

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИЙ ПРОДЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ, ВАЖНЫХ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

В.И. Скалозубов, О.А. Чулкин, Ю.А. Комаров, Т.В. Габлая, В.Ю. Кочнева
Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина
E-mail: gntcod@te.net.ua

Разработан оригинальный метод оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации теплотехнического оборудования систем, важных для безопасности ядерных энергетических установок. Реализация разработанного метода осуществлена на примере корпусов насосов и арматуры систем, необходимых для безопасности, а также корпусов бассейна выдержки отработанного ядерного топлива атомных электростанций с ВВЭР. Установлено, что обоснованный срок продления эксплуатации для корпусов насосов и арматуры систем, имеющих большое значение для безопасности, – 10 лет, а для корпусов бассейна выдержки отработанного ядерного топлива – 13 лет. Критические параметры надежности, определяющие остаточный ресурс корпусов теплотехнического оборудования, – динамические напряжения на металл при запроектных землетрясениях и фактическое количество циклов нагружения в переходных и аварийных режимах. Для снижения скорости деградации/износа металла корпусов теплотехнического оборудования в запроектный период эксплуатации одним из эффективных подходов является оптимизация периодичности испытаний. Эти вопросы будут рассмотрены в последующих публикациях авторов.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Одним из наиболее эффективных направлений развития ядерной энергетики является продление в запроектный период эксплуатации теплотехнического оборудования систем, важных для безопасности ядерных энергетических установок (СВБ ЯЭУ). Экономические затраты даже на полную замену систем и оборудования (кроме корпуса ядерного реактора) не сопоставимы с затратами на снятие с эксплуатации и строительство новых энергоблоков ЯЭУ [1].

В соответствии с отраслевыми программами продления эксплуатации украинских атомных электростанций (АЭС) в настоящее время продлены сроки эксплуатации 1-го и 2-го энергоблоков Ровенской АЭС; 1, 2 и 3-го энергоблоков Южно-Украинской АЭС; 1, 2, 3-го и 4-го энергоблоков Запорожской АЭС. Экономический эффект от внедрения этих мероприятий по продлению эксплуатации составляет миллиарды долларов США.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ и отраслевыми программами продления эксплуатации АЭС Украины ключевыми вопросами являются [2, 3]:

- анализ надежности по опыту эксплуатации, эксплуатационного контроля, технического обслуживания и ремонта СВБ ЯЭУ;
- техническое обследование и контроль состояния систем и оборудования по окончании проектного срока эксплуатации;
- анализ прочностных показателей систем, оборудования и конструкций СВБ ЯЭУ (в том числе в отношении экстремальных внешних воздействий – землетрясений, торнадо, затоплений и т. п.).

Основные ограничения технических отчетов (например, [4, 5]) по продлению эксплуатации украинских АЭС заключаются в следующем:

- 1 – недостаточно обоснованы показатели

остаточного ресурса, скорости деградации/износа и продолжительности срока продления эксплуатации отдельных систем и оборудования;

2 – недостаточно обоснованы показатели оптимальной эффективности стратегий продления эксплуатации в отношении обеспечения необходимого уровня надежности СВБ ЯЭУ и соответствующих экономических затрат.

Эти положения определяют актуальность разработки и внедрения комплексного метода оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации СВБ ЯЭУ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИЙ ПРОДЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1. Под оптимизацией эффективности стратегий продления эксплуатации полагается определение максимально допустимого продления срока эксплуатации при обеспечении необходимого уровня надежности и минимизации экономических затрат.

2. Критерием оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации принимается отношение продолжительности относительного срока продления эксплуатации в запроектный период ΔT_n к соответствующим затратам организационно-технических мероприятий по продлению эксплуатации:

$$K_{\text{опт}} = \frac{\Delta T_n}{T_0} \frac{C_0}{\Delta C_n}, \quad (1)$$

где T_0 – назначенный проектом срок эксплуатации; C_0 – эквивалентная стоимость системы, продлеваемой для эксплуатации; ΔC_n – суммарные затраты организационно-технических мероприятий при продлении эксплуатации, включая замену и восстановление отдельных элементов системы.

Эффективность оптимизации стратегий продления сроков эксплуатации определяется условием

$$K_{opt} \rightarrow \max. \quad (2)$$

При полной замене элементов системы $K_{opt} = 1$.

3. Параметрами оптимизации эффективности продления эксплуатации являются:

– показатели остаточного ресурса на момент продления эксплуатации определяющих показатели надежности системы

$$\Delta P_{op} = \begin{pmatrix} P_1 - P_{1д} \\ P_2 - P_{2д} \\ \vdots \\ P_n - P_{нд} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – текущие значения определяющих показателей надежности на момент продления эксплуатации; $P_{1д}, P_{2д}, \dots, P_{нд}$ – предельно допустимые значения определяющих показателей надежности;

– показатель затрат на организационно-технические мероприятия по продлению эксплуатации ($\Delta C_{п}/C_0 = \Pi_c$);

– показатель максимально допустимой продолжительности срока продления эксплуатации

$$\Pi_{\Delta T} = \frac{\Delta T_{п}}{T_0}. \quad (4)$$

4. Продолжительность срока продления эксплуатации определяется показателями остаточного ресурса и скоростью деградации/износа элементов системы:

$$\Delta P_{op} = V_{п} \Delta T_{п}. \quad (5)$$

При условии $V_{п} > 0$ из уравнения (5) следует:

$$\Delta T_{п} = \min \left\{ \frac{\Delta P_{op}}{V_{п}} \right\}, \quad (6)$$

где $V_{п}$ – скорость деградации/износа критических по надежности элементов системы в запроектный период эксплуатации.

Консервативно (без учета мероприятий по восстановлению и управлению ресурсом) скорость деградации/износа критических по надежности элементов системы может быть определена по результатам эксплуатации в проектный период:

$$V_{п} = V = \frac{\Delta P_p}{T_0} = \frac{P_0 - \Delta P_{op} - P_d}{T_0}, \quad (7)$$

где ΔP_p – снижение ресурса определяющих параметров надежности за назначенный проектом период эксплуатации T_0 ; P_0 – значения определяющих параметров надежности в начальный момент эксплуатации с запасом до предельно допустимых значений P_d .

Таким образом, имеем параметры оптимизации эффективности продления эксплуатации:

$$\Pi_{\Delta T} = \min \left\{ \frac{\Delta P_{op}}{P_0 - \Delta P_{op} - P_d} \right\}, \quad (8)$$

$$\Pi_c = \frac{\Delta C_{п}}{C_0}. \quad (9)$$

5. Граничные значения параметров оптимизации

эффективности стратегий продления эксплуатации следуют из формул (1)–(9):

$$0 \leq \Pi_{\Delta T} \leq 1, \quad (10)$$

$$0 < \Pi_c \leq 1. \quad (11)$$

Условие эффективности оптимизации стратегий продления эксплуатации

$$K_{opt} > 1. \quad (12)$$

Область параметров оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации показана на рис. 1.

Алгоритм реализации метода оптимизации эффективности стратегий управления эксплуатацией приведен на рис. 2.

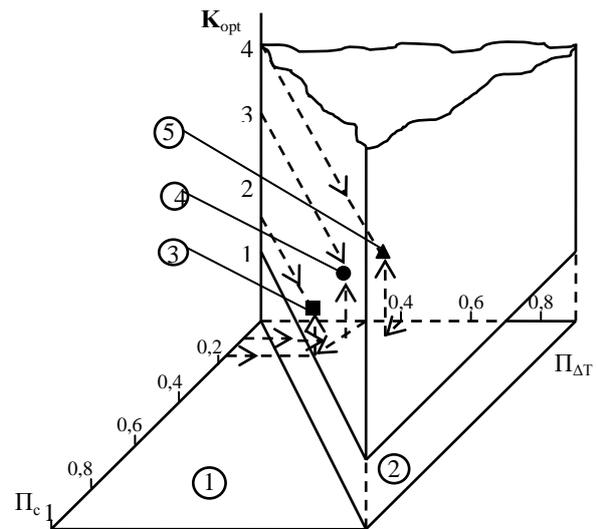


Рис. 1. Области оптимизации эффективности продления эксплуатации:

- ① – область параметров оптимизации неэффективных стратегий продления эксплуатации;
- ② – область параметров оптимизации эффективных стратегий продления эксплуатации;
- ③ – корпуса насосов СВБ 1-го и 2-го энергоблоков Запорожской АЭС;
- ④ – корпуса арматуры СВБ 1-го и 3-го энергоблоков Южно-Украинской АЭС;
- ⑤ – корпуса бассейна выдержки (БВ) ОЯТ 3-го и 4-го энергоблоков Запорожской АЭС

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ОБОСНОВАНИЙ

Реализация предложенного метода оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации была осуществлена для:

- корпусов насосов СВБ 1-го и 2-го энергоблоков Запорожской АЭС;
- корпусов арматуры СВБ 1-го и 3-го энергоблоков Южно-Украинской АЭС;
- железобетонных конструкций корпуса БВ ОЯТ 3-го и 4-го энергоблоков Запорожской АЭС.

Определяющие параметры надежности корпусов рассматриваемых систем следующие:

- толщина стенки корпуса δ ;
- размеры обнаруженных дефектов r ;
- динамические напряжения σ на корпусе

оборудования при максимальном расчетном землетрясении с ускорением отклика 0,17 g (более 7 баллов по шкале MSK-64);

– количество циклов термического нагружения на металл корпуса в переходных и аварийных режимах N .

Остаточный ресурс определялся по минимальному запасу определяющих параметров надежности рассматриваемых систем:

$$\Delta P_{op} = \min \left\{ \Delta P_{op}(\delta, \delta_d); \Delta P_{op}(r, r_d); \Delta P_{op}(\sigma, \sigma_d); \Delta P_{op}(N, N_d) \right\}, \quad (13)$$

где $\delta_d, r_d, \sigma_d, N_d$ – допустимые значения толщины стенки корпуса, размеров дефектов, напряжений и количества циклов нагружения соответственно.

Допустимые значения параметров надежности определялись по проектно-конструкторской документации на оборудование, технологическим регламентам безопасной эксплуатации, а также по известным расчетным зависимостям для критических размеров дефектов и напряжений на корпуса систем (приведены, например, в [1, 6]).

Результаты применения предложенного метода оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации приведены на рис. 1. Из них можно заключить следующее.

1. Все обоснованные стратегии соответствуют области оптимальной эффективности продления эксплуатации корпусов СВБ.

2. Для корпусов арматуры и насосов обоснованный срок продления эксплуатации 10 лет, для корпусов БВ ОЯТ – 13 лет.

3. Критические параметры надежности, определяющие остаточный ресурс теплотехнического оборудования СВБ, – динамические напряжения на металл при запроектных землетрясениях и фактическое количество циклов нагружения в переходных и аварийных режимах.

4. Для снижения скорости деградации/износа металла корпусов СВБ в запроектный период эксплуатации одним из эффективных подходов является оптимизация периодичности испытаний теплотехнического оборудования [7, 8]. В данном случае оптимизация связана с двумя факторами: с одной стороны, частоту испытаний СВБ необходимо увеличивать для обнаружения «скрытых» отказов; а, с другой стороны, избыточная частота испытаний приводит к необоснованному износу/деградации оборудования [7, 8]. Поэтому этот вопрос требует дополнительных исследований в запроектный период эксплуатации и будет рассмотрен авторами в последующих работах.

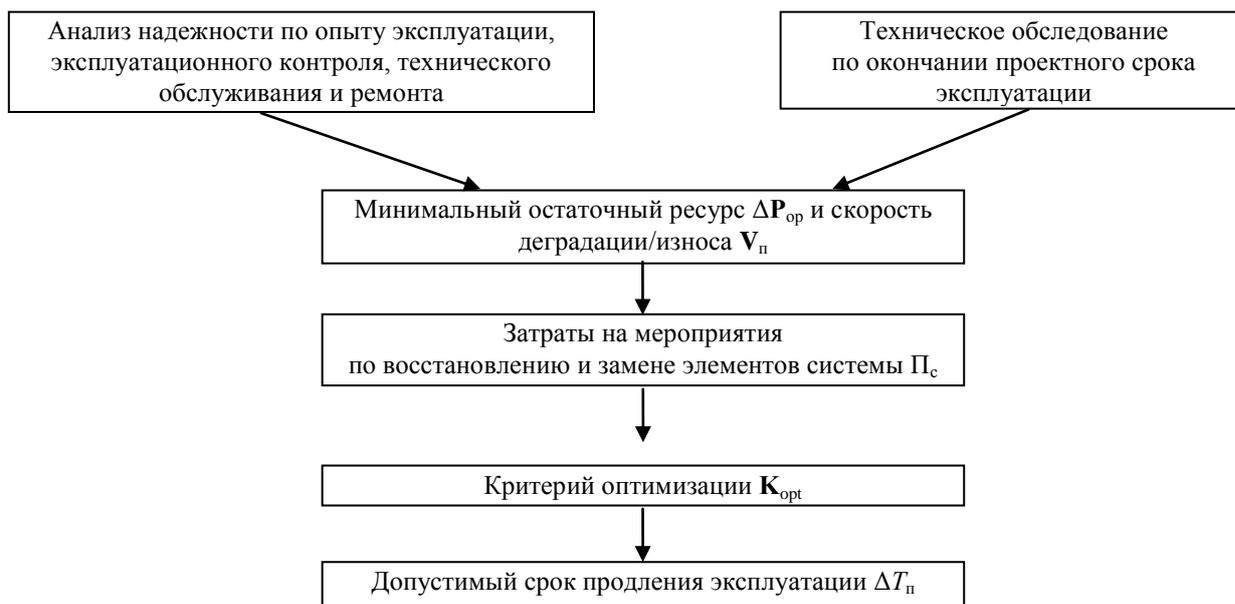


Рис. 2. Алгоритм реализации метода оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации

ВЫВОДЫ

1. Разработан оригинальный метод оптимизации эффективности стратегий продления эксплуатации теплотехнического оборудования систем, важных для безопасности ядерных энергетических установок.

2. Реализация разработанного метода осуществлена на примере корпусов насосов и арматуры систем, имеющих большое значение для безопасности, а также корпусов БВ ОЯТ атомных электростанций с ВВЭР.

Установлено, что обоснованный срок продления

эксплуатации для корпусов насосов и арматуры систем, важных для безопасности, – 10 лет, а для корпусов БВ ОЯТ – 13 лет.

3. Критические параметры надежности, определяющие остаточный ресурс корпусов теплотехнического оборудования, – динамические напряжения на металл при запроектных землетрясениях и фактическое количество циклов нагружения в переходных и аварийных режимах.

4. Для снижения скорости деградации/износа металла корпусов теплотехнического оборудования в запроектный период эксплуатации одним из

эффективных подходов является оптимизация периодичности испытаний. Эти вопросы будут рассмотрены в последующих публикациях авторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, Е.С. Лещетная. *Основы продления эксплуатации АЭС с ВВЭР*. Чернобыль: ИПБ АЭС НАНУ, 2011, 384 с.

2. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety / *IAEA-TECDOC-981*. Vienna: IAEA, 1997, 173 p.

3. *Положение о порядке продления срока эксплуатации*: ПЛ-Д.0.08.126-2003. ГП НАЭК «Энергоатом», 2003.

4. *Технический отчет по продлению эксплуатации насосов СВБ 1-го и 2-го блоков Запорожской АЭС*. ОП ГП НАЭК «Энергоатом», Запорожская АЭС, Энергодар, 2013.

5. *Технический отчет по продлению эксплуатации арматуры СВБ 3-го блока Южно-Украинской АЭС*. ОП ГП НАЭК «Энергоатом» Южно-Украинская АЭС, Южноукраинск, 2015.

6. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*: ПН АЭ Г-7-002-86.

7. В.И. Скалозубов, Д.В. Билей, Т.В. Габлая и др. Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР / Под ред. В.И. Скалозубова. Чернобыль: ИПБ АЭС НАНУ, 2008, 512 с.

8. В.И. Скалозубов, Ю.Л. Коврижкин, В.Н. Колыханов, В.Ю. Кочнева, В.В. Урбанский. *Оптимизация плановых ремонтов энергоблоков атомных электростанций с ВВЭР* / Под ред. В.И. Скалозубова. Чернобыль: ИПБ АЭС НАНУ, 2008, 496 с.

Статья поступила в редакцию 27.11.2017 г.

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ПРОДОВЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ, ВАЖЛИВИХ ДЛЯ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ СТАНЦІЙ

В.І. Скалозубов, О.О. Чулкін, Ю.О. Комаров, Т.В. Габлая, В.Ю. Кочнева

Розроблено оригінальний метод оптимізації ефективності стратегій продовження експлуатації теплотехнічного обладнання систем, важливих для безпеки ядерних енергетичних установок. Реалізація розробленого методу здійснена на прикладі корпусів насосів і арматури систем, необхідних для безпеки, а також корпусів басейну витримки відпрацьованого ядерного палива атомних електростанцій із ВВЕР. Установлено, що обґрунтований термін продовження експлуатації для корпусів насосів і арматури систем, важливих для безпеки, – 10 років, а для корпусів басейну витримки відпрацьованого ядерного палива – 13 років. Критичні параметри надійності, що визначають залишковий ресурс корпусів теплотехнічного обладнання, – динамічні напруги на метал при позапроектних землетрусах та фактична кількість циклів навантаження в перехідних і аварійних режимах. Для зниження швидкості деградації/зносу металу корпусів теплотехнічного обладнання в позапроектний період експлуатації одним із ефективних підходів є оптимізація періодичності випробувань. Ці питання будуть розглянуті в наступних публікаціях авторів.

OPTIMIZATION OF STRATEGIES FOR EXTENDING THE OPERATION OF SYSTEMS IMPORTANT FOR THE SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS

V.I. Skalozubov, O.A. Chulkin, Yu.A. Komarov, T.V. Gablaya, V.Yu. Kochneva

The original efficiency optimization method of strategy of operation extension of the heat engineering equipment of the safety related systems of nuclear power utilities is developed. The developed method is realized for the pump cases and armature of the safety related systems, as well as for the cases of a spent fuel pool of nuclear power plants with WWER. It is recognized that the reasonable time of operation extension for the pump cases and armature of the safety related systems is 10 years and for the case of a spent fuel pool is 13 years. The critical reliability parameters defining a residual life of the cases of the heat engineering equipment are dynamic metal stresses during beyond design basis earthquakes and the actual quantity of loading cycles during transient and accident operation. Optimization of test periodicity is one of effective approaches to reduce metal degradation/wear rate of the heat engineering equipment cases during the beyond design basis operating period. These questions will be considered in the subsequent publications of authors.