

УДК 621.039.586

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ТВЕЛІВ У СТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

С. С. ЛИС

Національний університет "Львівська політехніка"

Встановлено, що за результатами розрахунків частини тепловидільної збірки активної зони реактора ВВЕР-1000 у стаціонарному режимі експлуатації можна оцінити механічний стан оболонок твелів, зрозуміти вплив методів керування реактором на міцність та проєктні критерії приймання. Наведено основні принципи визначення міцності механічних характеристик твелів з використанням коду СТАРТ-3. Наведено результати прогнозування механічних характеристик твелів ВВЕР-1000 чотирирічної кампанії у стаціонарному режимі за нормальних умов експлуатації та з їх порушенням. Виявлено, що максимальні напруження в оболонці становлять 60...80 МПа, що не може викликати розгерметизації твела.

Ключові слова: *міцність, напруження, реактор, твел, стаціонарний режим.*

The results of thermal calculations of the part of the fuel assembly of the active zone of the VVER-1000 reactor in the stationary mode of operation make it possible to evaluate the mechanical state of the fuel rods cladding, to understand the influence of reactor control methods on the strength and the design acceptance criteria. The main principles of the evaluation of mechanical characteristics of VVER-1000 fuel oil using the START-3 code are presented. The results of the prediction of the mechanical characteristics of the VVER-1000 fuel rods during the 4-year campaign in stationary mode under normal operating conditions and under their violation are illustrated. In the stationary mode of operation, the maximum values of stress in the fuel rod are in the range of 60...80 MPa, that cannot cause depressurization of the fuel rod.

Keywords: *strength, stresses, reactor, fuel rod, stationary mode.*

Вступ. Щоб обґрунтувати вибір палива, необхідно проаналізувати міцність твелів під час проєктних режимів експлуатації (стаціонарних та перехідних). У перехідних до стаціонарних умов механічного навантаження додаються змінні ефекти термомеханічної взаємодії з паливним сердечником [1]. Визначити механічний стан твелів – основне завдання під час моделювання їх поведінки та прогнозування роботи [2–5]. Оскільки більшість внутрішньотвельних процесів взаємопов'язані, то параметри механічного стану можна розрахувати тільки в межах загального коду [6].

Визначено [7–11] вплив насичення воднем на фізико-механічні характеристики окисдованих та азотованих оболонок твелів зі сплаву Zr–1% Nb. Встановлено, що приповерхневий шар, який утворюється в кисневих та азотовмісних газових середовищах, змінює їх міцність. Заздалегідь окиснені та азотовані, а далі насичені воднем оболонки руйнуються під час витримки у повітрі за кімнатної температури у діапазоні напружень 490...510 МПа, який у 10 разів вужчий, ніж для ненасичених, зруйнованих під напруженням 400...600 МПа.

Щоб дослідити, обґрунтувати та ліцензувати тепловидільні елементи ядерних енергетичних реакторів у стаціонарних та перехідних умовах експлуатації та

за їх порушення, використовують код СТАРТ-3 [1–4]. Зокрема, визначають параметри напружено-деформованого стану (НДС), необхідні для аналізу виконання критеріїв приймання, від яких залежить міцність твела. НДС, а отже, і міцність твела залежать від сукупності механічних і теплофізичних явищ, що відбуваються в ньому. Тому коди міцності повинні описувати в'язко-пружно-пластичну деформацію оболонки та паливного сердечника; анізотропію пластичних властивостей цирконієвих оболонок; радіаційне зростання та об'ємні зміни (якщо вони є) матеріалу оболонки; термічні деформації та напруження; корозійне розтріскування цирконієвої оболонки під напруженням; перебудову структури паливного сердечника; розпухання та радіаційне ущільнення палива; нестационарність полів температур; зміну властивостей матеріалів під опроміненням; процеси тріщиноутворення у паливі; явища релокації [1, 5, 6]. Всі ці моделі містить код СТАРТ-3 [2, 4].

У поздовжньому напрямі твел складається з низки ділянок (зазвичай 10–20) з усередненими значеннями стану, що відповідають серединному перерізу (рис. 1) [1].

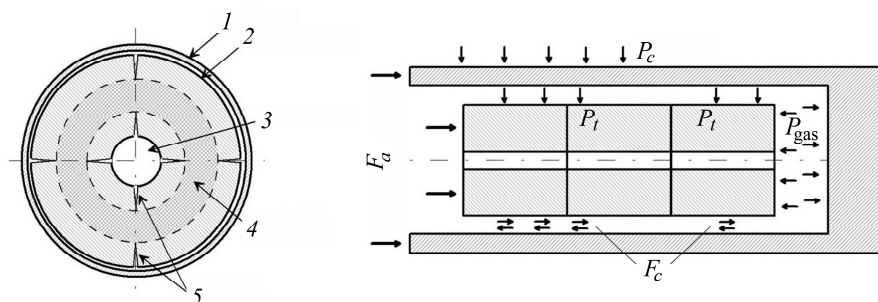


Рис. 1. Схема твела: 1 – оболонка; 2 – паливна таблетка; 3 – канал у таблетці; 4, 5 – незтріскана та тріскана паливні зони, відповідно.

Fig. 1. Scheme of a fuel rod: 1 – cladding; 2 – fuel pellet; 3 – pellet channel; 4, 5 – uncracked and cracked fuel area, respectively.

Розтріскані шари паливного сердечника вільні від колового напруження, але передають радіальне навантаження на оболонку за механічного контакту. Під час розрахунку таблетку та оболонку розбивають у радіальному напрямку на певну кількість вузлів. Оболонка навантажена зовнішнім тиском теплоносія, внутрішнім газовим і знаходиться під радіальним та осьовим механічним впливом паливного сердечника. Час експлуатації твела розбивають на дискретні кроки і визначають за приростами параметрів.

Результати розрахунків міцності та НДС у стаціонарних умовах експлуатації. Прогнозували механічні властивості твелів за нейтронно-фізичними характеристиками чотирирічного паливного циклу з завантаженням 48 тепловидільних збірок (ТВЗ), з яких 30 експлуатували три роки, а 18 – чотири. У цьому паливному циклі досягають таких значень вигорання: середнє за касетами, що вивантажують, 43,3 MW·d/kgU; максимальне за ТВЗ 45,8 MW·d/kgU; максимальне у твелі 54,0 MW·d/kgU; у таблетці твела 59,4 MW·d/kgU [1]. Тривалість кампанії з урахуванням роботи – 297–301 ефективних діб. Характеристики міцності твелів прогнозували за допомогою програмного комплексу СТАРТ-3 [2, 4]. У стаціонарному режимі експлуатації використали твели найбільш вигорілої ТВЗ з чотирирічним циклом опромінення. Щоб отримати повний спектр механічних параметрів у ТВЗ, досліджували твели № 312 та 255, розташовані ближче до центра активної зони з основним та профільним збагаченням, № 282 та 226 – найвіддаленіші від центра та твел № 6, розташований у центрі касети [1].

Розрахунок напружень в оболонках твелів. Досвід експлуатації тепловидільних елементів, а також розрахункові та експериментальні результати свід-

чать, що міцність оболонок у стаціонарних і перехідних режимах експлуатації залежить від колових розтягувальних напружень (рис. 2) [1].

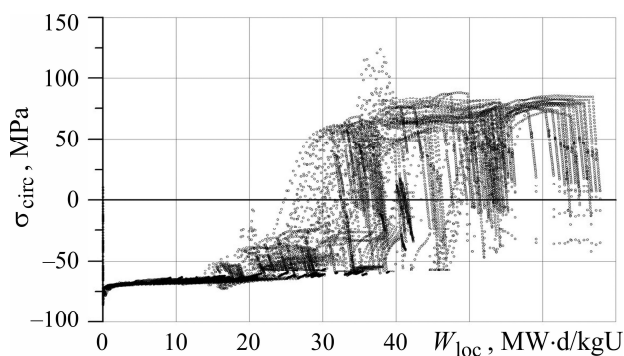


Рис. 2. Колові напруження на внутрішній поверхні оболонки твєлів ТВЗ за стаціонарних перевантажень.

Fig. 2. Circumferential stresses at the inner cladding surface of fuel rods of heat release assembly under stationary overloadings.

Виявили, що на початку кампанії колове напруження на внутрішній поверхні оболонки твєлів, в основному, визначають температурний градієнт та перепад зовнішнього тиску. Після закриття радіального зазору паливо спочатку м'яко контактує з оболонкою, а після закриття тріщин – жорсткіше, внаслідок чого колові напруження на внутрішній поверхні оболонки спочатку в центральних, а потім і в крайніх перерізах твєлів зростають [1]. Стаціонарний їх рівень досягається після вигорання $\sim 35 \text{ MW}\cdot\text{d/kgU}$ і становить $\sim 70\text{...}80 \text{ MPa}$. Сплески напружень тут викликані стрибками лінійного навантаження після перевантажень касет, що обумовлені перестановленням касет в енергонапруженіші осередки і роботою на потужнісному ефекті реактивності наприкінці попереднього циклу.

Максимальні колові напруження виникають у центральних перерізах твєла № 312 за виходу на потужність після навантаження на третій рік опромінення і дорівнюють 135 MPa . У розрахунках враховували вимоги, що обмежують підвищення швидкості роботи реакторної установки після перевантаження палива для функціонування реактора на потужнісному ефекті реактивності наприкінці попереднього циклу. Виявили, що досягнуті під час експлуатації розтягальні колові напруження в оболонці не призводять до зародження тріщин через корозійне розтріскування. Мінімальний коефіцієнт запасу цього критерію $K_{SC1} = 1,7$.

Розрахунок видовження оболонок твєлів. Рис. 3 ілюструє узагальнену картину розрахункового видовження твєлів касет стаціонарного циклу навантажень залежно від вигорання [1].

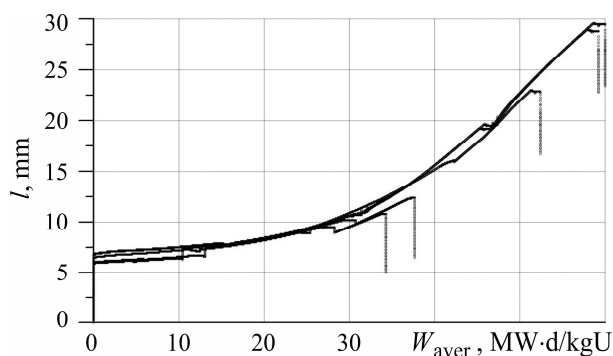


Рис. 3. Видовження оболонок твєлів залежно від вигорання.

Fig. 3. Fuel cladding elongation vs. burn-up.

Під час виведення реактора на потужність довжина твєлів збільшується внаслідок термічного розширення на $\sim 6,9 \text{ mm}$. Надалі (до вигорання $\sim 32 \text{ MW}\cdot\text{d/kgU}$) осеві деформації контролює радіаційне зростання оболонки [1]. З початком взаємодії з паливним осердям осеве деформування оболонки інтенсивніше. Макси-

мальне у розрахованому масиві твелів видовження оболонки у робочих умовах становить 29,7 mm (твел № 312). Якщо радіаційне зростання елементів каркаса ТВЗ відсутнє, мінімальний зазор в гарячому стані між верхніми заглушками твелів і верхньою головкою ТВЗ становить ~32,4 mm, що відповідає критерію граничного видовження твелів з коефіцієнтом запасу $K_{DC2} = 2,2$. У холодному стані максимальне їх видовження 23,1 mm, що відповідає значенню $K_{DC2} = 2,4$.

Розрахунок тривкості оболонок твелів. Він зводився до визначення овальності під дією тиску теплоносія та оцінки можливості миттєвого схлопування під час його підвищення в першому контурі. Розрахунки на тривкість для стаціонарного режиму роботи виконували для твела № 312 ТВЗ із максимальним вигорянням. Щоб отримати консервативні оцінки, передбачали відсутність газовиділення під час опромінення.

Рис. 4 ілюструє динаміку зміни овальності на довжині активної частини без урахування підкріплювального впливу сердечника та ділянки газозбірника. Реально овальність тут не може перевищити зазор паливо–оболонка в момент торкання оболонки та сердечника. Як бачимо, впродовж усієї кампанії тривкість оболонок як газозбірника, так і активної частини твела не втрачена, навіть без урахування підкріплюваного впливу паливного сердечника. Таким чином, конструкція твела є робочою за цим критерієм.

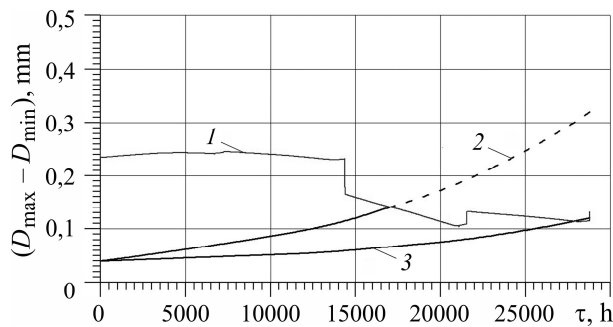


Рис. 4. Зміна овальності оболонки по довжині активної частини та на ділянці газозбірника твела: 1 – зазор між паливом та оболонкою; 2 – активна частина; 3 – газозбірник.

Суцільна лінія – динаміка зміни овальності оболонки до контакту з паливом.

Fig. 4. Variation in cladding ovality along active part and in the area of gas collector of the fuel rod: 1 – gap between the fuel and the cladding; 2 – active part; 3 – gas collector.

Solid line is dynamics of cladding ovality variation prior to contact with fuel.

Для оболонок твелів поряд із тривалим накопиченням деформацій повзучості існує небезпека миттєвого схлопування з досягненням критичного тиску. Тому розраховували коефіцієнт запасу за допустимим підвищенням тиску в першому контурі, а також максимальну овальність, коли можливе схлопування оболонки за розрахункового тиску теплоносія і можна обмежити її формозміну. Це має сенс для оцінки тривкості оболонки вигорілих твелів (які отримали овальність під час експлуатації) у режимах гідровипробувань на щільність за тиску в першому контурі 19,6 МПа, а на міцність – за тиску до 24,5 МПа при температурі води $\leq 130^\circ\text{C}$.

Розраховували за формулою Ейлера для ідеально круглої оболонки [1, 5, 6]

$$P_k = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^3,$$

де E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона; h – товщина оболонки; R – її радіус, так і за умовою неперевіщення границі текучості в навантаженішому пе-

перізі овальної оболонки (критерій “пластичного шарніра”). В останньому випадку критичний тиск виявився суттєво нижчим. Враховували зміну властивостей матеріалу внаслідок опромінення в реакторі (див. таблицю) [1].

Порівнянням виявили, що режими гідровипробувань на щільність і міцність не можуть викликати схлопування газозбірника твелів, бо овальність, спричинена деформаціями повзучості під час експлуатації, не перевищує критичних значень, наведених у таблиці.

Результати розрахунків на миттєве схлопування

Розрахунковий режим	Критичний тиск, МПа		Мінімальний коеф. запасу за тиском	Критична овальність за розрахункового тиску, mm
	за Ейлером	за $\sigma_{0,2}$		
Базовий	71	36	2,29	0,52
Гідровипробування: на щільність	84	46	2,35	0,30
на міцність	84	46	1,88	0,19

Таким чином, аналіз результатів розрахунків овалізації в умовах повзучості та миттєвого схлопування вказує, що конструкція твелів забезпечує дотримання критеріїв втрати тривкості оболонки. Мінімальний коефіцієнт запасу за цим параметром $K_{SC3} = 1,88$.

ВИСНОВКИ

Наведено основні принципи аналізу міцності твелів ВВЕР-1000 з використанням коду СТАРТ-3, за яким розраховано деформацію та напруження в оболонці, спрогнозовано механічні характеристики твелів ВВЕР-1000 чотирирічної кампанії у стаціонарному режимі за нормальних умов експлуатації та з їх порушенням. Виявлено, що у стаціонарному режимі максимальний рівень напружень в оболонці лежить у діапазоні 60...80 МПа, що за системою міцності критеріїв не може викликати розгерметизації твела як за механізмом короткочасного руйнування, так і за тривалою міцністю. Встановлено, що за використання регламентних алгоритмів керування виконуються міцнісні та деформаційні критерії приймання для твелів з достатніми за проектом паливної системи коефіцієнтами запасу.

1. *Preliminary report on validation of safety. Topical report. Computer calculation of fuel rods for strength under transient and steady-state operating conditions. Choice of design model, ascertainment of damage accumulation mechanism, validation of critical cladding state.* KK.UJA.JKA.TM.TR.PR027. 412-312-O-4. – 2001.
2. *The probabilistic method of WWER fuel rod strength estimation using the START-3 code / Yu. K. Bibilashvili, A. V. Medvedev, S. M. Bogatyr, F. F. Sokolov, and M. V. Khramtsov // Nuclear fuel behaviour modelling at high burnup and its experimental support. Proc. of a Technical Committee meeting held in Windermere, United Kingdom, 19–23 June. – 2001. – P. 339–348.*
3. *Rules and Standards of Nuclear and Radiation Safety. Requirements for Contents of Report to Validate Safety of NPP with VVER Type Reactors.* ПНАЭ Г-01-036-95.
4. *Programme Code Start-3. Registration No. 76 of 22.09.97 of Certificate.*
5. *Semerak M. M. and Lys S. S. Research the behaviour and properties of WWER type fuel claddings from Zr1%Nb alloy in loss of the coolant accident // Problems of Atomic Sci. and Tech. – Kharkiv, 2021. – № 2(132). – P. 80–86. <https://doi.org/10.46813/2021-132-080>*
6. *Lys S. and Kanyuka A. Analysis of fuel rod performance per cycle: Temperature field, FGP release, swelling // Thermal Sci. and Eng. Progress. – 2021. – 25. – Article number: 100961. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100961>*

7. *Influence of the functional layer on the operating characteristics of Zr–1% Nb alloy at a temperature of 380°C* / V. S. Trush, V. M. Fedirko, V. M. Voyevodin, A. G. Lukyanenko, P. I. Stoev, and V. A. Panov // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 2. – P. 234–239.
<https://doi.org/10.1007/s11003-021-00537-y>
8. *Influence of hydrogen on the properties of oxidized and nitrided Zr–1% Nb alloy* / V. S. Trush, P. I. Stoev, V. N. Fedirko, V. N. Voyevodin, M. A. Tykhonovskyi, V. A. Panov, and A. G. Lukyanenko // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 4. – P. 520–526.
<https://doi.org/10.1007/s11003-022-00573-2>
9. *Increasing turbine hall safety by using fire-resistant, hydrogen containing lubricant cooling liquid for rotor steel mechanical treatment* / A. I. Balitskii, M. R. Havrilyuk, V. O. Balitska, V. O. Kolesnikov, and L. M. Ivaskevych // *Energies*. – 2023. – **16**, № 1. – P. 535.
<https://doi.org/10.3390/en16010535>
10. *Hydrogen degradation of the pressure gas tanks materials after long-term service* / A. Balitskii, M. Semerak, V. Balitska, A. Subota, and O. Wus // *Solid State Phenomena*. – 2015. – **225**. – P. 39–44. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.225.39>
11. *Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminum coatings* / V. Pokhmurskii, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, and A. Wank // *J. Therm Spray Technol.* – 2007. – **16**, № 5. – P. 998–1004.
<https://doi.org/10.1007/s11666-007-9104-x>

Одержано 24.07.2023