

**С. М. Пелих<sup>1</sup>, М. В. Максимов<sup>1</sup>, С. Д. Рябчиков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Одеський національний політехнічний університет, Одеса*

<sup>2</sup> *Харківський фізико-технічний інститут, Харків*

### **АНАЛІЗ ПОШКОДЖУВАНOSTI ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ, ЩО ВРАХОВУЄ НЕОДНОРІДНІСТЬ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ В ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЗБІРКАХ**

Розроблено метод прогнозування розгерметизації оболонок твेलів реактора типу ВВЕР-1000 за механізмом накопичення деформаційної пошкоджуваності оболонок, що враховує для кожної тепловиділяючої збірки (ТВЗ) історію навантаження і неоднорідність розподілу енерговиділення серед твелів. При чотиригруповій моделі розподілу пошкоджуваності максимальна величина пошкоджуваності, що досягається в чотирирічному паливному циклі, збільшується в порівнянні з одногруповою моделлю приблизно у два рази. Знайдено алгоритм перестановок ТВЗ, для якого перевищуються гранична величина параметра пошкоджуваності і межа безпечної експлуатації реактора. Показано, що величина параметра пошкоджуваності відіграє істотну обмежуючу роль при оцінці граничного стану оболонок. Виведено умову допустимості алгоритму перестановок ТВЗ і критерій мінімальності ймовірності розгерметизації оболонок, які можна використовувати в автоматизованій системі забезпечення герметичності оболонок твелів ВВЕР-1000.

*Ключові слова:* ВВЕР-1000, оболонка твела, критерій мінімальності ймовірності розгерметизації оболонок.

**С. Н. Пелых<sup>1</sup>, М. В. Максимов<sup>1</sup>, С. Д. Рябчиков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Одесский национальный политехнический университет, Одесса*

<sup>2</sup> *Харьковский физико-технический институт, Харьков*

### **АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ**

Разработан метод прогнозирования разгерметизации оболочек твэлов реактора типа ВВЭР-1000 по механизму накопления деформационной поврежденности оболочек, учитывающий для каждой тепловыделяющей сборки (ТВС) историю нагружения и неоднородность распределения энерговыделения среди твэлов. При четырехгрупповой модели распределения поврежденности максимальная величина поврежденности, достигаемая в четырехлетнем топливном цикле, увеличивается по сравнению с одногрупповой моделью примерно в два раза. Найден алгоритм перестановок ТВС, для которого превышаются предельная величина параметра поврежденности и предел безопасной эксплуатации реактора. Показано, что величина параметра поврежденности играет существенную ограничивающую роль при оценке предельного состояния оболочек. Выведены условия допустимости алгоритма перестановок ТВС и критерий минимальности вероятности разгерметизации оболочек, которые можно использовать в автоматизированной системе обеспечения герметичности оболочек твэлов ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* ВВЭР-1000, оболочка твэла, критерий минимальности вероятности разгерметизации оболочек.

**S. N. Pelykh<sup>1</sup>, M. V. Maksimov<sup>1</sup>, S. D. Ryabchikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Odessa National Polytechnic University, Odessa*

<sup>2</sup> *Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov*

### **AN ANALYSIS OF THE FUEL ELEMENT CLADDING FAILURE PARAMETER CONSIDERING THE NONUNIFORMITY OF ENERGY RELEASE IN A FUEL ASSEMBLY**

Considering the fuel assembly (FA) load history and the nonuniformity of energy release for the fuel elements (FEs) contained in this FA, a method for forecasting of probability of VVER-1000 FE cladding failure due to FE cladding deformation damage accumulation, has been developed. In the case of four-group damage distribution model, the maximum value of damage parameter accumulated in a four-year fuel campaign is approximately two times greater compared with the one-group model. A FA rearrangement algorithm characterized by exceeding of the limiting value for cladding damage parameter and the safety margin for VVER-1000 operation, has been found. The thesis that the value of FE cladding damage parameter plays an important role in estimating the limit state of claddings, has been proved. The condition of FA rearrangement algorithm admissibility and the criterion of minimum cladding failure probability which can be used in a control system insuring the hermeticity of VVER-1000 FE claddings, have been derived.

*Keywords:* VVER-1000, fuel element cladding, criterion of minimum cladding failure probability.

## REFERENCES

1. *Popov V.V.* Development and improvement of the methods for calculation of the strength and reliability of NPP fuel rods: Thesis. Doctor of Sciences in Technology. - Obninsk, 2000. - 62 p. (Rus)
2. *Alexeyev E.E.* Development of the methods for calculation of the VVER fuel element workability using probabilistic and deterministic approaches: Thesis abstract. Candidate of Sciences in Technology. - Obninsk, 2008. - 31 p. (Rus)
3. *Nuclear fuel safety criteria technical review. Second edition // OECD NEA No. 7072.* - Issy-les-Moulineaux: Nuclear Energy Agency, 2012. - 83 p.
4. *Novikov V.V., Medvedev A.V., Bogatyr S.M.* Nuclear fuel operability assurance in maneuver regimes // Proc. of the Int. Ukrainian-Russian Conf. on Experience of the New VVER Fuel Operation, Khmel'nitskiy, Ukraine, 2005. - 22 p. (Rus)
5. *Sosnin O.V., Gorev B.V., Nikitenko A.F.* Energy Variant of the Theory of Creep. - Novosibirsk: The Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1986. - 95 p. (Rus)
6. *Kim J.H., Lee M.H., Choi B.K. et al.* Deformation behavior of Zircaloy-4 cladding under cyclic pressurization // Journal of Nuclear Science and Technology. - 2007. - Vol. 44. - P. 1275 - 1280.
7. *Pelykh S.N., Maksimov M.V.* Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit // Nuclear Engineering and Design. - 2011. - Vol. 241, No. 8. - P. 2956 - 2963.
8. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Baskakov V.E.* Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control // Annals of Nuclear Energy. - 2013. - Iss. 58. - P. 188 - 197.
9. *Suzuki M.* Modelling of light-water reactor fuel element behaviour in different loading regimes / Transl. from English by S. N. Pelykh. - Odessa: Astroprint, 2010. - 248 p. (Rus)
10. *Nuclear safety regulations for NPP reactor plants NP-082-07.* - Moskva: Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service, 2008. - 21 p. (Rus)
11. *Pelykh S.N.* Grounds of VVER fuel element behavior control. - Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. - 160 p. (Rus)
12. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Parks G.T.* A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup // Nuclear Engineering and Design. - 2013. - Vol. 257, No. 4. - P. 53 - 60.
13. *Shmelev V.D., Dragunov Y.G., Denisov V.P.* The VVER active cores for nuclear stations. - Moskva: Akademkniga, 2004. - 220 p. (Rus)
14. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Nikolsky M.V.* A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. - 2014. - Iss. 4. - P. 108 - 116.
15. *Patent. 100070, Ukraine, MPK G 21 C 7/00 / M. V. Maksimov, S. N. Pelykh, V. E. Baskakov, T. A. Tsiselskaya.* A method for control of the VVER nuclear power plant at changing the reactor power or external loading. - 2012. - Bul. No. 21/2012. (Ukr)
16. *Vorobyev R.Y.* Albums of neutron-physical characteristics of the reactor core, Unit 5, Zaporizhzhya NPP. Campaigns 20 - 23. - Energodar: Zaporizhzhya NPP, 2011. - 323 p. (Rus)
17. *Philimonov P.E., Mamichev V.V., Averyanova S.P.* The "reactor simulator" code for modelling of maneuvering WWER-1000 regimes // Atomnaya Energiya. - 1998. - Vol. 84, No. 6. - P. 560 - 563 (Rus)
18. *Suzuki M.* Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030 / M. Suzuki. - Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. - 285 p.
19. *Chao Y.A., Shatilla Y.A.* Conformal mapping and hexagonal nodal methods - II: Implementation in the ANC-H code // Nuclear Science and Engineering. - 1995. - Vol. 121, No. 2. - P. 210 - 225.

Надійшла 03.02.2016

Received 03.02.2016