied from 16 to 72 MW·day/kgU. Each group showed a growth of gas pressure under cladding with an increase of the fuel burnup and was well approximated by linear dependencies within the burnup range considered. The pressure increase rate for the fuel rods with thinner cladding and a fuel pellet 7.8 mm in diameter without a central hole (group 1) was higher than for the fuel rods with standard cladding and pellets with a central hole (groups 2 and 3). A phenomenological model of under-cladding gas pressure in spent fuel rods was developed. The model's fundamental principle is Dalton's law for gas mixtures and empirical dependencies of changes in the free volume of the fuel rods and changes in the quantity of krypton and xenon under cladding on the fuel burnup. For each group of fuel rods, the quantity of gaseous fission products (xenon and krypton) released under the cladding was well described by the exponential burning-up function corresponding to the specific group of fuel rods. The gas pressure calculations by the phenomenological model showed that for each group of fuel rods the rate of pressure rise inside the fuel rods started to increase with a growth of burnup beginning from ~ 55 MW·day/kgU. An experimental verification of this phenomenon requires an additional study of the fuel rods with increased fuel burnup. The phenomenological model developed can be used for the verification of the computer codes describing the behavior of the VVER-1000 fuel rods during normal operation in the reactor and long-term «wet» and «dry» storage of spent fuel assemblies.

**Key words:** fuel rod, burnup, nuclear fuel, water-water power reactor, gas pressure, model.

**For citation:** Bokov A.A., Pavlov S.V., Ilyin P.A., Teplov V.G. Model of Gas Pressure under the Cladding of WWER-1000 Fuel Rods after Operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 147–158.

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.12> (in Russian).

**References**

1. *Federal norms and rules in the field of the use of atomic energy «Basic requirements for the justification of the strength and thermomechanical behavior of fuel assemblies and fuel elements in the core of power water reactors» (NP-094-15)*. Moscow, 2016 (in Russian).
2. Fadin S.Y., Murashov V.N., Yakovlev V.V. *Experimental study of pressure in fuel elements of container type with uranium dioxide fuel*. Preprint Institut atomnoj energii-4133/4. Moscow. 1985, 15 p. (in Russian).

3. Plyasov A.A. Mechanisms of water-cooled reactor cladding properties degradation during dry storage of spent nuclear fuel. *VANT. Ser. Materialovedenie i novye materialy*. 2019, iss. 4 (100), pp. 144 – 159. Available at: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44630380\\_16352517.pdf/](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44630380_16352517.pdf/) (accessed Jul. 01, 2023) (in Russian).
4. Likhanskii V.V., Aliev T.N., Kolesnik M.Yu., Khoruzhiy O.V., Zborovsky V.G., Evdokimov I.A., Sorokin A.A., Ulybyshev K.E., Gurovich B.A., Zabusov O.O., Zhurko D.A., Frolov A.S., Zvir E.A., Ilyin P.A. Modeling of fuel claddings mechanical properties under dry storage conditions. *XI conference on reactor material science, dedicated to the 55<sup>th</sup> Anniversary of the JSC SSC RIAR Material Testing Complex*. Dimitrovgrad, 2019, pp. 94 – 95.
5. Bratton R.N., Jessee M.A., Wieselquist W.A. *Rod Internal Pressure Quantification and Distribution Analysis Using FRAPCON*. Oak Ridge National Laboratory, Report No. ORNL/TM-2015/557, 2015, 61 p.
6. Feria F., Herranz L.E. Internal pressure of spent PWR fuel rod at high burnup: prediction enhancement through FRAPCON-3.5 uncertainty analysis. *Top Fuel conference proceeding, part 2*. 2015, pp. 194 – 203.
7. Demyanov P.G., Kuznetsov V.I., Novikov V.V., Zvir E.A., Zhitelev V.A. UO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fuel Rods of VVER-1000 Size Change Modeling. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Nesebar, Bulgaria. 15–21 September 2019*, pp. 326–332.
8. Shcheglov A.S. *Development of methods, models and engineering programs for calculating the thermophysical parameters of the WWER fuel element*. Cand. Sci. (Engineering) Diss. Abstr. Moscow, 2008, 27 p. (in Russian).
9. Passage G., Stefanova S., Shcheglov A.S., Proselkov V.N. Comparison of the results of calculations and post-reactor investigations of VVER-1000 fuel elements with burnup 49 MW·days/kg. *Atomic Energy*. 2006, vol. 101, iss. 6, pp. 869 – 875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0183-4>
10. *The procedure for conducting an examination of programs for electronic calculating machines used to build calculation models of processes that affect the safety of nuclear facilities and (or) types of activities in the field of nuclear energy use*. Rostekhnadzor, July 30, 2018, No. 325 (reg. with the Ministry of Justice of Russia on November 12, 2018 No. 52650) (in Russian).
11. Bogdan S.N., Zhylmaganbetov N.M., Kozlova N.A., Ponizov A.V., Sharafutdinov R.B., Shevchenko R.A., Shevchenko S.A., Yashnikov D.A. Current issues of review of computer codes used for safety analysis of nuclear facilities. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2022, iss 2 (104), pp. 31 – 49. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.104.2.002 (in Russian).
12. Kileen J.C., Turnbull J.A., Sartori E. Fuel Modelling at Extended Burnup: IAEA Coordinated Research Project FUMEX-II. *Proceeding of the 2007 International LWR Fuel Performance Meeting. San Francisco, California, September 30 – October 3, 2007*. Paper 1102.
13. Bokov A.A., Pavlov S.V., Teplov V.G. Features of changing of the free volume of WWER-1000 fuel rods depending on fuel burnup. *VANT. Ser. Yadernye i Reaktornye Konstanty*. 2023, iss. 1, pp. 159 – 169. Available at: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2023/issue2023-1-159-169.pdf/> (accessed Jul. 01, 2023) (in Russian).
14. Pimonov Yu.I., Bulygin V.A., Dvoretzky V.G. Methodological aspects of measuring the amount and composition of gas under the cladding of irradiated fuel elements. *Proceedings of JSC "SSC RIAR"*. 1998, no. 1, pp. 37 – 41 (in Russian).
15. Gurov K.P. *Phenomenological thermodynamics of irreversible processes (physical foundations)*. Moscow, Nauka Publ., 1978, 128 p. (in Russian).
16. Dmitriev D.V., Gonchar N.I., Jilkin A.S. Modeling of the yield and distribution of stable gaseous fission products in a sealed fuel rod of container type. *VANT. Ser. Yadernye i Reaktornye Konstanty*. 2022, iss. 2, pp. 53 – 60. Available at: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2022/issue2022-2-53-60.pdf/> (accessed Jul. 01, 2023) (in Russian).

17. Struzik C., Garcia Ph., Noirot L. A comparative study of fission gas behaviour in  $UO_2$  and MOX fuels using the meteor fuel performance code. *Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. Cadarache, France. 2000*, pp. 511 – 522.

18. Noirot J., Desgranges L., Marimbeau P. Contribution of the RIM to the overall fission gas release: what do isotopic analyses reveal? *Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. Cadarache, France. 2000*, pp. 223 – 234.

19. Bernard L.C., Jacoud J.L., Vesco P. Framatone analysis of fission gas release and related topics. *Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. Cadarache, France. 2000*, pp. 463 – 478.

20. Bibilashvili Yu.K., Medvedev A.V., Khvostov G.A., Bogatyr S.M., Korystine L.V. Development of the fission gas behaviour model in the START-3 code and its experimental support. *Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels Seminar Proceeding. Cadarache, France. 2000*, pp. 407 – 431.

### Authors

Artem A. Bokov, Junior Researcher,

E-mail: bokov\_artem@rambler.ru

Sergej V. Pavlov, Professor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: pavlov@sosny.ru

Pavel A. Ilyin, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: ilyinpavel74@yandex.ru

Vadim G. Teplov, Leading Engineer,

E-mail: Saurial@live.ru