

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-161-166>

УДК: 621.039.58

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Е. М. Елекеев^{1*}, Б. П. Степанов²

¹ АО «Самрук-Казына», Астана, Казахстан

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия

* E-mail для контактов: erbol.elekeev@mail.ru

В статье рассматривается использование математического моделирования для повышения безопасности атомных электростанций. Исследование показывает, что время реакции на аварийную ситуацию играет ключевую роль: если оператор принимает меры в течение 30 секунд, вероятность предотвращения аварии составляет 95%, но при задержке в 5 минут она падает до 30%. Также анализируется влияние профилактического обслуживания и резервирования оборудования. Без технического обслуживания вероятность отказа через 1000 часов эксплуатации достигает 40%, тогда как регулярные проверки снижают этот показатель до 15%, а резервные системы – до 8%. Дополнительно изучены каскадные отказы, которые могут привести к серьезным последствиям: при увеличении числа взаимозависимых компонентов с 3 до 10 риск полного отказа системы возрастает с 15% до 80%. В работе предлагаются практические рекомендации по повышению надежности АЭС, включая автоматизацию мониторинга, внедрение предиктивных алгоритмов и использование машинного обучения для прогнозирования возможных сбоев.

Ключевые слова: атомная электростанция, безопасность, моделирование, надежность, отказ, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

Атомные электростанции (АЭС) играют важную роль в обеспечении энергоснабжения многих стран, обеспечивая надежный и стабильный источник электроэнергии. Однако, несмотря на все преимущества, связанные с использованием атомной энергии, эксплуатация таких объектов несет в себе значительные риски. Аварийные ситуации на АЭС могут иметь катастрофические последствия, затрагивая не только окружающую среду, но и жизни миллионов людей. Исторические примеры, такие как Чернобыльская катастрофа в 1986 году и авария на Фукусиме в 2011 году, наглядно демонстрируют, к чему может привести недостаточное внимание к вопросам безопасности и отсутствие своевременной реакции на возникающие угрозы.

Современные методы контроля безопасности на АЭС базируются на анализе предыдущих инцидентов и применении регламентных процедур, направленных на минимизацию вероятности отказов оборудования и человеческих ошибок. Однако, такие методы не всегда позволяют оперативно реагировать на возникающие риски, так как основаны преимущественно на статистическом анализе данных. В условиях, когда требуется быстрое принятие решений, важность прогнозирования возможных отказов и аварий приобретает первостепенное значение. Именно поэтому математическое моделирование в сфере ядерной безопасности становится ключевым инструментом для повышения надежности атомных электростанций [1, 2]. Математические модели позволяют не только оценивать вероятность аварийных ситуаций, но и анализировать поведение оборудования в про-

цессе эксплуатации, предсказывать отказы, рассчитывать влияние различных факторов на надежность системы и разрабатывать оптимальные стратегии для быстрого реагирования. Использование вероятностных методов и стохастического моделирования дает возможность учитывать неопределенность процессов и минимизировать потенциальные риски [3–5].

В данной статье описываются исследования и методы математического моделирования для прогнозирования аварийных ситуаций, анализа надежности оборудования и оценки времени реакции на возможные инциденты. Исследование направлено на разработку системы, которая позволит количественно оценивать риски и формировать оптимальные стратегии для предотвращения аварий на атомных электростанциях. Особое внимание уделяется вопросам прогнозирования отказов оборудования, моделированию цепных аварийных процессов и анализу влияния времени принятия решений на вероятность предотвращения аварии.

Таким образом, основной целью исследования является разработка системы математического моделирования, позволяющей повысить уровень безопасности эксплуатации атомных электростанций. Рассмотренные модели будут использоваться для количественной оценки вероятностей отказов, оптимизации процессов принятия решений и минимизации последствий аварийных ситуаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использовались методы математического моделирования, направленные на оценку рисков аварий на атомных электростанциях (АЭС), анализ надежности оборудования и прогнозирование

возможных отказов. В основе работы лежали вероятностные модели, стохастические процессы и дифференциальные уравнения, позволяющие количественно оценить влияние различных факторов на безопасность эксплуатации АЭС.

Одним из важнейших направлений анализа стало исследование влияния времени реакции операторов на вероятность предотвращения аварии. В экстренных ситуациях даже минимальная задержка в принятии решений может значительно повысить риск тяжелых последствий. Для математического описания этого явления использовалась *экспоненциальная модель деградации вероятности предотвращения аварии*, которая описывается следующим уравнением [6]:

$$\frac{dP_s}{dt} = -\lambda P_s, \quad (1)$$

где $P_s(t)$ – вероятность успешного предотвращения аварии в момент времени t ; λ – параметр интенсивности риска, зависящий от типа аварийной ситуации.

Решение этого уравнения:

$$P_s(t) = P_s(0)e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Эта зависимость демонстрирует, что вероятность предотвращения аварии уменьшается *экспоненциально* с увеличением времени реакции. В ходе численного моделирования были рассмотрены различные сценарии, в которых время реакции оператора изменялось от 10 секунд до 5 минут. Результаты показали, что при времени реакции 30 секунд вероятность успешного предотвращения аварии составляет 95%, но при задержке в 5 минут этот показатель снижается до 30% [7].

Следующим этапом исследования стало моделирование отказов оборудования. Все элементы технической системы со временем изнашиваются, что может привести к выходу из строя критически важных компонентов. Для прогнозирования отказов использовалась *марковская модель надежности*, которая позволяет учитывать возможные переходы системы из рабочего состояния в состояние отказа и последующего восстановления [8]:

$$\frac{dP_n}{dt} = \mu_{n-1}P_{n-1} - (\mu_n + \lambda_n)P_n + \lambda_{n+1}P_{n+1}, \quad (3)$$

где $P_n(t)$ – вероятность нахождения системы в состоянии отказа в момент времени t ; λ_n – интенсивность отказов оборудования; μ_n – интенсивность восстановления.

Численное решение этой системы уравнений позволило оценить вероятность отказа оборудования при различных режимах эксплуатации. Было рассмотрено три сценария: отсутствие профилактического обслуживания, регулярные профилактические осмотры раз в 500 часов и использование резервного оборудования. Полученные результаты показали, что без технического обслуживания вероятность отказа че-

рез 1000 часов работы достигает 40%, тогда как при профилактическом обслуживании она снижается до 15%. Если же используется резервное оборудование, риск полного отказа системы уменьшается более чем в 2,5 раза [9].

Особое внимание в работе было уделено анализу вероятности цепных отказов, когда сбой одной системы вызывает выход из строя других взаимосвязанных компонентов. Подобные ситуации представляют особую опасность, поскольку традиционные методы контроля не всегда позволяют предсказать их развитие. Для анализа таких явлений использовалась *вероятностная модель многосоставных отказов*, в которой вероятность полного отказа всей системы определяется следующим выражением [10]:

$$P_{total} = 1 - (1 - p)^n, \quad (4)$$

где P_{total} – вероятность каскадного отказа всей системы; p – вероятность отказа одной подсистемы; n – количество взаимозависимых компонентов.

Для решения уравнений использовались численные методы, включая метод конечных разностей для решения дифференциальных уравнений и алгоритмы вероятностного моделирования. Численные эксперименты проводились на основе многократных реализаций стохастических процессов, что позволило получить оценку вероятности каскадных отказов в зависимости от количества взаимозависимых элементов системы. Анализ зависимости показал, что при увеличении количества зависимых элементов с 3 до 10 вероятность полного отказа системы возрастает с 15% до 80%. Это демонстрирует, что чем больше взаимосвязанных компонентов в системе, тем выше вероятность каскадного отказа [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе численного моделирования были получены результаты, которые позволяют глубже понять, какие факторы влияют на надежность атомных электростанций. Было рассмотрено, как скорость реакции операторов может предотвратить аварию, насколько важны профилактическое обслуживание и резервирование оборудования, а также проанализировали риски каскадных отказов, когда один сбой запускает цепную реакцию отказов в других системах. Чтобы наглядно показать полученные закономерности, ниже представлено описание шести графиков, которые были построены на основе проведенных расчетов.

На рисунке 1 показано, как вероятность успешно предотвращения аварии зависит от скорости реакции. Чем быстрее операторы или автоматические системы обнаруживают проблему и принимают меры, тем выше шанс справиться с ситуацией.

Если авария замечена в первые 30 секунд, вероятность ее устранения составляет 95%. Однако если задержка составляет 2 минуты, этот показатель снижается до 60%, а при задержке 5 минут вероятность успешного предотвращения падает до 30%. Этот гра-

фик подтверждает, что **оперативность – ключевой фактор безопасности**. Даже небольшая задержка в принятии решений может сделать ситуацию практически неуправляемой. Отсюда следует, что на АЭС нужно совершенствовать автоматические системы мониторинга, а персонал должен регулярно проходить тренировки, чтобы минимизировать время реакции.

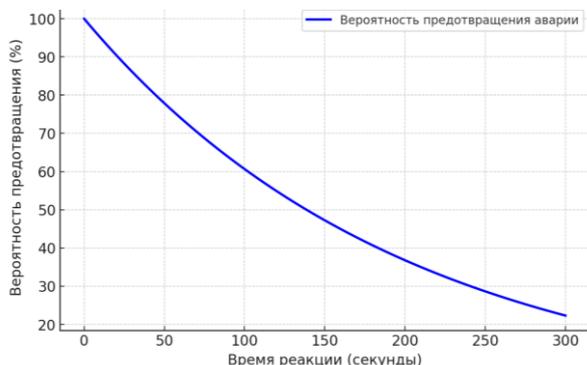


Рисунок 1. Экспоненциальное снижение вероятности предотвращения аварии

На рисунке 2 рассмотрено, как влияет техническое обслуживание на вероятность отказов оборудования. Здесь представлено три сценария:

- Без профилактики – оборудование работает без планового обслуживания;
- С регулярным обслуживанием – проверки и технические работы проводятся каждые 500 часов;
- С резервированием – помимо регулярного обслуживания, предусмотрены резервные компоненты.

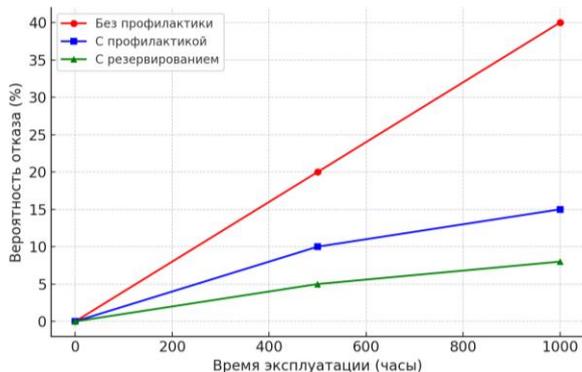


Рисунок 2. Влияние технического обслуживания на вероятность отказов оборудования

Если оборудование эксплуатируется без профилактики, вероятность отказа через 1000 часов составляет 40%. Но если выполнять регулярные проверки, этот показатель снижается почти втрое – до 15%. А если система включает резервные элементы, вероятность полного отказа сокращается в 2,5 раза. Профилактика и резервирование значительно повышают надежность работы оборудования. Именно поэтому на АЭС крайне важно не экономить на техническом

обслуживании и вовремя заменять изнашиваемые детали.

На рисунке 3 анализируется, как наличие резервного оборудования влияет на надежность системы в целом. График показывает, что чем больше резервных элементов предусмотрено, тем ниже вероятность полного отказа системы. Это особенно важно для таких критических компонентов, как системы охлаждения, насосные станции и устройства управления реактором.

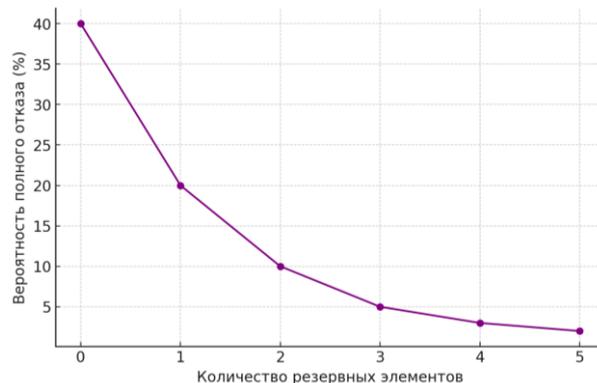


Рисунок 3. Влияние резервирования на надежность системы

Этот результат подтверждает, что резервирование – один из самых эффективных способов повышения надежности атомных станций. Если основной элемент выходит из строя, его работа может быть мгновенно подхвачена резервным узлом, что предотвращает развитие аварийной ситуации.

На рисунке 4 представлена гистограмма, которая показывает, через какое время чаще всего происходят отказы оборудования. Оказалось, что около 70% всех отказов случается в первые 500 часов эксплуатации. Это говорит о том, что многие сбои связаны с дефектами производства или ошибками в настройке системы после монтажа. После первых нескольких сотен часов работы вероятность отказов снижается, но при длительной эксплуатации без технического обслуживания риск снова начинает расти.

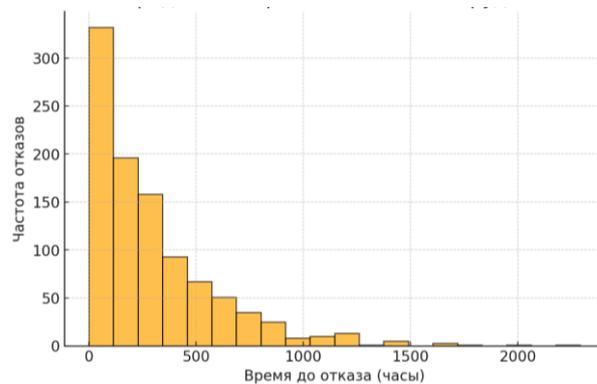


Рисунок 4. Гистограмма распределения времени отказов оборудования

Этот график подчеркивает, насколько важно контролировать оборудование в первые месяцы его работы и оперативно устранять дефекты, пока они не привели к серьезным последствиям.

На рисунке 5 исследовано влияние взаимосвязанных подсистем на общую надежность станции. Чем больше компонентов зависят друг от друга, тем выше риск того, что сбой одной системы вызовет цепную реакцию отказов.

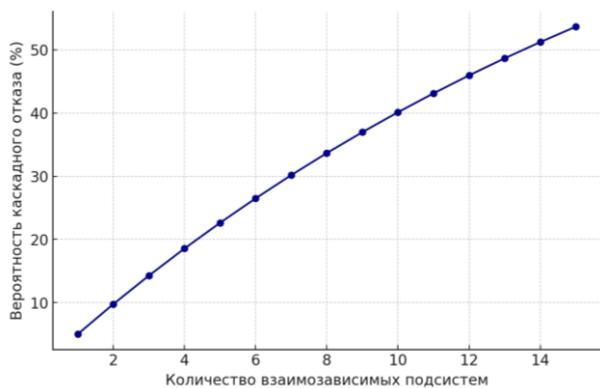


Рисунок 5. Влияние взаимосвязанных подсистем на вероятность отказа

График показывает, что при трех взаимосвязанных системах вероятность полного отказа составляет 15%. Если компонентов уже пять, вероятность возрастает до 30%, а при десяти взаимосвязанных элементах риск катастрофического отказа превышает 80%.

Это означает, что чем больше сложных взаимосвязанностей в системе, тем выше вероятность каскадного отказа. Чтобы минимизировать этот риск, важно:

- Разрабатывать автономные системы, которые могут продолжать работать независимо от состояния других модулей;
- Внедрять локальное резервирование, чтобы при отказе одной системы ее функции временно брал на себя ближайший модуль;
- Использовать предиктивные алгоритмы, которые заранее выявляют узлы, находящиеся в зоне риска.

Проведенное исследование показывает, что безопасность атомных электростанций зависит от скорости реакции на аварийные ситуации, качества технического обслуживания и эффективности резервных систем. Вероятность предотвращения аварии снижается с увеличением времени реакции, поэтому автоматизация мониторинга и подготовка персонала играют ключевую роль. Регулярное обслуживание оборудования значительно уменьшает риск отказов, а резервирование позволяет избежать критических ситуаций. Анализ показал, что большинство отказов происходит в первые 500 часов эксплуатации, что подчеркивает важность тщательного контроля на ранних стадиях работы оборудования. Чем больше

взаимозависимых компонентов в системе, тем выше вероятность каскадного отказа, поэтому необходимы автономные системы и прогнозирующие алгоритмы. Эти результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к обеспечению надежности АЭС и внедрения современных методов моделирования для предотвращения аварий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило важность математического моделирования для повышения безопасности атомных электростанций. Рассмотрены ключевые факторы, влияющие на надежность эксплуатации АЭС, включая скорость реакции операторов, профилактическое обслуживание оборудования, резервирование критически важных систем и влияние каскадных отказов на общую устойчивость станции.

Результаты численного моделирования показали, что вероятность успешного предотвращения аварии экспоненциально снижается с увеличением времени реакции. Если в первые 30 секунд вероятность устранения инцидента составляет 95%, то при задержке в 5 минут она падает до 30%. Это подтверждает необходимость совершенствования автоматизированных систем мониторинга и подготовки персонала к быстрому реагированию. Исследование надежности оборудования выявило, что без профилактического обслуживания вероятность отказа через 1000 часов эксплуатации достигает 40%. Однако регулярные осмотры и техническое обслуживание позволяют снизить этот показатель до 15%, а при наличии резервных систем – до 8%. Это подчеркивает важность своевременного контроля за техническим состоянием оборудования и внедрения дублирующих компонентов для предотвращения критических отказов. Особое внимание было уделено анализу каскадных отказов, возникающих из-за взаимосвязанности систем. Математическое моделирование показало, что вероятность полного отказа станции возрастает с увеличением количества взаимосвязанных компонентов: если в системе три взаимосвязанных элемента, риск отказа составляет 15%, а при десяти – уже 80%. Эти результаты свидетельствуют о необходимости разработки автономных модулей, минимизирующих влияние отказов друг на друга, а также внедрения предиктивных алгоритмов, позволяющих заранее выявлять узлы, находящиеся в зоне риска.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что математическое моделирование является эффективным инструментом для прогнозирования отказов, анализа рисков и разработки стратегий предотвращения аварий. Использование вероятностных моделей, стохастических процессов и численных методов позволяет не только оценивать вероятность аварийных ситуаций, но и разрабатывать оптимальные алгоритмы быстрого реагирования. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть применены для

повышения надежности атомных электростанций за счет совершенствования регламентных процедур, разработки более эффективных систем диагностики и мониторинга, а также внедрения интеллектуальных технологий предсказания отказов. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются использование методов машинного обучения и нейросетевых моделей для более точного прогнозирования аварийных ситуаций, разработка автоматизированных систем принятия решений на основе больших данных, а также создание комплексных цифровых двойников, позволяющих тестировать различные сценарии работы АЭС в виртуальной среде. Внедрение этих технологий позволит существенно повысить уровень безопасности атомной энергетики, снизить вероятность аварийных ситуаций и минимизировать потенциальные риски.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Gomes J. et al. Development of the Reliability Assurance Program in a Brazilian nuclear power plant subsidized by a Reliability, Availability and Maintainability Model // Brazilian Journal of Radiation Sciences. – 2023. – Vol. 11. – No. 4. – P. 01–18.
2. Dimitrov D., Randelova N. Management systems for nuclear security // Security & Future. – 2024. – Vol. 8. – No. 1. – P. 7–10.
3. Park J. K., Kim T. K., Koo S. R. Verification strategy for artificial intelligence components in nuclear plant instrumentation and control systems // Progress in Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 164. – P. 104842.
4. Odarushchenko O. et al. Application of Formal Verification Methods in a Safety-Oriented Software Development Life Cycle // 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). – IEEE, 2023. – P. 1–6.
5. Wang L., Wu Y. Verification and validation optimization method for signal quality bits in digital control system application software of nuclear power plant // Kerntechnik. – 2024. – Vol. 89. – No. 3. – P. 301–315.
6. Enderlein, G., Barlow, E. E., F. Proshan and L. C. Hunter: Mathematical Theory of Reliability. Wiley, New York-London-Sydney, 1965. 256 S., Preis 83 s. Biom. J. – 1966. – Vol. 8, Issue 4. – P. 278–278. <https://doi.org/10.1002/bimj.19660080409>
7. Howard R. Dynamic Probabilistic Systems, Volume 2: Semi-Markov and Decision Processes. New York: Dover, 1971.
8. Dhillon B. S., Singh Ch. Engineering reliability: New techniques and applications. N.Y.: John Wiley & Sons Inc. Publ., 1981. 362 p.
9. Cox, D.R. (1977). The Theory of Stochastic Processes (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203719152>
10. Ebeling C. E. An introduction to reliability and maintainability engineering. – Waveland Press, 2019.
11. Leveson N. G. Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. – The MIT Press, 2016. – 560 p.

ЯДРОЛЫҚ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНДА ҚАУІПСІЗДІКТІ БАҚЫЛАУ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІЛЕНУІ

Е. М. Елекеев^{1*}, Б. П. Степанов²

¹ АҚ «Самрук-Казына», Астана, Қазақстан

² «Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті»
Федералдық мемлекеттік автономиялық жоғары оқу орны, Томск, Ресей

* Байланыс үшін E-mail: erbol.elekeev@mail.ru

Мақалада ядролық электр станцияларының қауіпсіздігін арттыру мақсатында математикалық үлгілеуді қолдану қарастырылады. Зерттеу нәтижелері апаттық жағдайларға жауап беру уақытының маңызды рөл атқаратынын көрсетеді: егер оператор 30 секунд ішінде шара қабылдаса, апаттың алдын алу ықтималдығы 95%-ды құрайды, ал 5 минуттық кешігу кезінде бұл көрсеткіш 30%-ға дейін төмендейді. Сонымен қатар, профилактикалық қызмет көрсету мен резервтік жабдықтардың сенімділікке әсері талданады. Егер техникалық қызмет көрсетілмесе, 1000 сағаттық пайдалану кезеңінде істен шығу ықтималдығы 40%-ға жетеді, ал жүйелі тексерулер бұл көрсеткішті 15%-ға, резервтік жүйелерді қолдану 8%-ға дейін төмендетеді. Сонымен бірге, өзара тәуелді жүйелердің істен шығуы зерттелді: компоненттер саны 3-тен 10-ға дейін артқан кезде, жалпы істен шығу қаупі 15%-дан 80%-ға дейін өседі. Жұмыста АЭС сенімділігін арттыру бойынша тәжірибелік ұсыныстар беріледі, атап айтқанда, мониторингті автоматтандыру, болжамды алгоритмдерді енгізу және ықтимал істен шығуларды болжау үшін машиналық оқытуды қолдану.

Түйінді сөздер: ядролық электр станциясы, қауіпсіздік, үлгілеу, сенімділік, істен шығу, болжам.

**MATHEMATICAL MODELING OF SAFETY CONTROL PROCESSES
AT NUCLEAR POWER PLANTS**

Y. M. Yelekeev^{1*}, B. P. Stepanov²

¹ *«Samruk-Kazyna» JSC, Astana, Kazakhstan*

² *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“National Research Tomsk Polytechnic University”, Tomsk, Russia*

** E-mail for contacts: erbol.elekeev@mail.ru*

This paper examines the use of mathematical modeling to enhance the safety of nuclear power plants (NPPs). The study demonstrates that reaction time plays a crucial role in accident prevention: if an operator takes action within 30 seconds, the probability of preventing an accident is 95%, whereas a 5-minute delay reduces this probability to 30%. The impact of preventive maintenance and system redundancy on reliability is also analyzed. Without maintenance, the probability of equipment failure after 1000 hours of operation reaches 40%, whereas regular inspections reduce this to 15%, and redundancy further lowers it to 8%. Additionally, cascading failures were studied, showing that as the number of interdependent components increases from 3 to 10, the risk of total system failure rises from 15% to 80%. The paper provides practical recommendations for improving NPP reliability, including the automation of monitoring, the implementation of predictive algorithms, and the use of machine learning for failure forecasting.

Keywords: *nuclear power plant, safety, modeling, reliability, failure, forecasting.*