https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441

УДК 539.172:543.522

# Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС

Е. П. Корсак<sup>1)</sup>, В. А. Романко<sup>1)</sup>

Реферат. Статья посвящена актуальным вопросам энергетической безопасности и управления рисками в атомной энергетике Республики Беларусь. Авторы рассматривают стратегическую значимость развития ядерной энергетики для обеспечения энергетической независимости страны, а также анализируют последствия крупных аварий на АЭС (Три-Майл-Айленд, Чернобыль, Фукусима), подчеркивая необходимость совершенствования методов оценки и минимизации рисков. Особое внимание уделено методологии вероятностного анализа безопасности (ВАБ), который применяется для анализа надежности систем, включая моделирование аварийных сценариев с использованием деревьев отказов. На примере системы фильтрации воды AAR атомной электростанции демонстрируется практическое применение метода: построены деревья отказов, рассчитана вероятность отказа системы и выявлены ключевые уязвимости (отказы электроснабжения насосов). Проведен сравнительный анализ методов оценки рисков (корректировка нормы дисконта, экспертные оценки, метод Монте-Карло и др.), выделены их преимущества и ограничения. Подчеркивается, что имитационное моделирование и ВАБ обеспечивают наиболее комплексный подход к управлению рисками, сочетая анализ технологических процессов и человеческого фактора. На основе результатов исследования предложены рекомендации по повышению надежности эксплуатации АЭС, включая регулярный мониторинг оборудования и усовершенствование систем безопасности.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, атомная энергетика, управление рисками, имитационное моделирование, вероятностный анализ безопасности, деревья отказов

Для цитирования: Корсак Е. П. Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС / Е. П. Корсак, В. А. Романко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 5. С. 428–441. https://doi.org/ 10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441

## Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management

K. P. Korsak<sup>1)</sup>, V. A. Romanko<sup>1)</sup>

Abstract. The article is devoted to current issues of energy security and risk management in the nuclear energy industry of the Republic of Belarus. The authors examine the strategic importance

Адрес для переписки Address for correspondence Корсак Екатерина Павловна Korsak Katsiaryna P. Belarusian National Technical University Белорусский национальный технический университет просп. Независимости, 65/2, 65/2, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus 220013, г. Минск, Республика Беларусь Тел.: +375 17 242-75-35 Tel.: +375 17 242-75-35 eoe@bntu.by eoe@bntu.by

<sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

<sup>&</sup>lt;sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

of developing nuclear energy to ensure the country's energy independence, and also analyze the consequences of major accidents at nuclear power plants (Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima), emphasizing the need to improve methods for assessing and minimizing risks. Particular attention is paid to the methodology of probabilistic safety analysis (PSA), which is used to analyze the reliability of systems, including modeling emergency scenarios using fault trees. The practical application of the method is demonstrated using the example of the AAR water filtration system of a nuclear power plant: fault trees are constructed, the probability of system failure is calculated, and key vulnerabilities (pump power supply failures) are identified. A comparative analysis of risk assessment methods (adjustment of the discount rate, expert assessments, the Monte Carlo method, etc.) was conducted, and their advantages and limitations were highlighted. It is emphasized that simulation modeling and PSA provide the most comprehensive approach to risk management, combining the analysis of technological processes and the human factor. Based on the results of the study, recommendations are proposed to improve the reliability of nuclear power plant operation, including regular monitoring of equipment and improvement of safety systems.

**Keywords:** energy security, nuclear energy, risk management, simulation, probabilistic safety analysis, fault trees

**For citation:** Korsak K. P., Romanko V. A. (2025) Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 428–441. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441 (in Russian)

### Введение

В настоящий момент многие страны, в том числе и Республика Беларусь, продолжают успешно эксплуатировать АЭС и приняли решение присоединиться к ядерному энергетическому сообществу. Развитие атомной энергетики имеет стратегическое значение для обеспечения энергетической безопасности и экономической независимости страны по целому ряду причин. Во-первых, оно позволяет значительно снизить зависимость от импорта энергоресурсов, диверсифицировать энергетический баланс и обеспечить стабильность энергоснабжения независимо от внешнеполитической конъюнктуры. Во-вторых, атомная энергетика дает существенные экономические преимущества - долгосрочную экономию на топливных затратах (всего 1 кг урана заменяет около 3 т угля), создает высокотехнологичные рабочие места и стимулирует развитие смежных отраслей промышленности, а также научно-технического прогресса. Важным аргументом в пользу развития атомной энергетики являются ее экологические преимущества. По сравнению с традиционной энергетикой АЭС обеспечивают существенное снижение выбросов СО2 и минимизацию углеродного следа при производстве электроэнергии, что особенно актуально в контексте глобальных климатических изменений. Кроме того, современные ядерные технологии демонстрируют постоянное совершенствование - внедряются реакторы нового поколения с улучшенными характеристиками безопасности, развиваются технологии замкнутого ядерного топливного цикла, совершенствуются системы интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

Таким образом, атомная энергетика представляет собой стратегический выбор, который сочетает в себе экономическую целесообразность, энергетическую безопасность и экологическую ответственность, что крайне важ-

но для обеспечения устойчивого развития страны в долгосрочной перспективе [1, 2].

К сожалению, крупные аварии в мировой ядерной энергетике, произошедшие в 1979 г. на АЭС Три-Майл-Айленд (США), в 1986 г. на Чернобыльской АЭС (СССР) и в 2011 г. на АЭС Фукусима-дайити (Япония), стали переломными моментами в восприятии атомной энергетики мировым сообществом. Каждая из этих катастроф, имея свою уникальную природу и последствия, продемонстрировала потенциальные риски, связанные с эксплуатацией ядерных объектов.

Авария на Три-Майл-Айленд (уровень 5 по шкале INES) выявила проблемы в проектировании систем безопасности и подготовке персонала. Чернобыльская катастрофа (уровень 7) стала беспрецедентной по масштабам радиационного загрязнения, показав опасность конструктивных недостатков реакторов РБМК. Фукусима (уровень 7) продемонстрировала уязвимость АЭС перед природными катаклизмами и важность учета внешних угроз. Эти события не только привели к человеческим жертвам, экологическому ущербу и огромным экономическим потерям, но и вызвали глубокий кризис доверия к ядерной энергетике со стороны населения и правительств многих стран.

Однако важно отметить, что каждая из этих катастроф привела к существенному совершенствованию систем безопасности, разработке новых протоколов и созданию более строгих регуляторных требований, что в целом повысило надежность современных ядерных технологий.

### Основная часть

С вводом в эксплуатацию первой Белорусской атомной электростанции вопросы оценки и управления рисками приобрели статус приоритетных задач государственной важности. Атомная энергетика, обладая значительным потенциалом для экономического и энергетического развития, несет в себе серьезные риски, способные оказать долгосрочное влияние на здоровье населения, экологическую обстановку и безопасность страны. Последствия возможных инцидентов в этой сфере могут растянуться на десятилетия, нанося урон как человечеству, так и окружающей среде [1].

Прежде чем обсуждать подходы к управлению рисками, необходимо четко определить, что именно подразумевается под этим понятием. Понимание природы риска, его источников и факторов воздействия является ключом к разработке эффективных мер по его минимизации.

Фундаментальный принцип обеспечения безопасности базируется на обратной зависимости между вероятностью реализации нежелательного события и допустимой тяжестью его последствий: с ростом частоты возникновения аварийной ситуации требования к смягчению ее воздействий ужесточаются. Данная концепция формализуется через категорию риска, являющегося ключевым параметром в вероятностном анализе безопасности (ВАБ).

В методологии ВАБ риск количественно определяется как математическое ожидание ущерба, выражаемое произведением

$$R = PC$$

где R — интегральный риск; P — вероятность возникновения события; C — ожидаемая величина последствий (ущерб).

Регламентирующие документы детализируют эту дефиницию, выделяя популяционный подход, — риск определяется как статистическая вероятность причинения вреда (включая радиационное воздействие), оцениваемая по частоте проявления негативных последствий в расчете на стандартизированную группу населения (случаев на миллион человек).

Существует огромное количество определений риска. В стандарте применяются следующие термины с соответствующими определениями: риск (risk) — сочетание вероятности события и его последствий [3]. Термин «риск» обычно используется тогда, когда существует хотя бы возможность негативных последствий. Анализ риска (risk analysis) — систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска. Анализ риска обеспечивает базу для его оценивания, мероприятий по снижению и принятию риска. Управление рисками (рискменеджмент) — это процесс подготовки и реализации мероприятий, имеющих целью снизить опасность ошибочного решения и уменьшить возможные негативные последствия нежелательного развития событий в ходе реализации принятых решений [4]. Управление риском может включать мониторинг, переоценивание и соответствие принятым решениям. Первым шагом в управлении рисками является идентификация возможных рисков.

Выявление и идентификация рисков являются важным этапом, позволяющим сформировать эффективную систему управления рисками, так как только на четко обозначенный объект можно оказать управленческое воздействие, в то время как не выявленные риски могут оказать непредсказуемое, а в некоторых случаях и катастрофическое влияние на деятельность предприятия [5, с. 198]. На основе этой информации проводятся дальнейшие исследования и оценки, которые помогают понять, насколько вероятны те или иные события и каковы их возможные последствия.

Оценка потенциальных рисков производится простейшими методами, например корректировкой нормы дисконта или методом анализа чувствительности изменения основных показателей эффективности, закрепленных в Правилах по разработке бизнес-планов инвестиционных проектов, утвержденных постановлением Министерства экономики Республики Беларусь от 31.08.2005 № 158 (далее — Правила). Практика показывает их недостаточность. Иногда используются и более продвинутые методы оценки проектного риска, такие как имитационное моделирование, в частности метод Монте-Карло. При этом еще более редко встречаются такие «изощренные» методы оценки проектного риска, как метод ликвидационной стоимости, или риск-анализ, основанный на теории нечетких множеств. Основные преимущества, недостатки и область применения различных методов приведены в табл. 1.

## Таблица 1

## Методы оценки рисков Risk assessment methods

Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
Метод	<ul> <li>основан на повышении ис-</li> </ul>	<ul><li>имеет ограничения</li></ul>	<ul> <li>оценка инвести-</li> </ul>
корректи-	ходной безрисковой ставки дис-	возможностей моделирова-	ционных проектов;
ровки	контирования за счет включения	ния различных вариантов;	<ul><li>– бизнес-планиро-</li></ul>
нормы	дополнительной премии, отра-	<ul> <li>чрезмерно чувствите-</li> </ul>	вание и стратегиче-
дисконта	жающей уровень риска. Глав-	лен к изменениям в пара-	ское управление;
	ным достоинством метода явля-	метрах финансовой модели	<ul><li>управление про-</li></ul>
	ется минимальная трудоемкость		ектными рисками
	расчетных процедур	1 1	
Метод	– создается группа экспертов,	– дефицит профильных	– инвестиционный
эксперт-	включающая профессионалов в области инвестиционного анали-	специалистов, способных	и финансовый анализ;
ных оценок	за, строительной отрасли и фи-	проводить квалифициро- ванную оценку;	<ul> <li>стратегическое</li> <li>планирование и мар-</li> </ul>
оценок	нансового менеджмента;	– субъективность pe-	кетинг;
	<ul> <li>каждый участник эксперт-</li> </ul>	зультатов, обусловленная	<ul><li>научные иссле-</li></ul>
	ной группы независимо оцени-	личным опытом и компе-	дования и разработки;
	вает все категории рисков, фор-	тенциями привлекаемых	– риск-менедж-
	мируя индивидуальные выводы	экспертов;	мент
	по каждому из них	<ul> <li>потенциальное иска-</li> </ul>	
		жение данных из-за устой-	
		чивых когнитивных иска-	
		жений в экспертной среде	
Анализ	<ul><li>не нуждается в привлече-</li></ul>	<ul><li>- «тоннельный» анализ,</li></ul>	<ul><li>инвестиционный</li></ul>
чувстви-	нии дополнительных данных,	игнорирующий синергети-	и финансовый анализ;
тельности	используя только имеющиеся	ческий эффект взаимовли-	– управление про-
	исходные параметры;	яющих факторов;	ектами;
	– наглядно демонстрирует за-	<ul> <li>искусственное выде-</li> <li>ление одного изменяемого</li> </ul>	– стратегическое
	висимость конечных результатов проекта от изменения ключевых	параметра при неизменно-	планирование; – научные иссле-
	входных переменных	сти прочих условий	дования и разработки
Метод	<ul><li>– формирует прозрачную</li></ul>	<ul> <li>направленность иссле-</li> </ul>	– управление про-
сценариев	сравнительную матрицу резуль-	дования только на пове-	ектами;
развития	татов для различных стратегий	дение результирующих	– маркетинг;
проекта	выполнения проекта;	показателей (NPV, IRR, PI);	– производствен-
	<ul> <li>выявляет степень влияния</li> </ul>	– отсутствие учета воз-	ная деятельность;
	изменяющихся факторов на ре-	можности отклонений по-	<ul> <li>государственное</li> </ul>
	зультирующие экономи-	токов платежей	управление и соци-
	ческие показатели		альные проекты
Метод	<ul> <li>предоставляет четкое гра-</li> </ul>	<ul><li>– характеризуется:</li></ul>	– для оценки рис-
построения		повышенной трудоем-	ков инвестиционного
«дерева	ных сценариев развития проекта;	костью расчетных про-	проекта, реализуемого
решений»	– позволяет наглядно анали-	цедур;	в течение длительного времени и имеющего
	зировать потенциальные изменения на всех этапах реализа-	субъективностью при	два или более после-
	ции;	определении вероятно- стных характеристик;	довательных решений
	<ul> <li>– служит эффективным ин-</li> </ul>	сложностями в дости-	nwienen pemennn
	струментом для диагностики и	жении согласованных экс-	
	решения проблемных ситуаций;	пертных оценок	
	<ul> <li>дает возможность прово-</li> </ul>	-	
	дить структурированный анализ		
	сложных проектных задач;		
	<ul> <li>обеспечивает количест-</li> </ul>		
	венную оценку финансовых по-		
	следствий различных вариантов реализации		
	реализации		

Окончание табл. 1 End of the Table 1

онное структурой;	Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
онное модели отруктурой; структурой; — позволяет получить весьма надежные результаты, свидетельствующие об устойчивости и доходности проекта  Метод ность и понятность; — трудности исчисления коэффициентов достоверности, адекватных риску — то декватных риску — то предприятия; — зависимость от корректности и сто сущность и ото со день выводы положет объть проданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает потени и сто сущность и стоки доходов от деятельности компании в будущем то собенно важно на ранних этапах го использованием теории нечетких множеств необходимности пречати мости компании в будущем таки и отдельных и качественных и качественных и качественных и качественных и данных данных объектов тенерации и ин качественных и качественные выводы потреблении это от предраельных и качественных и качественные выводы потреблении энергии стоя и потреблении ното объединения количественных и качественные выводы потреблении энергии систом опрожетию; — зависимость от корленных и качественные обходим знаний предметности; — анализ рисков при строительстве и эксплуатации энергетичестве, учет неопределенности и потреблении энергои об объектов; — оценка надежности и правил нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменениям факторов риска без при об объектов; — оценка надежности и потреблении энергоистем, учет неопределенности	Имитаци-	<ul> <li>позволяет работать с вход-</li> </ul>	<ul> <li>сложность выполне-</li> </ul>	<ul><li>производство</li></ul>
рование надвежные результаты, свидетельствующие об устойчивости и доходности проекта  Метод достоверных эквинаванного коэфщиентов достоверности, адекватных риску  Метод достоверных эквинаванного коэфщициентов достоверности, адекватных риску  Метод диал компании как действующеного предприятия;  — метод не учитывает потентивность и его существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидащионной стоимости и его сущемые потоки доходов от деятельности компании в будущем об сиспольрование об тепрории нечетких множеств гории нечетких множеств необходиности проекта; — возможность объединения каждого риска; — сложность построения вероятностиой модели и множества вычислений (ВИЭ);  — метод межет быть не эффективен для высокодинамичных систем или при оденка влияния под-ключения новых объектов тенерации или потребления; — зависимость от корректности исходных данных моделей; — планирование (ВИЭ);  — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов тенерации или потребления; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов тенерации или потребления; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — планирование нафективен для выскоды и множения фодельных моделей; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — планирование нафективных моделей; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — от темет для и м	онное		ния вследствие необходи-	
рование надвежные результаты, свидетельствующие об устойчивости и доходности проекта  Метод достоверных эквинаванного коэфщиентов достоверности, адекватных риску  Метод достоверных эквинаванного коэфщициентов достоверности, адекватных риску  Метод диал компании как действующеного предприятия;  — метод не учитывает потентивность и его существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидащионной стоимости и его сущемые потоки доходов от деятельности компании в будущем об сиспольрование об тепрории нечетких множеств гории нечетких множеств необходиности проекта; — возможность объединения каждого риска; — сложность построения вероятностиой модели и множества вычислений (ВИЭ);  — метод межет быть не эффективен для высокодинамичных систем или при оденка влияния под-ключения новых объектов тенерации или потребления; — зависимость от корректности исходных данных моделей; — планирование (ВИЭ);  — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов тенерации или потребления; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов тенерации или потребления; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — планирование нафективен для выскоды и множения фодельных моделей; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — планирование нафективных моделей; — планирование развития энергоистем: оценка влияния под-ключения новых объектов генерации или потребления; — от темет для и м	модели-	структурой;	мости количественной	– энергетические
тельствующие об устойчивости и доходности проекта  Метод достоверных эквиванентов валентов в сталентов валентов в сталентов в сталент	рование	<ul> <li>позволяет получить весьма</li> </ul>	оценки вероятности для	системы и сети;
метод переходных процессов; — планирование оденка влиятия лод-ключения новых объемтов готории дим предприятия; — в условиях кризиса или низкого спроса активы могут быть продавы с существенным дисконтою; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании и в будущем теории нечетких множеств поваоляет адаптироваться к изменечетких множеств необходимости прессчате в сем нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; — в озможность объединения количественных и качественных данных ланных и качественных данных данных и качественных данных данных данных данных данных и качественных данных д	1	надежные результаты, свиде-	каждого риска;	– возобновляемые
Метод достоверных эквивалентов   ним вероятностной модели   миножества вычислений   миножества может быть нефективен для высокодинамичных систем или при моделировании быстрых переходных процессов; — сложность разработки поделка влияния подключения новых объектов генерации или потребления; — зависимость от корректности исходных данных   моделировании быстрых переходных процессов; — сложность разработки развития энергосистем: оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — планирование денка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления   — оценка влияния подключения подключения новых объектов г		тельствующие об устойчивости	<ul> <li>сложность построе-</li> </ul>	источники энергии
— простота расчетов, доступность и понятность; — трудности исчисления может быть неэфективен для высокодиь правития энергосистем: обреживалентых постомность разработки переходных процессов; — сложность разработки переходных процессов; — сложность разработки переходных процессов; — сложность разработки потребления; — зависимость от корректности исходных данных потребления; — метод не учитывает потенциал компании как действующего по предприятия; — в условиях кризиса или и наякого спроса активы могут быть проданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем Оценка потоки доходов от деятельности компании в будущем Сеннов важно на ранних этапах с использованием теории нечетких множеств позволяет адаптироваться к изторыемыем потребления потребления потребления потребления потребления потребления и потребления потребления потребления потребления потребления потребления потребления и потребления потребления и потребления		и доходности проекта	ния вероятностной модели	
развития энергосистем: намичных систем или при моделировании быстрых перекодных процессов; — сложность разработки эквивалентных моделей; — зависимость от коректности исходных данных — позволяет работать с непроектноги продекта; — позволяет работать с непроекта потем важно на ранних этапах с использованием проекта; — теории нечетких множеств позволяет адаптироваться к изножения макторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных и потребления или потребления; — сложность от коректности исходных процессов; — сложность от коректности исходных процессов; — сложность от коректности исходных данивания подектововеного и профессиональных информацией или потребления; — планирование оценка влияния подектовостов, — сложность от кореметности исходных данний по своей сущности метод и требует наряду с профессиональных и потребления; — планировании быстрых профессиональных потребления; — планировании быстрых профессиональное потребления; — планирование от кореметности и потребления; — планирование от кореметных моделей; — зависитьственных постов нетости и потребления; — планирых		-	и множества вычислений	
ных эквивалентов коэффициентов достоверности, адекватных риску  — трудности исчисления коэффициентов достоверности, адекватных риску  — сложность разработки эквивалентных моделей; — зависимость от корректности исходных данных  — торданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем оценка положность и остовнованием положность и нечетких множеств позволяет работать с непровектного риска с использованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных и хачественных данных и хачественных и качественных данных и хачественных данных и хачественных и качественных данных систем или пили потребления подемислования прессов; — сложность откор-ректносты и постований постосов, — сложность откор-ректносты и постовенных моделей; — зависимость откор-ректносты и исходных дании потребления; — планирование развития энергосистем: оценки я овае объектов генерации или потребления; — планирование развития энергосистем: оценки по своей сущности мето и грудоессивльной командой разработчиков еще и квалифицированный штат оценциков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов — оценка надиметоры и потребления потребления; — планирование развития энергоцистем: оценка влияния под-ключения потребления; — планирование развития энергосистем: оценка влияния под-ключения потребления; — планирование развития энергоситем: оценка влияния под-ключения потребления; — подектов генерации или потребления; — подектов гене	Метод	<ul> <li>простота расчетов, доступ-</li> </ul>	<ul> <li>метод может быть не-</li> </ul>	– планирование
валентов коэффициентов достоверности, адекватных риску  — сложность разработки эквивалентных моделей; — зависимость от корректности исходных данных  — метод не учитывает потенционной стоимости и редприятия; — в условиях кризиса или и накого спроса активы могут быть проданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка потоки доходов от деятелориска с использованием теории нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; — в озможность объединения как действующе- стоимости и требует глубоких знаний предметности;  — создание функций посвоей сущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчинам на материальные активы — здания, оборудование, товарноматериальные полной информацией, что особенно важно на ранних этапах проекта; — теория нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; — в озможность объединения дакисмоть от корректности исходных данных потребления или потребления, потребления или потребления, потребления или потребления, потребления и потребления потребления или потребления или потребления, потребления и потребления и потребления и потребления и потребления и потребления и потреблении или потребления и потребления и потребления и потребления и потребления и потреблении или потребления и потребления развисия объектов и потребления и потреблени	достовер-	ность и понятность;	эффективен для высокоди-	развития энергосистем:
адекватных риску  переходных процессов; — сложность разработки эквивалентных моделей; — зависимость от корректности исходных данных  — метод не учитывает потенциал компании как действующего предприятия; — в условиях кризиса или низкого спроса активы могут быть проданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем дисконтом; — позволяет работать с непорикти потребления уственных объектов  — позволяет работать с непории нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных данных и качественных данных данных и качественных данных	ных экви-	<ul> <li>трудности исчисления</li> </ul>	намичных систем или при	оценка влияния под-
— сложность разработки эквивалентных моделей; — зависимость от корректности исходных данных — метод не учитывает потенциал компании как действующето предприятия; — в условиях кризиса или нечетских множеств польоги и сосоности состольога с использованием теории нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменениям факторов риска бел необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных и потребления; — планирование развития энергосистем: оперектности исходных данных моделей; — зависимость ог корректности исходных данных потем потем потем дактовы тельности компании в будущем — позволяет работать с непоходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных и качественных данных объектов — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; — оценка надежности в производстве количественные выводы — потребления; — планирование развисимость ог корректности исходных данных моделей; — префсети метод и требует тельности компании в будущем ственных объектов — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетенные выводы и потреблении энергии отребления потребления; — планирование развития энергосистем: оперекстион опотребления потребления потребления потребления потребления потребления потребует сущности метод и требует наряду с профессиональные сущности метод и требует тельного с инвестициямии в матерыальные активы опереженого и темер и ток командой разработчи-ков еще и квалифицированием как в целом бызне и потребления потреблени	валентов	коэффициентов достоверности,	моделировании быстрых	ключения новых объ-
Эквивалентных моделей;		адекватных риску	переходных процессов;	ектов генерации или
— зависимость от корректности исходных данных			<ul> <li>– сложность разработки</li> </ul>	потребления;
Метод пиквидационной стоимости и его сущности и ректности и сходных данционной дисконтом; — метод не учитывает потенность научитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем обенно важно на ранних этапах обентов нечеткой логики требует глубоких знаний предметной логики требует строительстве и экспруатации энергетических объектов; — оценка влиянии потреблении энергоция, как в целом бизнеса, такт в и отдельных имущественных объектов — создание функций поднежить объектов — создание функций подеми начети острудование, такт в подетка, строительстве и экспруатации энергетических объектов; — оценка влияния подекта, точения но командой разработчи ков еще и квалифицированные активы о дении в материальные сущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчи ков еще и квалифициро ванный штат оценщиков как в целом бизнеса, такты и отдельных имущественных имущественных имущественных объектов — остраньными потреметь ной коман				•
Метод ликвидациал компании как действующего предприятия; потребления новых объектов генерации или потребления поток компании в будущем пость польности компании в будущем проектного риска с использованием потоки доходов от деятеррии подволяет адаптироваться к изменечтких менетиких менети			1	
Метод ликвида- циал компании как действующего предприятия; — в условиях кризиса или и его сущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчиков еще и квалифицирование, товарноматериальные активы — здания, оборудование, товарноматериальные активы — здания, оборудование, товарноматериальные потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории полной информацией, что особенно важно на ранних этапах с использованием теории поволяет адаптироваться к изменениям факторов риска без показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных			ректности исходных дан-	
Метод ликвидационной стоимости и его сущности и его сущность в условиях кризиса или и его сущность быть проданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств теории нечетких множеств показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных и качественных и качественных данных посвоей сущности метод и требует наряду с профессиональное сущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчиков еще и квалифицированный штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов  — осущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчиков еще и квалифицированный штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов  — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качественные или качественные выводы  — оценка надежности учет неопределенности энергосистем, учет неопределенности эпериа ственные выводы  — оценка пости за трубожи знаний предметности учет неопределенности з производстве и потреблении энергии  — опрученные по с командой разработчиком как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов  — создание учимые объектов  — отвенных объектов  — отвенных объектов  — отвенных объектов  — отвенных объектов  — опрученные нечеткие на кативы от ком ванный штат оценщиком как в целом бизнеса, так и отдельных и материальные активые объективного и правил, обости;  — опрученные нечетким ности ученные на поток и править от кам и отвенн			ных	ключения новых объ-
Петод ликвидационной стоимости и его сущность наряду с профессиональной командой разработчиность из проданы с существенным дисконтом;  — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных и качественных и качественных и качественных данных и качественных и качественных и качественных и качественных данных и качественных и качественных и качественных и качественных и качественных данных и качественных данных и качественных данных и качественных и качественных данных постои требует горофессиональные сущности метод и требует наряду с профессиональные ной командой разработчиново и командой разработчиново и командой разработчиново и командой разработчиново и командой разработчиновтел уственным командой разработчиново и командой разработчиново и командой разработчиново ком бизнеса, так и отдельных имущественных и отденки мущественных и правил предмет горобка и потром информацией, что особенно важно на ранных штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных и отдельных и и потрем и примадлежности и правил предмет горобка и потром информацией, что особенно важно на ранных штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных и отдельных имущественных и правил предмет горобка и потром информацией, что особенно важной и потрем занного с инвестиция ми в материальные активы — эдания, обоформ и вактивы — занный штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных и правил предмет горобка и польченые и позволяет в нечеткой люченные и потром информацие, что объектов польченные и потром информ и правил нечеткие и правил нечеткой люченным предмет горобка и потром и правил нечетков				1
пиквидационной стоимости и его сущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчиков еще и квалифицирование, товарноматериальные и как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств теории нечетких множеств множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных и и и правим и как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных и мущественных и мущественных и как в целом бизнеса, так и отдельных и как в целом бизнеса, так и отдельно				потребления
то предприятия;  — в условиях кризиса или и его сущность изкого спроса активы могут быть проданы с существенным дисконтом;  — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных и качественных и качественных и качественных данных  Наряду с профессиональной командой разработчиков активы — здания, обороднаюти ков еще и квалифицированный штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов  — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; — полученные нечеткие количественные или качественные или качественные или качественные или качественные выводы  — потреблении энергии нактивы — здания, обородого рудование, товарноматериальные активы — здания, обородом рудование, товарноматериальные ценности;  — анализ рисков при принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качественные выводы				
теории позволяет адаптироваться к изменечетких множеств теории нечетких множеств показателей проекта;  — в условиях кризиса или низкого спроса активы могут быть проданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Ощенка проектного риска с использованием теории нечетких множеств теории нечетких множеств теории нечетких множеств множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных  — возможность объединения количественных данных  — возможность объединения командой разработчи-ков еще и квалифициро-ванный штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов  — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области;  — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетовенные или качетовенные или качетовенные выводы  — полученные нечеткие четкие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетовенные выводы  — активы — здания, обо-ридоков ещенности;  — анализ рисков при строительстве и эксплуатации энергсических объектов;  — оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетовенные и потреблении энергии от темености;  — полученые строительстве и от темености;  — полученные нечеткие как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предмета и полученные нечеткие четком объектов.  — позволяет адаптироваться как в целом бизнеса, так и				
и его сущность быть проданы с существенным дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств пожазателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных  ков еще и квалифицированний штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных имущественных имущественных объектов  — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетоти в производстве и потреблении энергии				
быть проданы с существенным дисконтом;  — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменечятких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных и качественных и качественных и качественных данных				
дисконтом; — метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных и качественных и качественных и качественных и как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных имущественных имущественных объектов  — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетовенные или качетовенных и качественных данных  — метод не учитывает ожидата и отдельных имущественных имущественных и потраблении энергических объектов; — оценка надежности учет неопределенности энергосистем, учет неопределенности в производстве количественные или качественные выводы	-			
− метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;      − возможность объединения количественных и качественных и качественных данных      − метод не учитывает ожидаемности и отдельных имущественных объектов      − создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области;      − полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетоти в производстве и потреблении энергии ственные выводы      так и отдельных имущественных имущественных имущественных имущественных имущественных имущественных имущественных инфикций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области;      − полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качественные выводы	ность	= = =	1 ' '	1
емые потоки доходов от деятельности компании в будущем  Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных и качественных данных  — емые потоки доходов от деятельности и объектов  — создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметноских объектов;  — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетовнные или качетовнные или качетовнные выводы  — анализ рисков при принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметноских объектов;  — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качетовнные выводы				ценности;
Тельности компании в будущем Оценка проектного риска с исполь- зованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных данных  Тельности компании в будущем  — позволяет работать с не- полной информацией, что осо- бенно важно на ранних этапах проекта;  — теория нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных данных  — позволяет работать с не- полной информацией, что осо- принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметности в проительстве и экс- плуатации энергетиче- ских объектов;  — оценка надежности в конкретные количественные или каче- ственные выводы  — анализ рисков при строительстве и экс- плуатации энергетиче- ских объектов;  — оценка надежности в произодстве и оти энергосистем, учет неопределенности в производстве и потреблении энергии  — теория нечеткой логики требует глубоких знаний предметности учет неопределенности в производстве и потреблении энергии  — оценка надежности и правил принадлежности и правил проительстве и экс- полученные нечеткие количественные и потреблении энергоистем, учет неопределенности в производстве и потреблении энергии оценки не всегда легко превести в конкретные и потреблении энергии оценки нечеткие определенности учет неопределенности учет неопределенности в проительстве и экс- полученные нечеткие оценки не всегда легко пределенности учет неопределенности учет неопределенно				
Оценка проектного полной информацией, что осориска с использованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных данных			ственных ооъектов	
проектного риска с исполь- зованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных данных	Overven			
риска с исполь- зованием теории нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта;  — возможность объединения количественных данных				
с исполь- зованием теории позволяет адаптироваться к из- множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных данных	-			
зованием теории позволяет адаптироваться к изнечетких менениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных — теория нечетких множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных — теория нечетких множеств ной области; — полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качественные выводы и потреблении энергии ственные выводы	-	_		
теории позволяет адаптироваться к изнечетких менениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных — полученые нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качественные выводы и потреблении энергии ственные выводы		1		,
менениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; — возможность объединения количественных и качественных данных		-	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
множеств необходимости пересчета всех показателей проекта; перевести в конкретные или каче-количественные или качественных и качественных данных	-			-
показателей проекта; количественные или каче- возможность объединения количественных и качественных данных				
– возможность объединения количественных и качественных данных				
количественных и качественных данных				peomenin oneprini
данных				
	* Истон	, ,	197: 5: 6]	L

Из данных таблицы видно, что наукой и практикой предлагается целый спектр методов для оценки рисков, каждый из которых имеет как свои преимущества, так и недостатки. Рассмотрим применение метода имитационного моделирования, основанного на методе Монте-Карло. Важной составляющей этого процесса является вероятностный анализ безопасности, позволяющий количественно оценить риски, связанные с эксплуатацией ядерных объектов, и предпринять меры для их минимизации. Вероятностный анализ безопасности помогает систематизировать данные о рисках и определить, какие сценарии развития событий представляют наибольшую опасность [6].

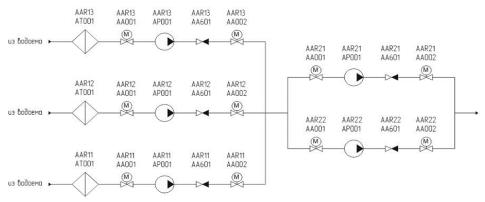
ВАБ становится все более важным инструментом для проверки детерминистских проектных решений. Он основан на оценке вероятностей отказа ядерной паропроизводящей установки путем разложения на независимые составляющие [7, 8]. Используемые методы дают принципиально новое представление о безопасности проекта и обладают рядом ключевых преимуществ, таких как:

- глубокий анализ технологических процессов, способствующий четкому пониманию взаимодействия оборудования и персонала как в штатных условиях, так и в аварийных ситуациях;
- комплексный подход, обеспечивающий всестороннюю оценку надежности установки и ее уровня безопасности.

Этот анализ позволяет получить более полное и объективное представление о рисках и устойчивости системы [9, 10]. ВАБ в сочетании с анализом запроектных аварий (ЗПА) формирует методологическую основу для:

- селекции аварийных сценариев, требующих разработки управляющих инструкций, на основании их значимого вклада в интегральные показатели безопасности;
- оптимизации защитных мероприятий, направленных на повышение безопасности энергоблока, посредством оценки влияния ключевых систем и оборудования на вероятностные индикаторы надежности.

Рассмотрим систему AAR, которая используется на атомных электрических станциях для фильтрации воды из водоема-охладителя и передачи ее потребителям. Система включает три аппаратных насоса с фильтрами (каждый производительностью 50 %), а также два насоса повышения давления (производительность 100 %). При нормальной эксплуатации в работе постоянно находятся два аппаратных насоса с фильтрами и один насос повышения давления. Технологическая схема системы приведена на рис. 1.



Puc. 1. Технологическая схема системы AAR (источник: собственная разработка)

Fig. 1. Technological scheme of the AAR system (source: own development)

Для разработки моделей надежности систем в настоящей работе принята широко используемая в мировой практике методология дерева отказов (ДО).

Графики ДО представляют собой логическую диаграмму в форме дерева (разомкнутого графа), которая включает следующие компоненты:

вершинное событие дерева (отказы системы); промежуточные события, подлежащие анализу в этом дереве; первичные (базисные) события (отказы элементов системы или ошибочные действия персонала) [11].

При моделировании системы не рассматриваются: отказы по общей причине на ложное изменение положения электроприводной арматуры (ЭПА); возможность образования рециркуляции через резервную ветку при ложном открытии ЭПА ввиду наличия обратных клапанов; неготовность оборудования из-за вывода в ремонт; не рассматриваются ошибки персонала (табл. 2).

Таблица 2
Базисные события, моделирующие рассматриваемые отказы
Basic events modeling the failures under consideration

№	Наимено- вание элемента	Маркировка (KKS код)	Тип отказа	Вероятность отказа	Требуемое время работы, ч (Mission Time)	Модель отказа
1	2	3	4	5	6	7
1	Фильтр	AAR13AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
2	ЭПА на всасе	AAR13AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	ı	Probability (Constant)
2	на всасе	AAKIJAA001	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
3	Насос с электро-	AAR13AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	-	Probability (Constant)
3	приводом	AAKI3AF001	Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
4	ОК на напоре насоса	AAR13AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	-	Probability (Constant)
5	ЭПА на напоре	AAR13AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	-	Probability (Constant)
3	насоса	AAKIJAA002	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
6	Фильтр	AAR12AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
7	ЭПА на всасе	AAR12AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	-	Probability (Constant)
/	на всасе	AAK12AA001	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
8	Насос с электро-	AAR12AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	ı	Probability (Constant)
0	приводом	AAK12AF001	Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
9	ОК на напоре насоса	AAR12AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	-	Probability (Constant)
10	ЭПА	AAR12AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	-	Probability (Constant)
10	на напоре насоса	AAN12AAUU2	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
11	Фильтр	AAR11AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
12	ЭПА на всасе	AAR11AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	_	Probability (Constant)
12	насоса	ZUMITAA001	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)

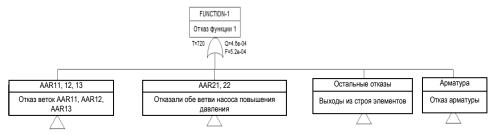
Окончание табл. 2 End of the Table 2

1	2	3	4	5	6	7
13	Насос с электро-	AAR11AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	-	Probability (Constant)
13	приводом	AAKITAFUUT	Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
14	ОК на напоре насоса	AAR11AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	_	Probability (Constant)
15	ЭПА на напоре	AAR11AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	_	Probability (Constant)
13	насоса	AAKITAA002	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
16	ЭПА на всасе	AAR21AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	_	Probability (Constant)
10	насоса	74711277171007	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
17	Насос повы- шения давле-	AAR21AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	_	Probability (Constant)
1 /	ния с элек- троприводом	AARZIAI 001	Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
18	ОК на напоре насоса	AAR21AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	_	Probability (Constant)
19	ЭПА на напоре	AAR21AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	_	Probability (Constant)
19	на напоре	AAK21AA002	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
20	ЭПА на всасе	AAR22AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	_	Probability (Constant)
20	насоса	AAK22AA001	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
21	Насос повы- шения давле-	AAR22AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	-	Probability (Constant)
21	ния с элек- троприводом	7111122711 001	Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
22	ОК на напоре насоса	AAR22AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	_	Probability (Constant)
23	ЭПА	AAR22AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	_	Probability (Constant)
23	на напоре насоса	AARZZAAUUZ	Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)

Моделируются следующие функции, выполняемые системой: фильтрация и передача ее потребителям в течение 720 ч. Моделируемым функциям соответствуют следующие критерии успеха: Функция 1, считается выполненной, если в течение 720 ч в работе находятся два аппаратных насоса с фильтрами и один насос повышения давления, состояние арматуры обеспечивает поступление воды к потребителям рис. 2, 3.

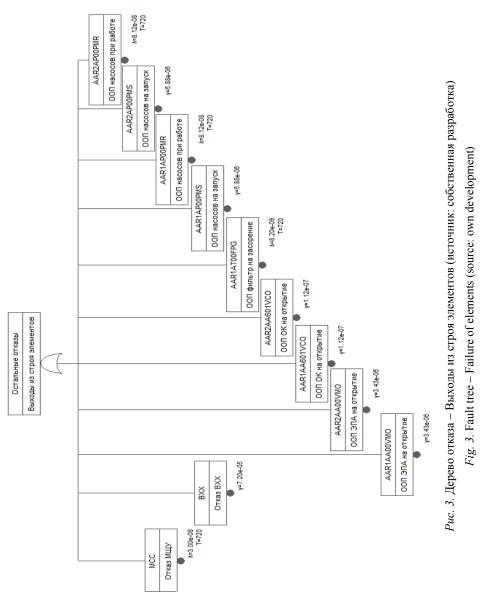
В результате анализа деревьев отказов для моделируемой функции выявлены минимальные сечения отказов, которые представлены на рис. 4.

Среднее значение вероятности отказа системы по Функции 1 составляет 0,00046, что свидетельствует о том, что за 720 ч запланированной работы данной конфигурации до технического обслуживания отказ возможен один раз за 2200 периодов эксплуатации.



*Puc. 2.* Дерево отказа FUNCTION-1 – Отказ системы по Функции 1 (источник: собственная разработка)

Fig. 2. Fault tree FUNCTION-1 – System Failure Function 1 (source: own development)



Доминирующие минимальные сечения отказов системы по Функции 1 представлены на рис. 4.

Mission time:         720         Top gate:         FUNCTION+1         ✓         Limit:         © Exact calculation         Compute         Clipboard           Executive Summary Probabilities         Minimal cuts set Importance Sensitivity         %         W         Name         Description           1         Order         Q         %         W         Name         Description           2         1         7.2e-05         12.52959999999999         8.11935+08         AAR1AP00PMR         OOTH vaccoes npu pa6ore           3         1         5.84623+6.05         12.5295999999999999999999999999999999         8.11935+08         AAR1AP00PMR         OOTH vaccoes npu pa6ore           8         1         5.84623+6.05         12.5295999999999999999999999999999999999	XFTA calculations engine	ns engine						×
W         Name           0.0         BXX         Orxas BXX           9999; 8.11953e-08         AAR1AP00PMR         OOTI насосов при работе           9999; 8.11953e-08         AAR2AP00PMR         OOTI насосов при работе           0000c 9,41167e-08         AAR12AP001PMR         Orxas при работе насоса           0000c 9,41167e-08         AAR1AAP001PMR         Orxas при работе насоса           0000c 9,41167e-08         AAR1AAP001PMR         Orxas при работе насоса           000         9,41167e-08         AAR1AAP001PMR         OOTI насосов на запуск           0.0         AAR1AAT00FPG         OOTI насосов на запуск           0.0         AAR1AAT001FPG         OOTI насосов на запуск           9.54194e-09         AAR1AAT001FPG         3acopeние фильтра           9.54194e-09         AAR11AT001FPG         3acopeние фильтра	Mission time:			>	imit:	▼ Exact ca		
W         Name         Orxas BXX           0.0         BXX         OT MASS BXX           9999; 8.11953e-08         AAR1AP00PMR         OOT Hacocos πρи pa6ore           0000c 9,41167e-08         AAR12AP00PMR         OT Hacocos πρи pa6ore           0000c 9,41167e-08         AAR13AP001PMR         Orxas πρи pa6ore Hacoca           0000c 9,41167e-08         AAR13AP001PMR         Orxas πρи pa6ore Hacoca           0000c 9,41167e-08         AAR14AP001PMR         Orxas πρи pa6ore Hacoca           0.0         AAR1AT00FPG         OOΠ Hacocos Ha sancyck           0.0         AAR1AT00FPG         OOΠ Hacocos Ha sancyck           0.0         AAR1AT001FPG         OOΠ Hacocos Ha sancyck           9.54194e-09         AAR1AT001FPG         OOΠ Hacocos Ha sancyck           9.54194e-09         AAR1AT001FPG         SacopeHine фильтра								
#         Order         Q         %         W         Name           1         7,2e-05         15,4399         0.0         BXX         OTASB BXX           2         1         5,84623e-05         11,5295999999999999999999999999999999999	Executive Summar	y Probabilities Min	imal cuts set Impor	tance Sensitivity				
1         7.2e-05         15.4309         0.0         BXX           2         1         5.84623e-05         12.5295999999999         8.11953e-08         AAR1AP00PMR           3         1         5.84623e-05         12.52959999999999         8.11953e-08         AAR1AP00PMR           4         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           5         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           6         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           8         1         2         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           8         1         2         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           8         1         2         1.28538e-05         1.26532999999999         8.19956e-09         AAR1AP00PMS           9         1         5.88e-06         1.265329999999999         8.19956e-09         AAR1AP00PMS           11         1         5.88e-06         1.2653299999999999         8.54194e	#	Order	O	%	M	Name	Description	_
2         1         5.84623e-05         12.529599999999         8.11953e-08         AARIAPOODNAR           3         1         5.84623e-05         12.5295999999999         8.11953e-08         AARIAPOODNAR           4         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AARIAPOODNAR           5         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AARIAPOODNAR           6         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AARIAPOODNAR           7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AARIAPOODNAR           8         1         2.2886-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AARIAPOODPAR           8         1         2.15998e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AARIAPOODPAR           9         1         5.90398e-06         1.265923         2.99994e-08         AARIAPOODPAR           10         1         5.88e-06         1.265929         0.0         AARIAPOODPAR           11         1         5.88e-06         1.265929         0.0         AARIAPOODPAR           12         2         3.44063e-06         0.7337391         9.5419	-	-	7.2e-05	15.4309	0.0	BXX	Отказ ВХХ	
3         1         5.84623e-05         12.5295999999999         8.11933e-08         AARZAPODDHMR           4         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR12AP001PMR           5         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR13AP001PMR           6         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           8         1         2.15998e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR1AP001PMR           9         1         5.90398e-06         1.265329999999999         8.19955e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26519         0.0         AAR1AP00PMS           11         1         5.88e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AT001FPG           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG	2	_	5.84623e-05	12.52959999999999	8.11953e-08	AAR1AP00PMR	ООП насосов при работе	
4         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR12AP001PMR           5         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR21AP001PMR           6         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR1AP001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR1AP001PMR           9         1         5.90398e-06         1.26532999999999         8.19955e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26519         0.0         AAR1AT00FPG           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AF00PMS           12         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AT001FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AT001FPG	8	_	5.84623e-05	12,52959999999999	8.11953e-08	AAR2AP00PMR	ООП насосов при работе	
5         2         3.39812e-05         7.282810000000000         9.41167e-08         AAR13AD001PMR           6         2         3.39812e-05         7.282810000000000         9.41167e-08         AAR12AD001PMR           7         2         3.39812e-05         7.282810000000000         9.41167e-08         AAR11AD001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR13AD001PMR           9         1         5.90398e-06         1.26532999999999         8.19955e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26519         0.0         AAR1AT00FPG           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AF00FPG           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AFD01FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG		2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR12AP001PMR	Отказ при работе насоса	
5         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AARZ1AP001PMR           6         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR11AP001PMR           7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR11AP001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR13AP001PMR           9         1         5.90398e-06         1.26532999999999         8.19956e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26519         0.0         AAR1AT00FPG           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AT00FPG           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AT001FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG						AAR13AP001PMR	Отказ при работе насоса	
6         2         3.39812e-05         7.282810000000000         9.41167e-08         AAR12AP001PMR           7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR11AP001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR13AP001PMR           9         1         5.90398e-06         1.265329999999999         8.19956e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26519         0.0         AAR1AT00FPG           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AF00PMS           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AT001FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG		2	3.39812e-05	7,2828100000000000	9.41167e-08	AAR21AP001PMR	Отказ при работе насоса	
6         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR11AP001PMR           7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR11AP001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR13AP001PMR           9         1         5.90398e-06         1.26532999999999         8.19956-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AT00FPG           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AP00PMS           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AT001FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG						AAR22AP001PMR	Отказ при работе насоса	
7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR11AP001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR13AP001PMR           9         1         5.90398e-06         1.26532999999999         8.19995e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AT00FPG           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AP00PMS           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AT001FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG		2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR11AP001PMR	Отказ при работе насоса	
7         2         3.39812e-05         7.28281000000000         9.41167e-08         AAR11AP001PMR           8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         MCC           9         1         5.90398e-06         1.26532999999999         8.19956e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR2AP00PMS           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AP00FPMS           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR1AP001PMR           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG						AAR12AP001PMR	Отказ при работе насоса	
8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         AAR13AP001PMR           9         1         5.90398e-06         1.26532999999999         8.19995e-09         AAR1AT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR2AP00PMS           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AAR1AP00PMS           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR12AT001FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AAR11AT001FPG		2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR11AP001PMR	Отказ при работе насоса	
8         1         2.15998e-05         4.62923         2.99994e-08         MCC           9         1         5.90398e-06         1.26532999999998         8.19956-09         AARIAT00FPG           10         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AARIAPO0PMS           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AARIAPO0PMS           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AARIAT001FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AARI1AT001FPG						AAR13AP001PMR	Отказ при работе насоса	
9 1 5.90398e-06 1.2653299999999 8.1995e-09 AAR1AT00FPG 10 1 5.88e-06 1.26019 0.0 AAR2AP00PMS 11 1 5.88e-06 1.26019 0.0 AAR1AP00PMS 12 2 3.44063e-06 0.737391 9.54194e-09 AAR1AT001FPG 13 2 3.44063e-06 0.737391 9.54194e-09 AAR11AT001FPG	8	_	2.15998e-05	4.62923	2.99994e-08	MCC	Отказ МЩУ	
10         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AARZAPO0PMS           11         1         5.88e-06         1.26019         0.0         AARIAPO0PMS           12         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AARIATO01FPG           13         2         3.44063e-06         0.737391         9.54194e-09         AARI1AT001FPG	6	_	5.90398e-06	1.2653299999999998	8.19995e-09	AAR1AT00FPG	ООП фильтр на засорение	
11     1     5.88e-06     1.26019     0.0     AAR1AP00PMS       12     2     3.44063e-06     0.737391     9.54194e-09     AAR11AT001FPG       13     2     3.44063e-06     0.737391     9.54194e-09     AAR11AT001FPG	10	-	5.88e-06	1.26019	0.0	AAR2AP00PMS	ООП насосов на запуск	
12 2 3,44063e-06 0,737391 9,54194e-09 AAR12AT001FPG AAR13AP001PMR 13 2 3,44063e-06 0,737391 9,54194e-09 AAR11AT001FPG	=	_	5.88€-06	1.26019	0.0	AAR1AP00PMS	ООП насосов на запуск	
AAR13AP001PMR 13 2 3.44063e-06 0.737391 9.54194e-09 AAR11AT001FPG		2	3,44063e-06	0.737391	9.54194e-09	AAR12AT001FPG	Засорение фильтра	
13 2 3.44063e-06 0.737391 9.54194e-09 AAR11AT001FPG						AAR13AP001PMR	Отказ при работе насоса	
		2	3.44063e-06	0.737391	9.54194e-09	AAR11AT001FPG	Засорение фильтра	

Рис. 4. Доминирующие минимальные сечения отказов системы по Функции 1 (источник: собственная разработка на основании расчетов)
 Fig. 4. Dominant minimum failure cross-sections of the system according to Function 1

(Source: own development based on)

Результаты расчета показателей надежности системы AAR, которая используется на атомных электрических станциях для фильтрации воды из водоема-охладителя и передачи ее потребителям, показывают, что наибольший вклад в вероятность отказа системы по Функции 1 вносят отказы общего вида электроснабжения насосов и опор осевых подшипников (ООП) насосов при работе. По итогам анализа надежности системы рекомендуется: постоянно осуществлять техническое обслуживание и ремонт насосов; при обнаружении проблем с одним насосом проверять те же характеристики у остальных насосов (при допущении об их одинаковом производителе и конфигурации); постоянно осуществлять контроль за правильной работой электрической сети, которая питает насосы.

### выводы

- 1. Произведен анализ методов оценки риска, каждый из которых применяется для конкретного случая и обладает как преимуществами, так и недостатками.
- 2. Рассмотрен метод имитационного моделирования, к которому относится вероятностный анализ безопасности, построены деревья отказов для системы фильтрации воды из водоема-охладителя и подачи ее потребителю на атомных электрических станциях, рассчитано среднее значение вероятности отказа данной системы. Преимуществами данного метода оценки являются возможности работы с входными данными со сложной структурой и проведения анализа надежности систем, моделирование различных сценариев аварий и расчет вероятности их возникновения. Метод позволяет не только выявлять уязвимости, но и разрабатывать меры, обеспечивающие минимизацию возможных последствий.
- 3. Результаты расчета показателей надежности системы свидетельствуют о том, что наибольший вклад в вероятность отказа системы по Функции 1 вносит отказ электроснабжения насосов и опор осевых подшипников насосов при работе. По итогам анализа надежности системы рекомендуется: постоянно осуществлять техническое обслуживание и ремонт насосов; при обнаружении проблем с одним насосом проверять те же характеристики у остальных (при допущении об их одинаковом производителе и конфигурации); постоянно осуществлять контроль за правильной работой электрической сети, которая питает насосы [12, 14].

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. О присоединении Республики Беларусь к Конвенции о ядерной безопасности: Указ Президента Респ. Беларусь от 02.09.1998 № 430 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 11.05.2025).
- 2. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398.
- 3. Анализ риска технологических систем: ГОСТ Р 51901–2002. Введ. 07.06.2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 28 с.

- 4. Тымуль, Е. И. Инструменты риск-менеджмента / Е. И. Тымуль // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф., 30 марта 2017 г. / пред. редкол. С. Ю. Солодовников. Минск: БНТУ, 2017. С. 513–514.
- 5. Тымуль, Е. И. Энергетическая безопасность и управление рисками в энергетике Республики Беларусь / Е. И. Тымуль, Т. Ф. Манцерова, Е. П. Корсак. Минск: БНТУ, 2024. 260 с
- 6. Назаров, В. И. Построение математической модели информационной системы для определения оптимального объема отображаемой информации в АСУ тп ТЭС / В. И. Назаров, Е. В. Пронкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 1. С. 61–64.
- 7. Сорокин, В. В. неравномерности распределения пароводяного теплоносителя в засыпке тепловыделяющих частиц / В. В. Сорокин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 89–96.
- 8. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением / С. М. Дмитриев, А. А. Баринов, А. Н. Пронин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 591–603. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603.
- Вероятностный анализ безопасности. Минск, 2024. URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov. by/upload/iblock/628/razdel-6-veroyatnostnyy-analiz-bezopasnosti.pdf (дата обращения: 11.05.2025).
- 10. Кузнецова, Е. А. Формирование реестра опасностей для оценки рисков / Е. А. Кузнецова // Безопасность и охрана труда. 2016. № 4 (69). С. 28–29.
- 11. Котлярова, Е. А. Оперативное управление рисками при реализации инвестиционностроительных проектов: на примере строительства объектов газовой промышленности: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Е. А. Котлярова; Гос. ун-т упр. М., 2010. 181 л.
- 12. Острейковский, В. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 352 с.
- 13. Гриненко, В. А. Физическая защита радиационно-опасных объектов. Инженернотехнические средства охраны / В. А. Гриненко, А. И. Коростелев. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 252 с.
- 14. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций» (РБ-100-15). М., 2015. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766033.htm (дата обращения: 11.05.2025).

Поступила 12.05.2025 Подписана в печать 15.07.2025 Опубликована онлайн 30.09.2025

#### REFERENCES

- 1. On the Accession of the Republic of Belarus to the Convention on Nuclear Safety: Decree of the President of the Republic of Belarus dated 02.09.1998 г. № 430. *ETALON: Information retrieval System* (accessed 11 May 2025) (in Russian).
- 2. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398.
- 3. State Standard P 51901-2002. *Risk Analysis of Technological Systems*. Moscow, Publishing House of Standards, 2002. 28 (in Russian).
- 4. Tymul E. I. (2017) Risk Management Tools. Modernization of the Economic Mechanism through the Prism of Economic, Legal, Social and Engineering Approaches: Collection of materials of the 10<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference, March 30, 2017. Minsk, Belarusian National Technical University, 513–514 (in Russian).
- 5. Tymul E. I., Mantserova T. F., Korsak E. P. (2024) *Energy Security and Risk Management in the Energy Sector of the Republic of Belarus*. Minsk, Belarusian National Technical University. 260 (in Russian).

- 6. Nazarov V. I., Pronkevich E. V. (2008) Development of Mathematical Model for Data System Applied for Determination of Optimum Information Body Reflected in Automatic Control System TP at Thermal Power Station. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 61–64 (in Russian).
- 7. Sorokin V. V. (2014) Non-Uniformities of Two-Phase Coolant Distribution in a Heat Generating Particles Bed / V. V. Sorokin. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 89–96 (in Russian).
- 8. Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 591–603. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603 (in Russian).
- Probabilistic Safety Analysis. Minsk, 2024. Available at: https://gosatomnadzor.mchs.gov. by/upload/iblock/628/razdel-6-veroyatnostnyy-analiz-bezopasnosti.pdf (accessed 11 May 2025) (in Russian).
- 10. Kuznetsova E. A. (2016) Formation of a Hazard Register for Risk Assessment. *Bezopasnost i Okhrana Truda = Safety and labor protection*, (4), 28–29 (in Russian).
- 11. Kotlyarova E. A. (2010) Operational Risk Management in the Implementation of Investment and Construction Projects: on the Example of the Construction of Gas Industry Facilities [Dissertation]. Moscow, State University of Management. 181 (in Russian).
- 12. Ostreykovsky V. A., Shvyryaev Yu. V. (2008) Safety of Nuclear Power Plants. Probabilistic Analysis. Moscow, FIZMATLIT Publ. 352 (in Russian).
- 13. Grinenko V. A., Korostelyov A. I. *Physical Protection of Radiation Hazardous Objects. Engineering and Technical Means of Protection.* Moscow, National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute. 252 (in Russian).
- 14. Safety Guide for the Use of Nuclear Energy "Recommendations on the Procedure for Conducting Reliability Analysis of Nuclear Power Plant Systems and Elements Important to Safety and Their Functions" (RB-100-15). Moscow, 2015. Available at: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766033.htm (accessed 11 May 2025) (in Russian).

Received: 12 May 2025 Accepted: 15 July 2025 Published online: 30 September 2025