

К УЧЕТУ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСЧЕТА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АЭС

Р.З. АМИНОВ*, В.Е. ЮРИН**, М.А. МУРТАЗОВ*

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.

**Саратовский научный центр Российской академии наук

В данной работе предложена методика предварительного вероятностного анализа безопасности систем резервирования собственных нужд атомных электростанций, учитывающая временные изменения интенсивностей отказа оборудования с момента начала аварии и до восстановления работоспособности. Методика позволяет учесть российскую и зарубежную статистику интенсивностей исходных аварийных событий, в том числе обесточивания по причине экстремальных природных условий (на примере Среднего Поволжья России за 100 лет). Предлагаемая методика также позволяет провести предварительную оценку уровня ежегодного снижения риска возникновения ущерба от аварий с повреждением активной зоны (ПАЗ) реакторов АЭС в денежном эквиваленте с учетом статистики экономического ущерба, вызванного такими авариями, имевшими место на АЭС.

В качестве примера по предлагаемой методике была исследована многофункциональная система резервирования собственных нужд АЭС, основанная на комбинировании станции с дополнительной малоомощной паротурбинной установкой. Как показали расчеты, учет нестационарных процессов по данной методике позволяет уточнить для принятых условий итоговые результаты расчета интенсивностей ПАЗ реактора и уровня ежегодного снижения риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ реакторов в 1,3 и более раза.

Ключевые слова: атомные электростанции, резервирование собственных нужд, повреждение активной зоны реактора, паротурбинная установка, вероятностный анализ безопасности, нестационарные процессы, интенсивность отказов.

Важное место в процессе экспертизы проектов атомных станций занимает процедура вероятностного анализа безопасности (ВАБ). ВАБ используется во ФГУП "Атомэнергопроект" в качестве инструмента для выработки и принятия решений по эксплуатации и оценке безопасности действующих и проектируемых АЭС с ВВЭР [1]. ВАБ представляет собой процесс, включающий несколько стадий, которые различаются по целям, объему, содержанию и глубине выполняемых анализов. Объем и содержание определяют полноту ВАБ и уровень риска крупных аварий с разгерметизацией. Глубина изучения вероятностных показателей показывает уровень реалистичности вероятностных моделей безопасности атомных станций. Все это оказывает решающее влияние на достоверность результатов и эффективность их использования для поиска и разработки новых путей повышения безопасности [2].

Первое значительное исследование в области ВАБ было представлено в докладе профессора Расмуссена WASH-1400 в 1975 году в США [3]. В 1979 г. проф. Биргховер выполнил аналогичный анализ в ФРГ [4], а уже к концу 80-х годов в ряде стран было проведено свыше 100 ВАБ АС различного уровня. В 1978-81 гг. НИКИЭТ совместно с ОКБ “Машиностроения”, ОКБ “Гидропресс”, ВТИ имени Ф.Э. Дзержинского и рядом других организаций были разработаны отраслевые руководящие технические материалы: РТМ 95490-78 “Методика расчета структурной надежности АЭС и ее систем на этапе проектирования” и РТМ 95823-81 “Надежность оборудования реакторных установок АЭС. Методика расчета”. Была подготовлена методология анализа систем безопасности, в основу которой легли математические методы теории надежности [5, 66], методика деревьев отказа [7], логическое соотношение булевой алгебры [8, 9]. Методология включает определение показателей надежности и моделей их расчета и учитывает специфические особенности систем, режимов использования, виды и характеристики отказов и ремонтов.

Совершенствование методологии вероятностного анализа и его применение для действующих атомных станций в настоящее время ведется такими российскими организациями, как институт Атомэнергопроект, ОКБ Гидропресс, РНЦ Курчатовский институт, а также в международных программах, выполняемых в соответствии с “Отраслевой научно-технической программой концерна “Росэнергоатом”, “Полномасштабный ВАБ действующих АЭС с реакторами ВВЭР-1000” [10]. При проведении ВАБ должны выполняться требования действующих в России нормативных документов по безопасности [11], а также рекомендации МАГАТЭ [12].

Как правило, при определении показателей надежности на длительном временном отрезке, сопоставимом с периодом наработки на отказ, специалисты ограничиваются стационарными значениями интенсивностей отказа, пренебрегая незначительным временным отрезком переходного режима. Однако при расчете аварийных режимов работы оборудования, сопровождающихся ограниченными отрезками времени, необходимо учитывать переходные состояния, так как выход интенсивностей отказа оборудования на стационарный режим сопоставим с временем восстановления системы. Таким образом, было бы неправильно брать стационарное значение, которое недействительно для значительной части времени работы в аварийном режиме.

В настоящей работе проведен предварительный вероятностный анализ безопасности АЭС с учетом нестационарных состояний оборудования в аварийном режиме. В качестве примера рассмотрена известная схема резервирования собственных нужд АЭС посредством дополнительной маломощной паротурбинной установки (ПТУ). Принципиальная технологическая схема многофункционального резервирования собственных нужд (СН) АЭС на основе дополнительной ПТУ показана на рис. 1.

В штатном режиме дополнительная ПТУ 4 работает на выработку электроэнергии, окупая, таким образом, со временем затраты на ее установку (дополнительный пар может быть получен за счет повышения мощности реактора). В аварийных ситуациях, связанных с обесточиванием, основная ПТУ 1 отключается сразу после срабатывания аварийной защиты, часть пара для стабилизации давления во втором контуре сбрасывается через быстродействующую редуцирующую установку (БРУ-а) в атмосферу. При этом продолжает находиться в работе дополнительная ПТУ 4. Для генерации пара, который может служить для нее рабочим телом, используется энергия остаточного тепловыделения активной зоны реактора. Избыточный объем рабочего тела, генерируемого в парогенераторе остаточным тепловыделением, направляется через быстродействующую редуцирующую установку (БРУ-к) в

конденсатор 3 дополнительной ПТУ. Предлагаемая система способна обеспечить автономность и независимость АЭС в течение, не менее 72 ч [13].

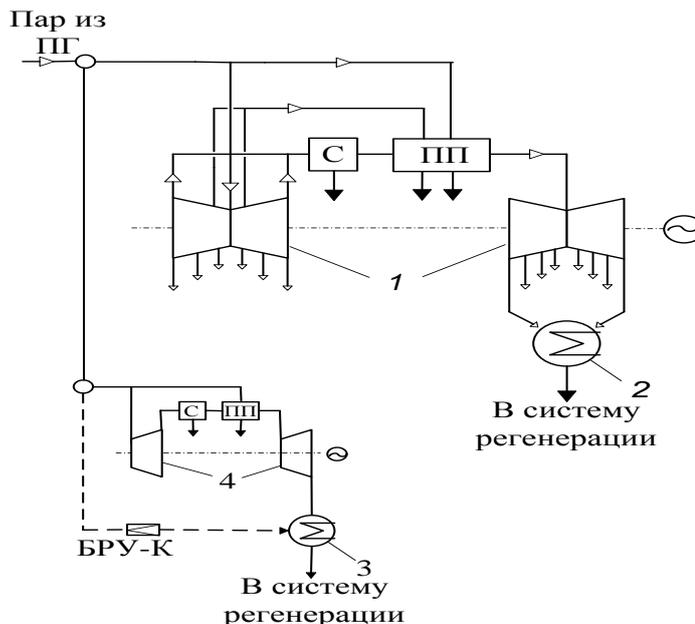


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема многофункционального резервирования СН АЭС:

1 – основная ПТУ; 2 – конденсатор основной ПТУ; 3 – конденсатор дополнительной ПТУ;
4 – дополнительная ПТУ

Для того, чтобы оценить целесообразность предлагаемой установки с точки зрения безопасности АЭС, была проведена предварительная оценка вероятности ПАЗ реактора. Составлен граф состояний для совместного использования постоянно действующей паротурбинной установки и трехканальной системы аварийного электроснабжения (САЭ) с дизель-генераторами (ДГ) (рис. 2).

Обозначения на рисунке: $\lambda_{об}$ – общая интенсивность обесточивания АЭС; λ_T – интенсивность потери теплоносителя 1-го контура; $\lambda_{ДГ-к}$ – общая интенсивность отказов канала системы аварийного электроснабжения с дизель-генератором; $\lambda_{ПТУ-к}$ – общая интенсивность отказов дополнительного парового турбогенератора и канала; $P_{з1..3}$, $P_{нз1..3}$ – вероятности запуска (98 % – паспортные данные) и незапуска (2 %) 1-го, 2-го, 3-го дизель-генератора соответственно; $\mu_{об}$, $\mu_{ПТУ-к}$, $\mu_{ДГ-к}$ – интенсивности восстановления электроснабжения, ПТУ с каналом безопасности, ДГ с каналом безопасности соответственно.

При расчетах учитывались интенсивности исходных аварийных событий, в том числе обесточивания по причине экстремальных природных условий (табл. 1) [14, 15, 16]. Интенсивности обесточивания по причине экстремальных природных условий рассматривались на примере Среднего Поволжья России за 100 лет.

При расчетах также учитывалось: в случае незапуска дизель-генератора с заданной вероятностью система переходит в следующее состояние; при потере теплоносителя первого контура и аварийной течи в парогенераторе дополнительная ПТУ не может обеспечить необходимый уровень электроснабжения и в работу включается дизель-генератор (при условии его запуска).

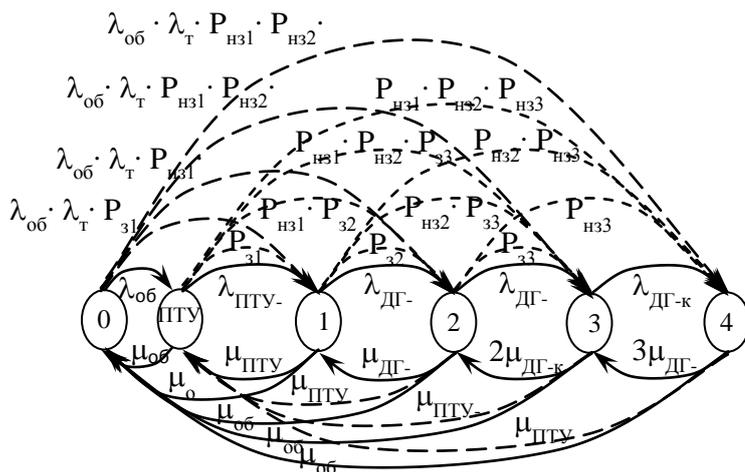


Рис. 2. Граф состояний для системы резервирования собственных нужд АЭС на основе дополнительной ПГУ с тремя каналами САЭ с ДГ. Состояния: 0 – отсутствие нарушения электроснабжения СН АЭС; выполнение функций ПГУ; 1 – выполнение функций одним из трех каналов САЭ с ДГ; 2 – выполнение функций вторым каналом САЭ с ДГ; 3 – выполнение функций третьим каналом САЭ с ДГ; 4 – потерей электроснабжения с последующим ПАЗ

Интенсивность отказов рассчитывается как сумма интенсивности отказов по внутренним (наработка на отказ) и внешним причинам (климатические условия):

$$\lambda_{об}^{BH} = \lambda_{сист} + \lambda_{с.н};$$

$$\lambda_{ДГ-к}^{BH} = \lambda_{ДГ}^{BH} + \lambda_{к};$$

$$\lambda_{ПГУ-к}^{BH} = \lambda_{ПГУ}^{BH} + \lambda_{к};$$

$$\lambda_{об} = \lambda_{об}^{BH} + \lambda_{ур} + \lambda_{земл} + \lambda_{п.б.} + \lambda_{л} + \lambda_{обл} + \lambda_{пож};$$

$$\lambda_{ДГ-к} = \lambda_{ДГ-к}^{BH} + \lambda_{земл} + \lambda_{пож};$$

$$\lambda_{ПГУ-к} = \lambda_{ПГУ-к}^{BH} + \lambda_{пв} + \lambda_{зкл} + \lambda_{ркл} + \lambda_{ген} + \lambda_{конд} + \lambda_{г} + \lambda_{г2к} + \lambda_{пг} + \lambda_{ур} + \lambda_{земл} + \lambda_{п.б.} + \lambda_{л} + \lambda_{пож},$$

где $\lambda_{ДГ-к}^{BH}$ – интенсивность отказов канала системы аварийного электроснабжения с дизель-генератором по внутренним причинам; $\lambda_{ПГУ-к}^{BH}$ – интенсивность отказов дополнительного парового турбогенератора и канала безопасности.

Таблица 1

Исходные данные по интенсивностям исходных аварийных событий

Исходное аварийное событие	Обозначение	Интенсивность, 1/час
Интенсивность потери теплоносителя 1-го контура	λ_T	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность аварийной течи в парогенераторе	$\lambda_{чг}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$
Интенсивность обесточивания по причинам потери внешнего электроснабжения (системная авария)	$\lambda_{сист}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность обесточивания по причинам потери электроснабжения собственных нужд	$\lambda_{с.н}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность полного прекращения подачи питательной воды	$\lambda_{чпв}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность закрытия главных запорных клапанов дополнительной ПГУ	$\lambda_{зкл}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность закрытия регулирующего клапана дополнительной ПГУ	$\lambda_{ркл}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$

Продолжение таблицы 1

Интенсивность останова генератора дополнительной ПТУ	$\lambda_{ген}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность выхода из строя конденсатора дополнительной ПТУ	$\lambda_{конд}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность течей в системе 2-го контура	$\lambda_{т2к}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность отказов дополнительной ПТУ по внутренним причинам	$\lambda_{ПТУ}^{вн}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность отказов дизель-генератора по внутренним причинам	$\lambda_{ДГ}^{вн}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Интенсивность отказов канала безопасности по внутренним причинам	$\lambda_{к}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Обесточивание вызванное землетрясением	$\lambda_{земл}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
Обесточивание вызванное пыльной бурей	$\lambda_{п.б.}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$
Обесточивание вызванное ливневыми дождями	$\lambda_{л}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$
Обесточивание вызванное ураганным ветром	$\lambda_{уд}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$
Обесточивание вызванное сильным обледенением	$\lambda_{обл}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$
Обесточивание вызванное пожарами	$\lambda_{пож}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$

По аналогии были рассчитаны интенсивности восстановления [17]. По графу состояний (рис. 2) была составлена система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP(t)_0}{dt} = (-\lambda_{об} - \lambda_{об} \cdot \lambda_m) \cdot P_{нз}(t) + \mu_{об} \cdot [P_{ПТУ}(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t)] \\ \frac{dP(t)_{ПТУ-к}}{dt} = \lambda_{об} \cdot P_{нз}(t) - (\lambda_{ПТУ-к} + \mu_{об}) \cdot P_{ПТУ-к}(t) + \mu_{ПТУ-к} \cdot [P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t)] \\ \frac{dP(t)_1}{dt} = \lambda_{об} \cdot \lambda_m \cdot P_{нз}(t) \cdot P_{31} + P_{ПТУ-к}(t) \cdot \lambda_{ПТУ-к} \cdot P_{31} - (\lambda_{ДГ-к} + \mu_{ПТУ-к} + \mu_{об}) \cdot P_1(t) + \\ + \mu_{ДГ-к} \cdot P_2(t) \\ \frac{dP(t)_2}{dt} = \lambda_{об} \cdot \lambda_m \cdot P_0(t) \cdot P_{нз1} \cdot P_{32} + \lambda_{ПТУ-к} \cdot P_{ПТУ-к}(t) \cdot P_{нз1} \cdot P_{32} + \lambda_{ДГ-к} \cdot P_1(t) \cdot P_{32} - \\ - (\lambda_{ДГ-к} + \mu_{ДГ-к} + \mu_{об} + \mu_{ПТУ-к}) \cdot P_2(t) + 2 \cdot \mu_{ДГ-к} \cdot P_3(t) \\ \frac{dP(t)_3}{dt} = \lambda_{об} \cdot \lambda_t \cdot P_0(t) \cdot P_{нз1} \cdot P_{нз2} \cdot P_{33} + \lambda_{ПТУ} \cdot P_{ПТУ-к}(t) \cdot P_{нз1} \cdot P_{нз2} \cdot P_{33} + \\ + \lambda_{ДГ-к} \cdot P_1(t) \cdot P_{нз2} \cdot P_{33} + \lambda_{ДГ-к} \cdot P_2(t) \cdot P_{33} - (\lambda_{ДГ-к} + 2 \cdot \mu_{ДГ-к} + \mu_{об} + \\ + \mu_{ПТУ-к}) \cdot P_3(t) + 3 \cdot \mu_{ДГ-к} \cdot P_4(t) \\ \frac{dP(t)_4}{dt} = \lambda_{об} \cdot \lambda_m \cdot P_0(t) \cdot P_{нз1} \cdot P_{нз2} \cdot P_{нз3} + \lambda_{ПТУ-к} \cdot P_{ПТУ-к}(t) \cdot P_{нз1} \cdot P_{нз2} \cdot P_{нз3} + \\ + \lambda_{ДГ-к} \cdot P_1(t) \cdot P_{нз2} \cdot P_{нз3} + \lambda_{ДГ-к} \cdot P_2(t) \cdot P_{нз3} + \lambda_{ДГ-к} \cdot P_3(t) - (3 \cdot \mu_{ДГ-к} + \\ + \mu_{об} + \mu_{ПТУ-к}) \cdot P_4(t) \end{array} \right.$$

$$P_0(t) + P_{ПТУ-к}(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1.$$

Система дифференциальных уравнений была решена численным методом с использованием ЭВМ в системе *Mathcad*. Далее были определены итоговые

интенсивности отказа систем резервирования с последующим ПАЗ при полном обесточивании для каждого часа, начиная с момента начала аварии, в течение 72 часов.

Итоговая интенсивность отказа определялась как сумма произведений вероятности состояний работоспособности P_i на интенсивность переходов λ_{ij} системы из области рабочего состояния в конечные:

$$\lambda_{\text{ит}} = \sum_{i \in G^+} \left(P_i \sum_{j \in G^-} \lambda_{ij} \right).$$

Для сравнения был также рассчитан вариант базовой системы САЭ с тремя ДГ. Полученные результаты показаны на рис. 3.

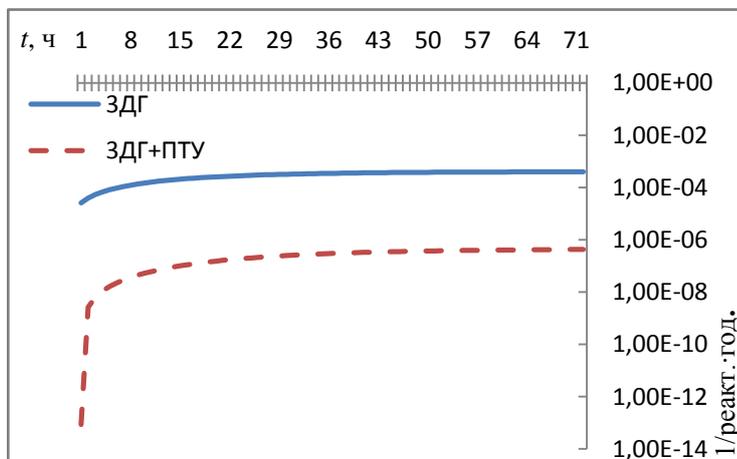


Рис. 3. Зависимости интенсивностей отказа системы резервирования СН АЭС от времени

Как видно из рис. 3, на выбранном промежутке времени значения интенсивностей отказа претерпевают значительное изменение. Была посчитана средняя интенсивность аварии с ПАЗ для продолжительности обесточивания 24, 48 и 72 часов. Для сравнения результаты приведены в табл. 2 со стационарными интенсивностями отказа систем резервирования. Значения интенсивностей незначительно изменяются и приближаются к стационарным после ста часов с момента аварии.

Таблица 2

Расчетные значения интенсивностей аварий с ПАЗ

Интенсивность отказа, 1/реактор-год	Три канала САЭ с ДГ	Три канала САЭ с ДГ и ПТУ
Стационарное значение	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-7}$
Среднее для 24 часов	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$
Среднее для 48 часов	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$
Среднее для 72 часов	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$

Как видно из результатов, приведенных в табл. 3, средние значения интенсивностей отказа систем резервирования могут быть в 1,3 и более раз (в зависимости от рассматриваемого промежутка времени) ниже, чем стационарные значения. Также из табл. 3 видно, что рассмотренная система аварийного электроснабжения с ДГ и ПТУ удовлетворяет второму целевому показателю, установленному для АЭС с ВВЭР нового поколения, т.е. не превышает $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/реактор-год [18].

В качестве результирующего экономического эффекта повышения безопасности атомной станции принимается среднее ежегодное снижение риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ, по сравнению с уровнем безопасности базовой трехканальной САЭ с ДГ:

$$\Delta R_t = \frac{\sum_{n=1}^{96} \Delta \lambda_{syst}}{96} * Y,$$

где $\Delta \lambda_{syst} = \lambda_{syst}^{ДГ} - \lambda_{syst}^{ПГУ+ДГ}$ – снижение интенсивности ПАЗ (для расчета взяты средние значения для 72 часов); Y – ущерб от аварии с ПАЗ, оценивается, по различным данным, от 80 до 155 млрд. дол./реактор [19]. Для расчетов принят в размере 100 млрд. дол./реактор.

Таким способом можно рассчитать риски, связанные с ПАЗ, для каждого часа в денежном эквиваленте (рис. 4).

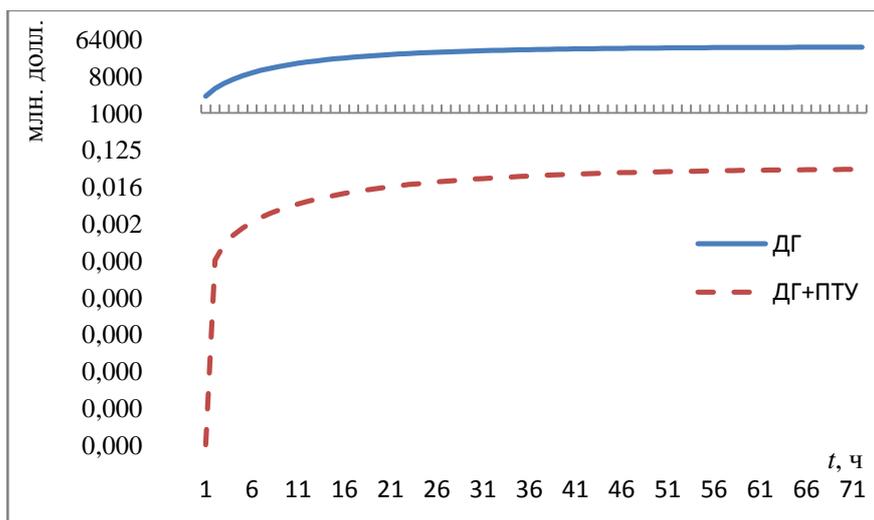


Рис. 4. Риски, связанные с ПАЗ, при применении систем резервирования СН АЭС от времени

Таким образом, при учете нестационарных состояний конечный результат ежегодного снижения риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ для варианта комбинирования АЭС с дополнительной ПГУ (52 млн. дол./год) снизился на 19 млн. дол./год по сравнению с результатом классического расчета, учитывающего лишь стационарные состояния (71 млн. дол./год).

Выводы

1. Предложена методика предварительного вероятностного анализа систем резервирования собственных нужд АЭС, учитывающая временные изменения интенсивностей отказа оборудования с момента начала аварии и до восстановления.

2. Учет нестационарных процессов по данной методике позволяет уточнить итоговые результаты интенсивностей ПАЗ и ежегодного снижения риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ для принятых условий в 1,3 и более раз.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-00063 А).

Summary

In this paper, the method is proposed for preliminary probabilistic safety analysis of the own needs reservation systems for nuclear power plants, which takes into account

temporal changes of equipment failure rate since the beginning of the accident and to restore functionality. The method allows to take into account Russian and foreign statistics of the intensities of the initial emergency events, including power failure by reason of extreme natural conditions (for example, the Middle Volga region Russia during the 100 years). The presented method also allows conducting the preliminary assessment of the annual risk level reduction of the damage caused by accidents with core damage (ACD) NPP reactors in money equivalent based on statistics of economic damage caused by such accidents that took place at nuclear power plants.

As an example, according to the proposed method, the multifunction system reservation own needs NPP was investigated, based on a combination stations with an additional low-power steam turbine installation. According to calculations, accounting time-dependent processes by this method allows to specify for the given initial data the final results of the calculation for intensities of the reactor ACD and the risk level reduction of the annual emergence of damage caused by accidents ACD reactors by more than 1,3 times.

Keywords: nuclear power plants, reservation of own needs, reactor core damage, steam-turbine plant, probabilistic safety analysis of non-stationary processes, intensity of failures.

Литература

1. Швыряев Ю.В., Морозов В.Б. и др. Результаты откорректированного ВАБ для АЭС повышенной безопасности с ВВЭР-1000 // Седьмой международный форум по обмену информации "Анализ безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК" (ФОРУМ-7, 28-30 октября 2003, Словакия).
 2. Острейковский В.А., Швыряев Ю.В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С.19-28.
 3. Nuclear Regulatory Commission. An assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plant (Reactor Safety Study) // Rep. Wash-1400. Washington, DC, 1975.
 4. Биркховер А. Исследование риска при эксплуатации атомных электростанций в ФРГ / А. Биркховер // Бюллетень МАГАТЭ. 1980. Кк.22, №5/6.
 5. Клемен А.И., Емельянов В.С., Морозов В.Б. Расчет надежности ядерных энергетических установок. Марковская модель. М.: Энергоиздат, 1982. 208 с.
 6. Острейковский В.А. Теория надежности М.: Высшая школа, 2003. 436 с.
 7. Шиверский Е.А., Клемен А.И., Поляков Е.Ф. Программа ЭВМ для расчета надежности блока АЭС и его систем с помощью метода "дерева отказа" // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физ. и техн. ЯР. М., 1980. №1/10. С.59-63.
 8. Акулова Л.Г. О стохастической сложности вычисления надежности булевых систем. Ярославль: ЯГУ, 1983. 15с. Депон. в ВИНТИ №5885-83.
 9. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
 10. Отраслевая научно-техническая программа "Полномасштабный ВАБ действующих АЭС с реакторами ВВЭР". М.: Концерн "Розэнергоатом", 1993.
 11. Госатомнадзор Российской Федерации. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. ПНАЭ Г-01-011-97. Москва, 1997.
 12. МАГАТЭ. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants. IAEA-Safety Series No.75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12, Вена, Австрия, 1999.
 13. Аминов Р.З., Юрин В.Е., Маркелов Д.А. Активная система отвода остаточного тепловыделения реактора ВВЭР-1000 // Атомная энергия. 2015. Т.118, вып. 5. С. 261-266.
 14. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок: Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.
 15. Балаковская АЭС. Рабочие чертежи. Материалы изысканий. Дополнительные гидрометеорологические данные. Свердловск: «Теплоэлектропроект» Уральское отделение, 1980.
- © Проблемы энергетики, 2016, № 5-6

16. Малевинский Г.В. Вероятностный анализ безопасности АЭС «Библис» (ФРГ) // Энергохозяйство за рубежом. 1990. №4.

17. Юрин В.Е. Исследование систем активного отвода остаточного тепловыделения реакторов на базе комбинирования АЭС с многофункциональными установками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Саратов, 2015.

18. Токмачев Г.В. Подход к применению ВАБ при проектировании АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2007. Том 3, №4. С.44-53.

19. Аминов Р.З., Юрин В.Е. Оценка эффективности использования активной системы отвода остаточного тепловыделения при обесточивании на примере реактора ВВЭР-1000 // Известия РАН. Энергетика. 2014. №6. С. 61-72.

Поступила в редакцию

01 июня 2016 г.

Аминов Рашид Зарифович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловые и атомные электрические станции» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. Тел: 8(8452) 99-87-82. E-mail: oerpran@inbox.ru.

Юрин Валерий Евгеньевич – младший научный сотрудник Саратовского научного центра Российской академии наук (СНЦ РАН). Тел: 8-987-337-22-75. E-mail: urin1990777@bk.ru.

Муртазов Марат Асланович – магистрант кафедры «Тепловые и атомные электрические станции» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. Тел: 8-937-269-82-03.