

## Анализ методов идентификации и ранжирование рисков на жизненном цикле АЭС

Мохаммад Альшрайдех, Игорь Анатольевич Енговатов,  
Андрей Александрович Морозенко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** На всех стадиях жизненного цикла атомных электростанций («Размещение», «Проектирование», «Соружение», «Эксплуатация» и «Выход из эксплуатации»), существует большое количество различных рисков, влияющих на безопасность, сроки и стоимость работ при их реализации. Для проектов атомных электростанций (АЭС) на стадиях жизненного цикла существует множество неопределенностей, которые трансформируются в проектные риски, такие как технологические, финансовые, а также риски, связанные с циклом радиоактивных отходов и другие. Управление рисками необходимо для успешной реализации проектов атомных электростанций.

**Материалы и методы.** Приводится анализ рисков на жизненном цикле АЭС несколькими методами: матрица оценки рисков и метод Парето. Идентификация и оценка рисков выполнены методом экспертной оценки и с использованием научной литературы.

**Результаты.** По результатам проведенного анализа выявлены и описаны преимущества и недостатки методов многокритериального анализа применительно к объектам АЭС. Для более глубокого анализа рисков на основе данных, полученных в результате экспертной оценки, предложен метод распределения взвешенности риска по факторам, а также представлены графические изображения анализа влияния выявленных рисков по стадиям жизненного цикла АЭС.

**Выводы.** Основная цель управления рисками состоит в снижении базовых показателей, таких как стоимость, сроки и долговечность при безусловном обеспечении безопасности на всех стадиях жизненного цикла.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** идентификация рисков, управление рисками, реестр рисков, анализ рисков, риски на стадиях жизненного цикла АЭС, метод Парето, метод экспертной оценки рисков

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мохаммад Альшрайдех, Енговатов И.А., Морозенко А.А. Анализ методов идентификации и ранжирование рисков на жизненном цикле АЭС // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 4. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.9

Автор, ответственный за переписку: Игорь Анатольевич Енговатов, [eng46@mail.ru](mailto:eng46@mail.ru).

## Analysing methods of risk identification and ranking in the life cycle of nuclear power plants

Mohammad Alshraideh, Igor A. Engovatov, Andrey A. Morozenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** At all stages of the life cycle of nuclear power plants ("Deployment", "Design", "Construction", "Operation" and "Decommissioning"), there are a large number of different risks affecting the safety, schedule and cost of their realization. For nuclear power plant (NPP) projects at the life cycle stages there are many uncertainties that are transformed into project risks such as technological, financial, and radioactive waste cycle risks and others. Risk management is necessary for successful implementation of nuclear power plant projects.

**Materials and methods.** The article analyses risks in the NPP life cycle by several methods: risk assessment matrix and Pareto method. Identification and assessment of risks are carried out by the method of expert evaluation and with the use of scientific literature.

**Results.** Based on the results of the analysis, advantages and disadvantages of multi-criteria analysis methods with respect to NPP facilities are identified and described. For more in-depth risk analysis on the basis of the data obtained as a result of expert evaluation, the method of risk weighting distribution by factors is proposed, and graphical representations of analyzing the influence of identified risks by stages of NPP life cycle are presented.

**Conclusions.** The main objective of risk management is to reduce baselines such as cost, time and durability while unconditionally ensuring safety at all stages of the life cycle.

**KEYWORDS:** risk identification, risk management, risk register, risk analysis, risks at NPP life cycle stages, Pareto method, method of expert risk assessment

**FOR CITATION:** Mohammad Alshraideh, Engovatov I.A., Morozenko A.A. Analysing methods of risk identification and ranking in the life cycle of nuclear power plants. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(4):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.9

*Corresponding author:* Igor A. Engovatov, eng46@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно принятому определению, риск — это сочетание вероятности и последствий наступления неблагоприятных событий.

Неопределенность относительно того, что произойдет в ближайшем или отдаленном будущем, считается риском сама по себе. Неопределенностью можно считать отсутствие информации, необходимой для учета всех факторов, влияющих на жизненный цикл проекта АЭС. Схема управления рисками представлена на рис. 1.

Первым шагом в управлении рисками является выявление всех возможных рисков событий или идентификация [1]. Целью идентификации рисков является раннее и непрерывное выявление событий, которые могут оказать негативное влияние на достижение целей проекта [2]. Причины возникновения рисков событий могут быть как внешними, так и внутренними. Процесс идентификации рисков, влияющих на жизненный цикл атомных электростанций, начиная со стадии «Размещения» до стадии «Вывод из эксплуатации» и управления ими, является сложным и длительным, поскольку непрерывно продолжается более восьмидесяти лет. В данной статье идентифицированы наиболее значительные риски, оказывающие влияние на жизненный цикл АЭС. Данные об идентифицированных рисках заносятся в реестр рисков.

## Обзор литературы

В России в 2011 г. был издан ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011<sup>1</sup>, который идентичен международному стандарту<sup>2</sup>. В стандарте содержится 31 метод оценки рисков. Также в документе приведено описание факторов, влияющих на выбор метода оценки риска. Большинство методов позволяют получить количественные оценки рисков [3]. Тем не менее в научной литературе не так много исследований, в которых глубоко изучаются факторы, лежащие в основе возникновения рисков на жизненном цикле АЭС, что обуславливает актуальность данного исследования [4–6].

В работах авторов [7, 8] была доказана возможность и необходимость выявления, оценки и управления рисками на жизненном цикле атомных электрических станций.

Для таких сложных проектов, как атомные электростанции, существует множество различных

факторов, которые могут повлиять на их жизненный цикл. Поэтому процесс принятия решений для контроля рисков считается сложным. Факторы, такие как Бюджет, Время, Безопасность и долговечность, являются одними из основных для жизненного цикла атомной электростанции, поскольку они играют решающую роль на всех этапах жизненного цикла АЭС. Следует отметить, что число основных факторов по усмотрению экспертов, ответственных за оценку состояния АЭС на определенном этапе, для каждого уникального проекта может быть больше или меньше перечисленных. Могут быть добавлены новые риски к приведенному реестру рисков или исключены, в случае если они устранены.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Идентификация и оценка рисков выполнены методом экспертной оценки [8] и с использованием научной литературы. Данные о вероятности и влиянии рисков определены экспертами и специалистами в области атомной энергетики. Поскольку процесс управления рисками и принятия решений является сложным, так как необходимо учитывать множество взаимосвязанных факторов, рассмотрим применение методов, облегчающих этот процесс: метод Парето [9] и матрицу оценки рисков [10, 11].

На основе данных проведен анализ, выявлены и описаны преимущества и недостатки методов многокритериального анализа применительно к объектам АЭС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Идентификация рисков

Идентификация рисков должна начинаться с определения типа риска по области влияния [12, 13] (нормативно-правовые, технические, экономические и так далее). Идентификацию рисков необходимо производить для каждой стадии ЖЦ АЭС методом декомпозиции [14], выявляя сначала основные, а затем раскладывая их на составляющие элементы — субриски. Такой подход иллюстрируется на рис. 2.

В рамках данного исследования были идентифицированы большинство основных рисков, влияющих на ЖЦ АЭС с помощью экспертной оценки и анализа литературы.

Данные, полученные от экспертов в области атомной энергетики, имеют практическую значимость и могут быть использованы для мониторинга и управления рисками проекта после их выявления. Платформа управления жизненным циклом АЭС, предложенная авторами [15, 16], содержит 16 факторов, способных повлиять на жизненный цикл атомной электростанции. Таким образом, процесс

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска.

<sup>2</sup> ИСО/МЭК 31010:2009\*. Менеджмент риска. Методы оценки риска.

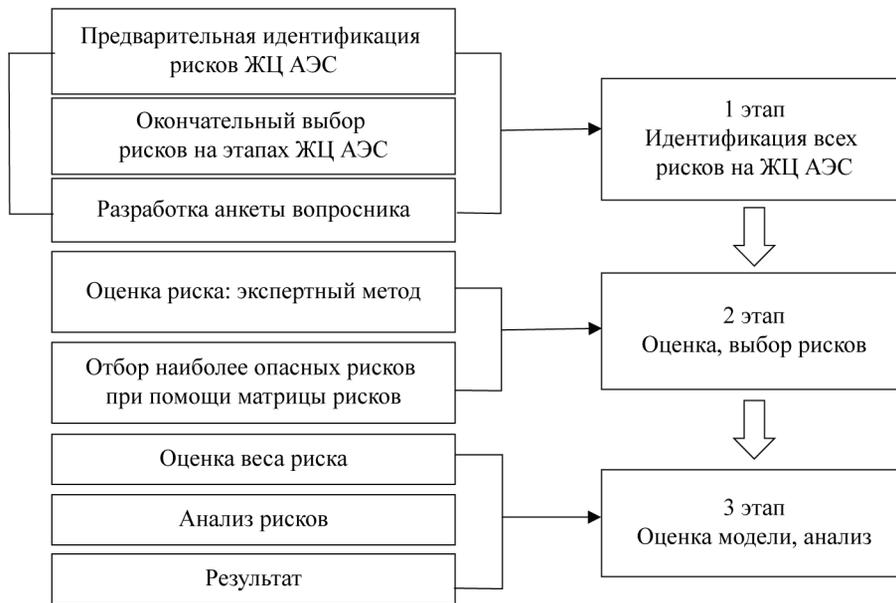


Рис. 1. Схема управления рисками на жизненном цикле АЭС

минимизации рисков является условием существования проекта АЭС, чем больше внимания со стороны проектной команды будет уделяться идентификации рисков, тем меньше влияния будут оказывать эти риски в течение жизненного цикла АЭС.

**Анализ рисков методом Парето**

Основной задачей управления рисками проекта является снижение вероятности и воздействия на цели проекта неблагоприятных событий и повышение вероятности и воздействия благоприятных событий.

Первым шагом для анализа рисков является оценка взвешенности рисков. Единицей измерения веса риска принят «балл». Данные оценки рисков для стадии Размещение и оценки площадки строительства в качестве примера представлены в табл. 1.

По полученным данным, представленным в табл. 1 для каждого субриска, определено значение веса, которое рассчитывается путем умножения значения вероятности на значение воздействия данного риска по формуле:

$$R_{\text{суб}} = B \cdot \text{Воз}, \tag{1}$$

где  $B$  — вероятность возникновения опасности, балл;  $\text{Воз}$  — серьезность последствий влияния опасности, балл.

Вес основного риска равен сумме веса его субрисков (2):

$$R_{\text{осн}} = \sum R_{\text{суб}}. \tag{2}$$

Общий вес рисков, влияющих на жизненный цикл атомных электростанций, определяется как сумма веса рисков на каждой стадии:

$$R_{\text{жц АЭС}} = \sum R_p + \sum R_n + \sum R_c + \sum R_s + \sum R_{\text{в.э}}, \tag{3}$$

где  $R_{\text{жц АЭС}}$  — суммарное значение веса рисков, влияющих на ЖЦ АЭС, балл;  $\sum R_p$  — суммарный вес рисков на стадии «размещение», балл;  $\sum R_n$  — суммарный вес рисков на стадии «проектирование», балл;  $\sum R_c$  — суммарный вес рисков на стадии «строительство», балл;  $\sum R_s$  — суммарный вес рисков на ста-



Рис. 2. Структура рисков на стадии «Размещение»

Табл. 1. Результаты оценки рисков на ЖЦ АЭС

Номер риска	Описание рисков на ЖЦ АЭС	Возникновение ( $P$ )	Влияние ( $W$ )	Взвешенность риска $R = P \cdot W$	Итого взвешенность риска на стадии ЖЦ АЭС
1. Риски на стадии размещения и оценки площадки строительства		40	48	–	–
1.1. Нормативно-правовые		–	–	–	36
Риск 1	1.1.1. Изменение законов	2	4	8	–
Риск 2	1.1.2. Изменение норм	4	4	16	–
Риск 3	1.1.3. Изменение правил	2	4	8	–
Риск 4	1.1.4. Система управления собственностью	2	2	4	–
1.2. Управленческие		–	–	–	176
Риск 5	1.2.1. Выбор стратегии	6	4	24	–
Риск 6	1.2.2. ЯТЦ (наличие замкнутого топливного цикла)	4	4	16	–
Риск 7	1.2.3. ЯТЦ (при отсутствии замкнутого топливного цикла)	6	8	48	–
Риск 8	1.2.4. Типы РУ (для АЭС первого-второго поколений)	6	4	24	–
Риск 9	1.2.5. Типы РУ для третьего и последующих поколений	2	4	8	–
Риск 10	1.2.6. Мощностной ряд РУ (вероятность риска и его влияние увеличивается для АЭС малой и средней мощности)	2	4	8	–
Риск 11	1.2.7. Мощностной ряд РУ (для АЭС большой мощности)	4	6	24	–
Риск 12	1.2.8. Суммарная мощность ЯЭ для РФ	4	6	24	–
1.3. Инфраструктурные		–	–	–	36
Риск 13	1.3.1. Необходимая системность	2	4	8	–
Риск 14	1.3.2. Сложившаяся структура АЭ	2	2	4	–
Риск 15	1.3.3. Риск потери информации	4	6	24	–

дии «эксплуатация», балл;  $\sum R_{в.э}$  — суммарный вес рисков на стадии «вывод из эксплуатации», балл.

После определения веса каждого основного риска его следует разделить в процентном соотно-

шении на четыре фактора (табл. 2), которые влияют на жизненный цикл атомных электростанций:

- бюджет;
- долговечность;

Табл. 2. Таблица влияния факторов (бюджет, долговечность, время, безопасность) на вес риска на этапах жизненного цикла атомных электростанций

Описание риска	Цели проекта	Взвешенность риска общая	Тип вероятности, %	Взвешенность риска по фактору
1. Риски на стадии размещения и оценки площадки строительства				
1.1. Нормативно-правовые	бюджет	36	25	9
	долговечность		25	9
	время		25	9
	безопасность		25	9
1.2. Управленческие	бюджет	176	45	79,2
	долговечность		5	8,8
	время		45	79,2
	безопасность		5	8,8
1.3. Инфраструктурные	бюджет	36	10	3,6
	долговечность		30	10,8
	время		30	10,8
	безопасность		30	10,8

Табл. 3. Взвешенность рисков по стадиям ЖЦ АЭС

Взвешенность риска на стадии жизненного цикла АЭС	Длительность стадии ЖЦ (годы)	Номер стадии в ЖЦ АЭС	Суммарная взвешенность рисков на стадии
Риски на стадии размещения и оценки площадки строительства	2	1	160
Риски на стадии «Проектирование»	3	2	140
Риски на стадии «Строительство»	6	3	356
Риски на стадии «Эксплуатация»	30	4	416
Риски при выводе из эксплуатации	70	5	656

- время (продолжительность стадии ЖЦ) — сохранение несущей способности;
- безопасность (например, лимит воздействия ионизации).

Поскольку для эффективного контроля и управления рисками проектов атомных электростанций недостаточно определить величину воздействия риска в целом [17], предложенный авторами подход с определением величины воздействия риска по факторам представляется более информативным и в дальнейшем может служить основой для более глубокого анализа и эффективного управления рисками.

Метод разделения веса риска на факторы позволяет выделить фактор, влияние которого на ЖЦ АЭС максимально. Этап жизненного цикла «Размещение и оценка площадки» был выбран для проведения анализа данных. Метод экспертной оценки рисков может быть использован, когда риски оцениваются для конкретной рассматриваемой станции на определенном этапе ЖЦ АЭС.

Фактический вес рисков был определен для каждого из этапов ЖЦ АЭС, что иллюстрируется данными, приведенными в табл. 3, в которой по-

казаны оценки взвешенности рисков на различных этапах жизненного цикла атомных электростанций по результатам расчета влияния факторов.

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее опасными стадиями являются стадия эксплуатации и стадия вывода АЭС из эксплуатации.

### Применение метода Парето для определения высоковзвешенных рисков на этапах ЖЦ АЭС

Принцип Парето гласит, что примерно 80 % последствий происходят от 20 % причин [18, 19]. Ввод данных в формате Парето помогает определить риск, значение которого максимально. Следуя данной методике, выявляются наиболее высокие риски на ЖЦ АЭС, а затем предлагаются соответствующие решения для их снижения.

На рис. 3 в виде столбчатой диаграммы приведен график распределения рисков по степени воздействия от наивысшего до наименьшего. Затем, в соответствии с методом, строится кумулятивная кривая для анализа относительного веса каждого риска. Наиболее взвешенные риски (выделены красным на рис. 3) определяются графическим методом

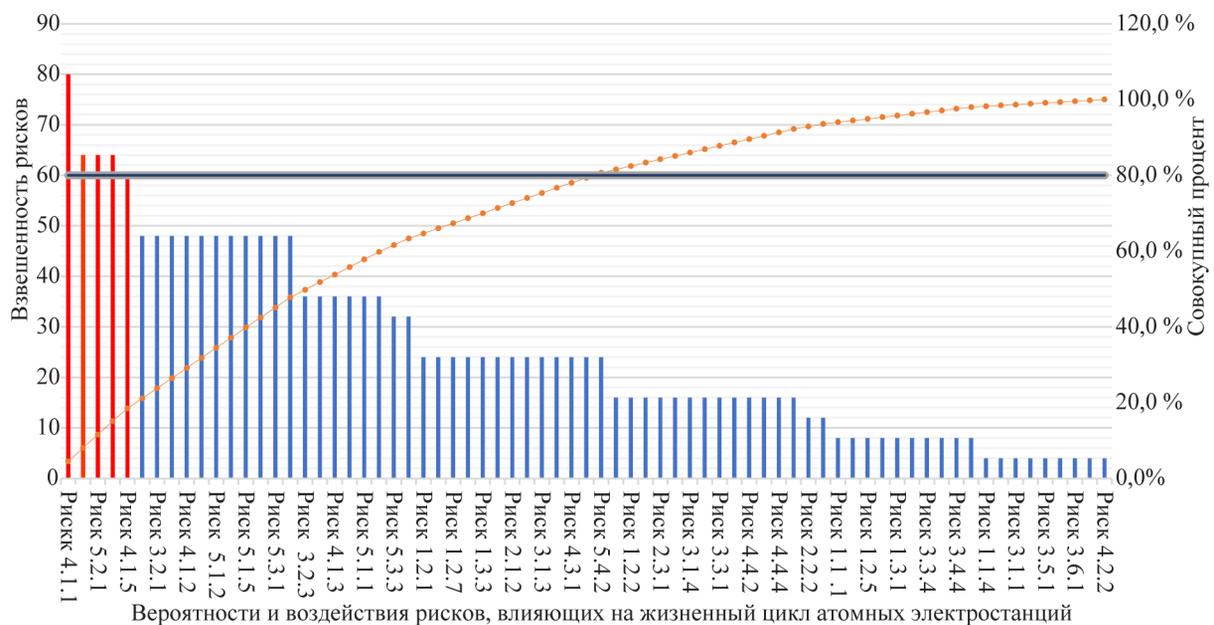


Рис. 3. Применение метода Парето для идентификации и управления рисками на всех этапах жизненного цикла атомных электростанций

1.2.4, 3.3.1	• 5.4.3, 5.4.4	• 3.2.1, 4.1.2, 4.3.2, 5.1.2, 5.1.5, 5.2.3, 5.4.1, 5.4.2	• 5.1.6, 5.2.1, 5.2.2	•
2.2.2, 3.4.3	• 1.2.7, 1.2.8, 1.3.3, 2.1.1, 2.1.2, 2.3.2, 3.1.3, 3.2.2, 4.3.1, 4.4.1, 5.3.2	• 3.2.3, 3.4.2, 4.1.3, 4.2.1, 5.1.1	• 3.3.2	•
1, 1.1.3, 1.2.6, 2.2.1, 3.3.4, 4.1.4	• 1.1.2, 1.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.3, 3.1.4, 3.2.4, 3.3.5, 4.4.2, 4.4.3, 4.4.4, 5.3.1	• 1.2.1	•	•
•	•	•	•	•
4, 1.3.2, 3.1.1, 3.5.1, 3.5.2, 3.6.2, 4.2.2	• 3.4.1	•	•	•
2	4	6	8	10
Воздействие→				

Рис. 4. Матрица вероятности и воздействия рисков, влияющих на жизненный цикл атомных электростанций

путем нахождения точки пересечения линии Парето с линиями веса рисков на графике. В данном анализе линия Парето пересекает шкалу взвешенности на отметке 60 баллов, таким образом наиболее опасными являются риски, вес которых превышает 60 баллов.

#### Матрица рисков ЖЦ АЭС

Матрица рисков является широко используемым инструментом для определения влияния рисков. Суть данного метода заключается в распределении рисков по степени их воздействия. Каждый уровень риска характеризуется цветовым индикатором, всего принято пять уровней опасности рисков: зеленый — низкий риск, желтый — средний уровень риска, оранжевый и красный — значительные и высокие риски [20, 21].

На рис. 4 представлена матрица для распределения рисков на объектах АЭС по степени воздействия от наивысшего до наименьшего в соответствии с результатами оценки вероятности и воздействия рисков, влияющих на жизненный цикл атомных электростанций. Матрица построена с указанием воздействия по одной оси и вероятности риска по другой оси.

В ходе анализа 92 существующих рисков было выявлено 5, которые сильнее других влияют на жиз-

ненный цикл атомных электростанций и считаются приоритетными для управления, а именно:

4.1.1 — Радиационные риски стадии эксплуатации.

5.1.6 — Обращение с радиоактивными отходами (РАО) на стадии вывода из эксплуатации — наличие систем обращения, фрагментации, упаковки и транспортировки РАО.

5.2.1 — Фонд-накопления стадии вывода из эксплуатации — наличие финансовых накоплений и фонда для вывода АЭС из эксплуатации.

5.2.2 — Выбор технологии стадии вывода из эксплуатации — использование «безлюдных технологий» для наиболее опасных работ по выводу АЭС из эксплуатации.

4.1.5 — Кибератака на ядерные объекты стадии эксплуатации.

Преимуществами метода являются: относительная простота использования, обеспечение быстрого ранжирования риска по степени воздействия каждого риска. Среди недостатков можно выделить субъективность оценки, которая и в значительной степени зависит от эксперта, выполняющего оценку. Объединение или сравнение уровней риска для различных категорий воздействия затруднительно. В ГОСТ<sup>1</sup> отмечено, что результаты ранжирования

рисков в матрице зависят от уровня детализации анализа рисков. Чем больше количество оцениваемых рисков, тем меньше вероятность каждого из них, что в свою очередь приводит к недооценке фактического уровня риска. Однако, по мнению авторов, это не совсем справедливо, что обосновывается результатами проведенного анализа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Определены риски для всех стадий жизненного цикла АЭС.
2. Установлены наибольшие риски, связанные со стадией вывод объектов АЭС из эксплуатации.
3. Существуют различные методы оценки рисков для помощи в принятии управленческих решений. Риски могут быть оценены как для всего

проекта, так и для отдельных стадий ЖЦ АЭС или конкретных опасных событий. Поэтому в различных ситуациях могут быть применены различные методы оценки риска или их комбинация.

4. Оценка риска обеспечивает понимание возможных опасных событий, их причин и последствий, вероятности их возникновения и принятие решений для управления ЖЦ АЭС о необходимости снижения риска или его обработки, допуске к переходу на следующую стадию ЖЦ, а также определении приоритетных рисков и выборе стратегии для снижения рисков до приемлемого уровня.
5. Для ранжирования рисков по степени важности и взвешенности применимы методы матрицы рисков и метод Парето, которые дают схожие результаты.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ashraideh M., Engovatov I.* Risk management at the stages of the life cycle of NPP projects // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2023. Vol. 383. P. 04093. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304093
2. *Hopkin P.* Fundamentals of risk management: understanding, evaluating and implementing effective risk management // Kogan Page Publishers. 2018.
3. *Эшли Д., Дикманн Дж., Моленар К.* Руководство по оценке и распределению рисков для управления строительством автомобильных дорог // ГНА, Международная технологическая программа сканирования. 2006. С. 4–17.
4. OECD Nuclear Energy Agency. Nuclear Power Plant Life Management and Longer-term Operation. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006. DOI: 10.1787/1990066x
5. *Kang K.S., Clark C.R., Omoto A.* Integrated plant life management (PLiM): The IAEA contribution. Conference: ASME 2003 Pressure Vessels and Piping Conference. 2005. DOI: 10.1115/PVP2003-2154
6. *Gajewska E., Ropel M.* Risk Management Practices in a Construction Project—a case study // Swedia, Chalmers University Of Technology. 2011. С. 51–62.
7. *Альшрайдех М.И., Енговатов А.* Классификация рисков на стадиях жизненного цикла атомной электростанции // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 2. URL: <https://esj.today/PDF/28SAVN223.pdf>
8. *Данелян Т.Я.* Формальные методы экспертных оценок // Статистика и экономика, 2015. № 1. С. 183–187. DOI: 10.21686/2500-3925-2015-1-183-187
9. *Парето В.* Учебник политической экономики // Властные структуры и группы доминирования. 2012. С. 498–514.
10. *Мир С.* Матрица рисков // Политика и практика в области охраны труда и техники безопасности. 2017. Т. 15. № 2. С. 131–144.
11. Planning and Management for the Decommissioning of Research Reactors and Other Small Nuclear

Facilities // IAEA Technical Reports Series No. 351. Vienna. 1993.

12. *Круи М., Галай Д., Марк Р.* Основы риск-менеджмента. М. : Юрайт, 2015. 389 с.
13. *Солодов А.К.* Основы финансового риск-менеджмента. М. : «Издание Александра К. Солодова ЯКО С НАМИ БОГ», 2018. 1-е изд. 286 с.
14. *Качалов Р.М., Слепцова Ю.А.* Идентификация факторов риска на основе декомпозиции экономического пространства предприятия // Вестник Челябинского государственного университета. 2016. № 14 (396). С. 86–94.
15. *Альшрайдех М., Енговатов И., Морозенко А.* Вопросы управления жизненным циклом АЭС // Энергетическая политика. 2023. URL: <https://energypolicy.ru/voprosy-upravleniyazhiznennym-cziklom-aes/energetika/2023/19/24/>
16. *Габриелян М.О., Третьяков О.Б.* Классификация рисков в инвестиционно-строительной деятельности // Вестник Государственного университета управления. 2016. № 5. С. 60–67.
17. *Шкурко В.Е.* Управление рисками проектов. М. : ООО «Издательство Юрайт», 2-е изд. 2014. 182 с.
18. *Пахомов А.П.* Применять или не применять принцип Парето на практике? // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: экономика. 2010. № 1. С. 5–12.
19. *Корниец Т.П., Аликова О.П.* Управление рисками в атомной энергетике как основа обеспечения энергетической безопасности России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 22. С. 37–47.
20. *Мюррей С.Л., Грэнтэм К., Дейл С.Б.* Разработка общей матрицы рисков для управления проектными рисками // Журнал промышленной и системной инженерии. 2011. Т. 5. № 1. С. 35–51.
21. *Филопулос Я.* Формирование политики и институциональная основа оценки риска в ЕС. М. : ТЕИС. 2005.

Поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 8 декабря 2023 г.

**О Б А В Т О Р А Х:** **Альшрайдех Мохаммад** — аспирант кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6396-7791; Msh.19894@yahoo.com;

**Енговатов Игорь Анатольевич** — доктор технических наук, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 6507232254, ResearcherID: AFN-5363-2022, ORCID: 0000-0001-9302-5431; eng46@mail.ru;

**Морозенко Андрей Александрович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57193025936, ResearcherID: AFO-1863-2022, ORCID: 0000-0003-4166-536X; morozenkoaa@vgsu.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

According to the accepted definition, risk is a combination of probability and consequences of unfavourable events.

Uncertainty about what will happen in the near or distant future is considered a risk in itself. Uncertainty can be considered the lack of information necessary to take into account all factors affecting the NPP project life cycle. The risk management scheme is presented in Fig. 1.

The first step in risk management is to identify all possible risk events or identification, the purpose of risk identification is the early and continuous detection of events that may have a negative impact on the achievement of project objectives [1]. The causes of risk events can be both external and internal. The process of identifying and managing risks affecting the life cycle of nuclear power plants, from the “Deployment” stage to the “Decommissioning” stage, is complex and time-consuming, as it has been going on continuously for more than eighty years. This paper identifies the most significant risks affecting the life cycle of NPP. Data on the identified risks are recorded in the risk register.

### Literature review

In Russia in 2011, GOST R ISO/MEC 31010–2011<sup>1</sup> was published, which is identical to the international standard<sup>2</sup>. The standard contains 31 methods of risk assessment. The document also contains a description of factors influencing the choice of risk assessment method. Most methods allow to obtain quantitative risk assessments [2]. Nevertheless, there are not many studies in the scientific literature, in which the factors underlying the occurrence of risks in the life cycle of NPP are studied in depth, which determines the relevance of this study.

<sup>1</sup> GOST R ISO/MEC 31010–2011. Risk Management. Risk assessment methods.

<sup>2</sup> ISO/MEC 31010:2009\*. Risk management. Risk assessment methods.

The authors [3, 4] proved the possibility and necessity of identifying, assessing and managing risks in the life cycle of nuclear power plants.

For complex projects such as nuclear power plants, there are many different factors that can affect their life cycle. Therefore, the decision-making process to control risks is considered complex. Factors such as Budget, Time, Safety and Durability are some of the major factors for the life cycle of a nuclear power plant as they play a crucial role in all phases of the life cycle of a nuclear power plant. It should be noted that the number of major factors at the discretion of the experts responsible for assessing the condition of the NPP at a particular stage, for each unique project, may be more or less than those listed. New risks may be added to the listed risk register or excluded if they are eliminated.

## MATERIALS AND METHODS

Identification and assessment of risks were carried out by the method of expert evaluation and using scientific literature. Data on the probability and impact of risks were determined by experts and specialists in the field of nuclear energy. Since the process of risk management and decision making is complex, as it is necessary to take into account many interrelated factors, we will consider the application of methods that facilitate this process, such as the Pareto method [5] and the risk assessment matrix [6].

On the basis of the data, the advantages and disadvantages of multi-criteria analysis methods as applied to NPP facilities are analyzed, identified and described.

## RESEARCH RESULTS

### Risk identification

Risk identification should begin with the definition of the type of risk according to the area of influence [7] (regulatory, technical, economic, etc.). Risk identification should be performed for each stage of the NPP life

cycle, using the decomposition method [8], identifying first the main risks and then decomposing them into their constituent elements — sub-risk. This approach is illustrated in Fig. 2.

In this study, most of the major risks affecting the life cycle of NPP were identified through expert judgement and literature review.

The data obtained from experts in the field of nuclear power engineering are of practical significance and can be used for monitoring and managing project risks after their identification. The NPP life cycle management platform proposed by the authors [9] contains 16 factors that can affect the life cycle of a nuclear power plant. Thus, the process of risk minimization is a condition for the existence of a NPP project, the more attention from the project team to risk identification, the less influence these risks will have during the NPP life cycle.

**Risk analysis using the Pareto method**

The primary objective of project risk management is to reduce the likelihood and impact of adverse events on project objectives and increase the likelihood and impact of favourable events.

The first step for risk analysis is to assess the risk weighting. The risk weight measurement is taken as a Point. The risk assessment data for the deployment stage and the construction site assessment as an example are presented in Table 1.

According to the obtained data presented in Table 1 for each sub-risk the weight, value is determined, which is calculated by multiplying the probability value by the impact value of this risk according to the formula:

$$R_{sr} = P \cdot Imp, \tag{1}$$

where  $P$  — probability of hazard occurrence, point;  $Imp$  — severity of the consequences of the impact of the hazard, point.

The weight of the principal risk is equal to the sum of the weights of its sub-risk (2):

$$R_{pr} = \sum R_{sr}. \tag{2}$$

The total weight of risks affecting the life cycle of nuclear power plants is determined as the sum of the weight of risks at each stage:

$$R_{npp\ lc} = \sum R_{dep} + \sum R_{des} + \sum R_{con} + \sum R_{op} + \sum R_{s.d}, \tag{3}$$

where  $R_{npp\ lc}$  — total value of the weight of risks affecting the NPP life cycle, points;  $\sum R_{dep}$  — total weight of risks at the deployment stage, points;  $\sum R_{des}$  — total weight of risks at the design stage, points;  $\sum R_{con}$  — total weight of risks at the construction stage, points;  $\sum R_{op}$  — total weight of risks at the operation stage, points;  $\sum R_{s.d}$  — total weight of risks at the stage of de-commissioning, points.

Once the weight of each major risk has been determined, it should be divided as a percentage into four factors (Table 2) that affect the life cycle of nuclear power plants:

- budget;
- durability;
- time (duration of the life cycle stage) — preservation of bearing capacity;
- safety (e.g. radiation exposure limit).

Since it is not sufficient to determine the magnitude of risk impact as a whole for effective risk control and management of nuclear power plant projects, the approach proposed by the authors to determine the magnitude of risk impact by factors seems to be more informative and may serve as a basis for more in-depth analyses and effective risk management in the future.

The method of dividing the risk weight into factors makes it possible to single out the factor whose influence on the NPP lifecycle is maximized. The stage of the life cycle “Deployment and site evaluation” was selected for

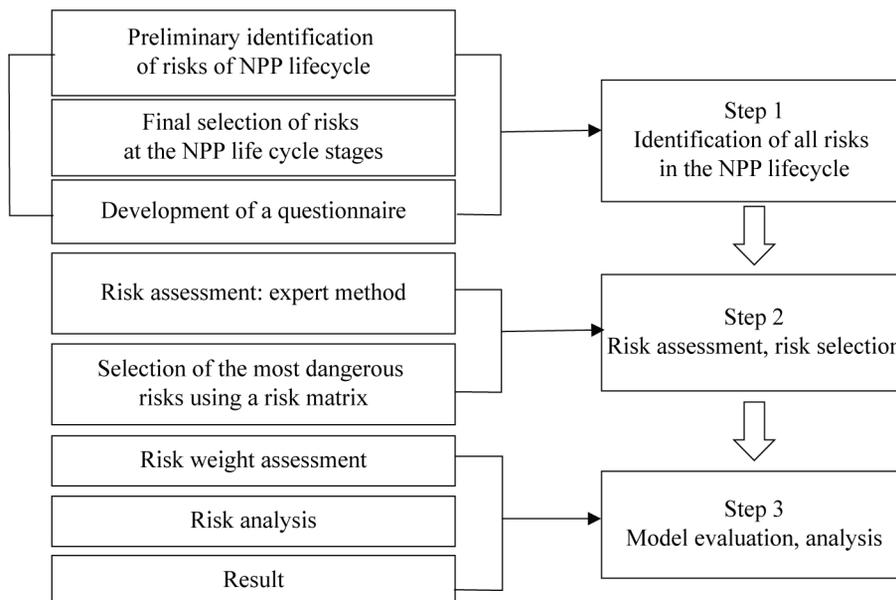
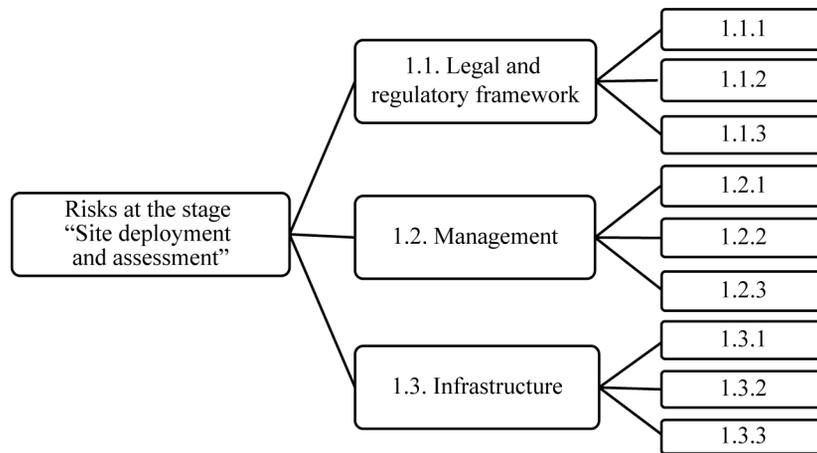


Fig. 1. Scheme of risk management in the NPP life cycle



**Fig. 2.** Risk structure at the “Deployment and assessment” stage

data analysis. The method of expert risk assessment can be used when risks are assessed for a particular plant under consideration at a certain stage of the NPP life cycle.

The actual weight of risks was determined for each stage of the NPP lifecycle, which is illustrated by the data given in Table 3, which shows estimates of risk

weighting at various stages of the life cycle of nuclear power plants based on the results of calculating the influence of factors.

Thus, it can be concluded that the most dangerous stages are the operational and decommissioning stages of NPP.

**Table 1.** Results of risk assessment in NPP lifecycle

Risk Number	Description of risks in the NPP lifecycle	Emergence ( $R$ )	Impact ( $W$ )	Risk weighting $R \cdot W$	Total risk weighting at the NPP life cycle stage
1. Risks at the stage of construction site deployment and assessment		40	48	–	–
1.1. Legal and regulatory framework		–	–	–	36
Risk 1	1.1.1. Changing laws	2	4	8	–
Risk 2	1.1.2. Changing norms	4	4	16	–
Risk 3	1.1.3. Changing the rules	2	4	8	–
Risk 4	1.1.4. property management system	2	2	4	–
1.2. Management		–	–	–	176
Risk 5	1.2.1. Choosing a strategy	6	4	24	–
Risk 6	1.2.2. NFC (existence of a closed fuel cycle)	4	4	16	–
Risk 7	1.2.3. NFC (in the absence of a closed fuel cycle)	6	8	48	–
Risk 8	1.2.4. Types of RP (for first- and third-generation NPP)	6	4	24	–
Risk 9	1.2.5. Types of RIs for the third and subsequent generations	2	4	8	–
Risk 10	1.2.6. Power range of RP (risk probability and its impact increases for small and medium capacity NPP)	2	4	8	–
Risk 11	1.2.7. Power range of RP (for high capacity NPP)	4	6	24	–
Risk 12	1.2.8. Total NP capacity for the Russian Federation	4	6	24	–
1.3. Infrastructure		–	–	–	36
Risk 13	1.3.1. Systematicity required	2	4	8	–
Risk 14	1.3.2. Current NP structure	2	2	4	–
Risk 15	1.3.3. Risk of information loss	4	6	24	–

**Table 2.** Table of influence of factors (budget, durability, time, safety) on the risk weight at the life cycle stages of nuclear power plants

Risk description	Project objectives	Risk weighting total	Probability type %	Risk weighting by factor
1. Risks at the stage of construction site deployment and assessment				
1.1. Legal and regulatory framework	budget	36	25	9
	durability		25	9
	time		25	9
	security		25	9
1.2. Management	budget	176	45	79.2
	durability		5	8.8
	time		45	79.2
	security		5	8.8
1.3. Infrastructure	budget	36	10	3.6
	durability		30	10.8
	time		30	10.8
	security		30	10.8

**Application of Pareto method for determination of highly weighted risks at the stages of NPP life cycle**

The Pareto principle states that approximately 80 % of consequences come from 20 % of causes [10]. Data input in the Pareto format helps to determine the risk, the value of which is maximized. Following this methodology, the highest risks in the NPP life cycle are identified, and then appropriate solutions are proposed to reduce them.

Fig. 3 shows the distribution of risks by degree of impact from the highest to the lowest in the form of a bar chart. Then, in accordance with the method, a cumulative curve is constructed to analyze the relative weight of each risk. The most weighted risks (highlighted in red in Fig. 3) are determined by the graphical method, by finding the point of intersection of the Pareto line with the risk weight lines on the graph. In this analysis, the Pareto line crosses the weighting scale at 60 points, so the most dangerous risks are those with weights exceeding 60 points.

**NPP life cycle risk matrix**

The risk matrix is a widely used tool for determining the impact of risks. The essence of this method consists in distribution of risks on degree of their influence. Each level of risk is characterized by a colour indicator,

five levels of risk danger are accepted: green — low risk, yellow — medium level of risk, orange and red — significant and high risks [11].

Fig. 4 presents a matrix for the distribution of risks at NPP facilities according to the degree of impact from the highest to the lowest in accordance with the results of the assessment of probability and impact of risks affecting the life cycle of nuclear power plants. The matrix is constructed with indication of impact on one axis and risk probability on the other axis.

In the course of analyzing 92 existing risks, 5 risks were identified that have the strongest impact on the life cycle of nuclear power plants and are considered a priority for management, namely:

4.1.1 — Radiation risks of the operational phase.

5.1.6 — Radioactive waste (RW) management at the decommissioning stage — availability of RW management, fragmentation, packaging and transport systems

5.2.1 — Decommissioning Stage Fund-Accumulations — availability of financial accumulations and fund for NPP decommissioning.

5.2.2 — Selection of decommissioning stage technology — use of “unmanned technologies” for the most hazardous NPP decommissioning activities.

4.1.5 — Cyberattack on nuclear facilities at the operational stage.

**Table 3.** Risk weighting by NPP life cycle stages

Risk weighting at the stage of NPP life cycle	Duration of the life cycle stage (years)	Stage number in the NPP lifecycle	Aggregate risk weighting at the stage
Risks at the stage of construction site deployment and assessment	2	1	160
Risks at the Design stage	3	2	140
Risks at the Construction stage	6	3	356
Risks at the Operational stage	30	4	416
Decommissioning risks	70	5	656

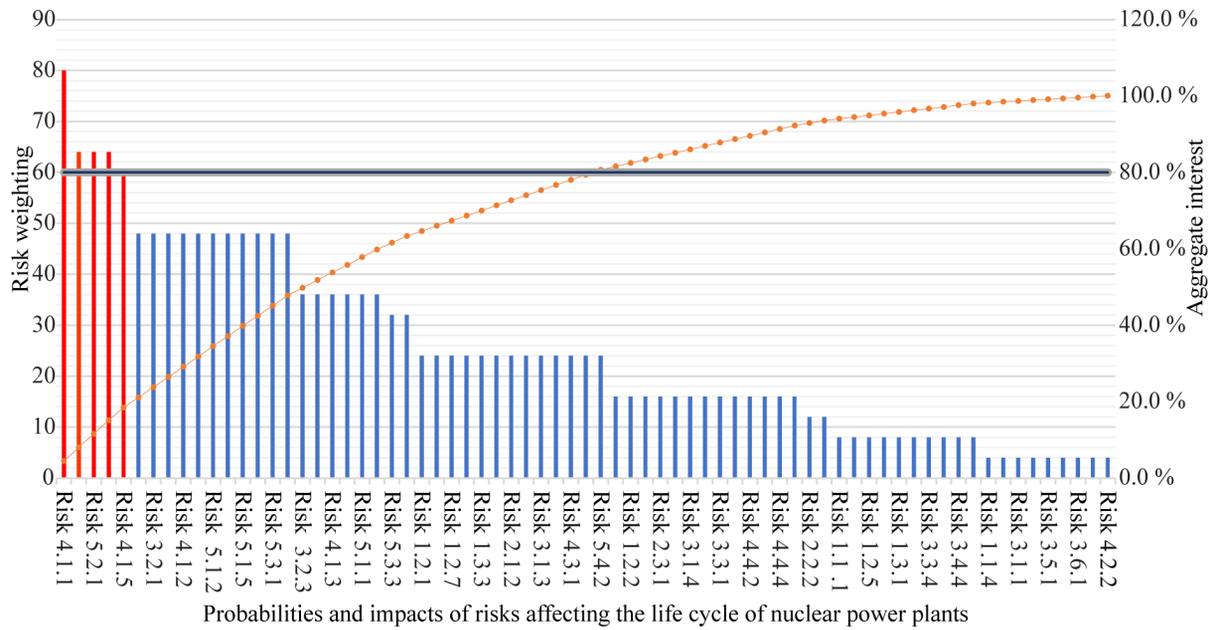


Fig. 3. Application of the Pareto method for risk identification and management at all stages of the life cycle of nuclear power plants

• 1.2.4, 3.3.1	• 5.4.3, 5.4.4	• 3.2.1, 4.1.2, 4.3.2, 5.1.2, 5.1.5, 5.2.3, 5.4.1, 5.4.2	• 5.1.6, 5.2.1, 5.2.2	•
• 2.2.2, 3.4.3	• 1.2.7, 1.2.8, 1.3.3, 2.1.1, 2.1.2, 2.3.2, 3.1.3, 3.2.2, 4.3.1, 4.4.1, 5.3.2	• 3.2.3, 3.4.2, 4.1.3, 4.2.1, 5.1.1	• 3.3.2	•
• 1.1.1, 1.1.3, 1.2.6, 1.3.1, 2.2.1, 3.3.4, 4.1.4	• 1.1.2, 1.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.3, 3.1.4, 3.2.4, 3.3.5, 4.4.2, 4.4.3, 4.4.4, 5.3.1	• 1.2.1	•	•
•	•	•	•	•
• 1.1.4, 1.3.2, 3.1.1, 3.1.2, 3.5.1, 3.5.2, 3.6.1, 3.6.2, 4.2.2	• 3.4.1	•	•	•
2	4	6	8	10
Impact→				
Low risk	Moderate risk	Medium risk	Significant risk	High risk

Fig. 4. Matrix of probability and impact of risks affecting the life cycle of nuclear power plants

The advantages of the method are: relative ease of use, providing a quick ranking of risk by the degree of impact of each risk. The disadvantages include

the subjectivity of the assessment, which is highly dependent on the expert performing the assessment. Combining or comparing risk levels for different exposure

categories is difficult. In GOST<sup>1</sup> notes that the results of ranking risks in the matrix depend on the level of detail of risk analysis. The greater the number of assessed risks, the lower the probability of each of them, which in turn leads to underestimation of the actual level of risk. However, according to the authors, this is not quite fair, which is justified by the results of the analysis.

## CONCLUSION AND FINDINGS

1. Risks for all stages of the NPP life cycle were identified.

2. The greatest risks associated with the stage of decommissioning of NPP facilities were identified.

3. There are various methods of risk assessment to assist in making management decisions. Risks can be

assessed either for the whole project or for individual stages of the NPP life cycle or specific hazardous events. Therefore, different risk assessment methods or a combination of them may be applied in different situations.

4. Risk assessment provides understanding of possible hazardous events, their causes and consequences, probability of their occurrence and decision making for NPP life cycle management on the necessity of risk reduction or its treatment, admission to transition to the next stage of the life cycle, as well as determination of priority risks and selection of a strategy for risk reduction to an acceptable level.

5. To rank risks by importance and weighting, the risk matrix and Pareto methods are applicable and give similar results.

## REFERENCES

1. Alshraydeh M., Engovatov I.A. Classification of risks at the stages of the life cycle of a nuclear power plant. *Bulletin of Eurasian Science*. 2023; 15(2). URL: <https://esj.today/PDF/28SAVN223.pdf>. (rus.).
2. Hopkin P. Fundamentals of risk management: understanding, evaluating and implementing effective risk management. *Kogan Page Publishers*. 2018.
3. Ashley D., Dieckmann J., Molenaar K. A guide to risk assessment and allocation for highway construction management. *FHA, International Scanning Technology Program*. 2006; 4-17.
4. OECD Nuclear Energy Agency. *Nuclear Power Plant Life Management and Longer-term Operation*. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006. DOI: 10.1787/1990066x
5. Kang K.S., Clark C.R., Omoto A. *Integrated plant life management (PLiM): The IAEA contribution*. 2005. DOI: 10.1115/PVP2003-2154
6. Gajewska E., Ropel M. Risk Management Practices in a Construction Project—a case study. *Swedia, Chalmers University Of Technology*. 2011; 51-62.
7. Ashraideh M., Engovatov I. Risk management at the stages of the life cycle of NPP projects. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2023; 383:04093. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304093
8. Danelyan T.Ya. Formal methods of expert assessments. *Statistics and economics*. 2015; 1:183-187. DOI: 10.21686/2500-3925-2015-1-183-187 (rus.).
9. Pareto V. Textbook of political economy. *Power structures and domination groups*. 2012; 498-514.
10. Mir S. Risk matrix. *Policy and practice in the field of occupational health and safety*. 2017; 15(2):131-144.
11. Planning and Management for the Decommissioning of Research Reactors and Other Small Nuclear Facilities. *IAEA Technical Reports*. Series Ne. 351. Vienna. 1993.
12. Krui M., Galai D., Mark R. *Fundamentals of risk management*. Moscow, Law Publ., 2015; 389. (rus.).
13. Solodov A.K. *Fundamentals of financial risk management*. 1st ed. Moscow: "Edition by Alexander K. Solodov, GOD IS WITH US", 2018; 286.
14. Kachalov R.M., Sleptsova Yu.A. Identification of risk factors based on the decomposition of the economic space of an enterprise. *Bulletin of the Chelyabinsk State University*. 2016; 14(396):86-94. (rus.).
15. Alshraydeh M., Yengovatov I., Morozenko A. Issues of NPP life cycle management. *Energy policy*. 2023. URL: <https://energypolicy.ru/voprosy-upravleniyazhiznennym-cziklom-aes/energetika/2023/19/24/> (rus.).
16. Gabrielyan M.O., Tretyakov O.B. Classification of risks in investment building activities *Bulletin of the State University of Management*. 2016; 5:60-67. (rus.).
17. Shkurko V.E. *Project risk management*. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publishing House LLC, 2014; 182. (rus.).
18. Pakhomov A.P. To apply or not to apply the Pareto principle in practice? *Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series: economics*. 2010; 1:5-12. (rus.).
19. Korniets T.P., Alikova O.P. Risk management in nuclear energy as a basis for ensuring energy security of Russia. *National interests: priorities and security*. 2012; 22(37-47). (rus.).
20. Murray S.L., Grantham K., Dale S.B. Development of a general risk matrix for project risk management. *Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2011; 5(1):35-51.
21. Filopoulos Ya. *Policy formation and the institutional framework for risk assessment in the EU*. Moscow, THEIS, 2005. (rus.).

*Received November 27, 2023.*

*Adopted in revised form on December 8, 2023.*

*Approved for publication on December 8, 2023.*

**B I O N O T E S:** **Alshraideh Mohammad** — Postgraduate student of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6396-7791; Msh.19894@yahoo.com;

**Igor A. Engovatov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 6507232254, ResearcherID: AFN-5363-2022, ORCID: 0000-0001-9302-5431; eng46@mail.ru;

**Andrey A. Morozenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head Department of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57193025936, ResearcherID: AFO-1863-2022, ORCID: 0000-0003-4166-536X; morozenkoaa@vgsu.ru.

*Author contributions: all authors made an equivalent contribution to the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*