

# **Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования**

УДК: 681.5.011

DOI: 10.30987/2658-6436-2020-2-42-49

В.В. Андреев, М.А. Берберова, О.В. Золотарев, В.В. Чуенко, Е.В. Карпушин, Д.В. Дьячков,  
А.В. Суворов, А.Ю. Федосеева, Г.Н. Фирсаков

## **ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЙ ПЕРСОНАЛА ПРИ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫХ АВАРИЯХ. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ МОНИТОРИНГА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС**

*При выполнении анализа надежности персонала (АНП) в рамках вероятностного анализа безопасности (ВАБ) и оценок риска используются следующие допущения в отношении рассматриваемых факторов деятельности персонала: рассматриваются только те действия (и соответственно, ошибки) персонала, которые допускаются при выполнении поставленных задач; предполагается, что весь персонал АЭС действует так, как он считает нужным действовать в интересах безопасности АЭС; предполагается, что в исходном состоянии до возникновения инициирующего события аварии блок работает в режиме нормальной эксплуатации; задачи выполняются аттестованным, квалифицированным персоналом, включая такие категории специалистов, как оперативный, ремонтный и технический персонал; при выполнении действий оператору нет необходимости использовать специальную защитную одежду; на блочном пункте управления (БПУ) поддерживаются благоприятные условия. Уровни освещенности и шума, а также физиологического комфорта являются оптимальными.*

**Ключевые слова:** ошибки персонала, АЭС, анализ надежности персонала, мониторинг обеспечения безопасности АЭС.

V.V. Andreev, M.A. Berberova, O.V. Zolotarev, V.V. Chuenko, E.V. Karpushin, D.V. Dyachkov,  
A.V. Suvorov, A.Yu. Fedoseeva, G.N. Firsakov

## **ASSESSMENT OF PERSONNEL ACTIONS IN THE MOST DANGEROUS ACCIDENTS. DEVELOPMENT OF A NPP SAFETY MONITORING PROGRAM**

*When performing the personnel reliability analysis (ANP) as part of a probabilistic safety analysis (PSA) and risk assessments, the following assumptions are used with respect to the considered factors of personnel activity: only those actions (and, accordingly, errors) of personnel that are allowed when performing assigned tasks are considered; it is assumed that all NPP personnel act as they consider it necessary to act in the interests of NPP safety; it is assumed that in the initial state, before the occurrence of the initiating accident event, the unit operates in normal operation; tasks are performed by certified, qualified personnel, including such categories of specialists as operational, repair and technical personnel; when performing actions, the operator does not need to use special protective clothing; Favorable conditions are maintained at the block control room (BPU). Light and noise levels as well as physiological comfort are optimal.*

**Keywords:** personnel errors, NPPs, personnel reliability analysis, NPP safety monitoring.

### **Введение**

В ВАБ моделируются четыре категории ошибок персонала:

1. До-аварийные ошибки персонала (происходят до исходного события) - представляют собой ошибочные действия персонала, выполняемые до наступления исходного события, которые приводят к неготовности оборудования или системы, проявляющейся в виде отказа на требование при реагировании на исходное событие.

Примерами ошибок персонала этой категории являются неправильная калибровка или настройка оборудования, или не восстановление работоспособного состояния оборудования после испытаний или ремонтного обслуживания.

2. Иницирующие исходное событие ошибки персонала - представляют собой ошибки при выполнении действий персонала, которые вызывают или приводят к исходному событию.

3. Послеаварийные ошибки персонала (происходят при реагировании на исходное событие) - ошибки персонала, возникающие во время выполнения действий, являющихся ответными на аварийную ситуацию после наступления исходного события (динамических действий), и определяются уровнем тренировки оперативного персонала, существующими инструкциями, знаниями, которыми обладают операторы, а также другими факторами. Эти ошибки персонала возникают вследствие ошибок при диагностике или выполнении.

4. Ошибки персонала при восстановлении - ошибки персонала при выполнении динамических действий (после исходного события), но заключающиеся в невыполнении персоналом операций с не включившимся по автоматике оборудованием, непосредственно участвующем в ликвидации аварии, или с альтернативным по отношению к нему оборудованием.

## **1. Оценка действий персонала при наиболее опасных авариях с выбросом источников тепловых нейтронов с низкой плотностью потока**

### **1.1. Существующие методы АНП**

Для оценки вероятности ошибок персонала существует ряд методик, позволяющих выполнить АНП для конкретных задач. В результате этого анализа будут предприняты действия для уменьшения вероятности совершения персоналом ошибок, что приведёт к повышению общего уровня безопасности установки.

Существуют три основные задачи АНП: выявление ошибок, определение вероятности ошибок и сокращение числа ошибок.

Наиболее часто используемыми методиками являются: THERP [1, 2] и HCR [2, 3]. Рассмотрим их подробнее.

#### ***Метод THERP***

Метод THERP [1, 2] является наиболее известным и часто применяемым для прогнозирования надежности человека. Данный метод используют для оценки последствий ошибок персонала и прогнозирования отказов в системе человек-машина, обусловленных ошибками человека. При этом учитывается влияние таких факторов как надежность оборудования, качество инструкций, взаимодействие операторов и др.

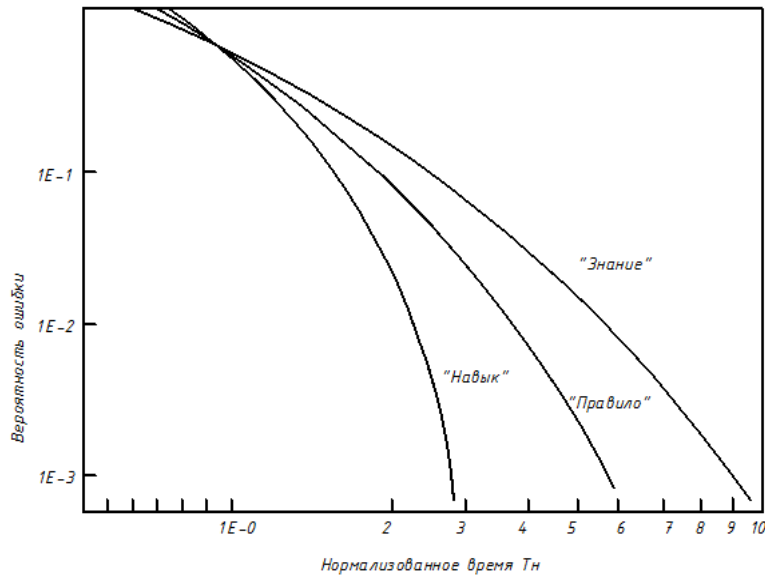
В методе THERP используют модель представления действий персонала в форме логической структуры, аналогичной дереву событий. Каждому событию в этой модели ставится в соответствие вероятность невыполнения операции. Эта вероятность уточняется путем умножения на коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов. В качестве вероятностей ошибок при совершении того или иного действия могут быть использованы данные с тренажеров.

Возможно использование метода THERP на разных этапах анализа: как на этапе отбора, так и на этапе уточненного анализа, при выполнении которого требуется большая детализация. АНП по методу THERP является хорошо структурированным и обеспечивает качественный анализ надежности персонала при оценке риска. Данный метод позволяет учитывать восстановление ошибок и учет зависимостей между различными действиями одного оператора и различными операторами.

Однако, АНП по методу THERP является очень ресурсоемким и может потребовать больших трудозатрат для получения более точной оценки вероятности ошибки персонала.

**Метод HCR**

Метод когнитивной надежности человека (Human Cognitive Reliability) [2, 3] – основан на использовании кривых, представленных на рис. 1.



**Рис. 1. Вероятность ошибки для трёх типов действий оператора**

Эти зависимости получены на основе обработки данных с тренажеров оперативного персонала АЭС. Метод позволяет определить вероятность того, что оператор «не ответит» на возникшую аварийную ситуацию.

Рассматривается три типа действий персонала: действия, основанные на знаниях (кривая «знания»), действия, основанные на правилах (кривая «правила») и действия, основанные на навыке (кривая «навык»).

Этот график можно описать аналитически, используя следующее выражение:

$$P = \exp \left\{ - \left[ \frac{t / T_{1/2} - B_i}{A_i} \right]^{C_i} \right\}, \tag{1}$$

где:

$P$  - вероятность ошибки для данного располагаемого времени;

$t$  - время, располагаемое на выполнение операции;

$T_{1/2}$  - уточнённое среднее время выполнения задачи;

$A_i, B_i, C_i$  - коэффициенты, связанные с преобладающим типом действий оператора.

Для описания каждой из трех кривых используются изменяющиеся коэффициенты  $A_i, B_i, C_i$ , представленные в таблице 1.

**Таблица 1. Значения параметров  $A_i, B_i, C_i$**

Тип действия	$A_i$	$B_i$	$C_i$
Навыки	0,407	0,7	1,2
Правила	0,601	0,6	0,9
Знания	0,791	0,5	0,8

Зная время, необходимое для выполнения задачи, и используя значения, приведенные в таблице 1, по формуле (1) можно получить вероятность ошибки персонала. Изменяя поправочными коэффициентами время, необходимое для выполнения задачи, можно учесть квалификацию персонала, стресс и связи персонала с установкой.

Метод предполагает использовать для анализа задач, при выполнении которых маловероятна ошибка при постановке диагноза и существует только один способ реализации противоаварийных действий, не требующий от оператора выбора. Характерным примером такой задачи является глушение оператором реактора при отказе управляющей системы АЗ.

При использовании метода HCR необходимо учитывать, что метод рассматривает только ограниченный аспект действий персонала. Метод чувствителен к величине нормализованного времени для выполнения операции и типу поведения оператора, поэтому при их определении необходима большая точность.

## 1.2. Анализ действий во время аварий

Вероятность того, что оборудование приходит в неготовность в результате ошибки человека, является произведением основной (базовой) вероятности человеческой ошибки (ВЕН) на вероятность невозможности устранить ошибку:

$$P_{HE} = P_{ВЕН} \cdot R F_i.$$

Величина ВЕН, согласно [4], принимается равной:

$$P_{ВЕН} = 3 \cdot 10^{-2}.$$

Это значение ВЕН основывается на предположении, по крайней мере, среднего качества письменных инструкций и одинаково для любого типа ошибки.

Для каждого исследуемого компонента рассматриваются два выражения человеческих ошибок. Каждое из этих выражений является произведением значения основной (базовой) вероятности и наиболее эффективного фактора восстановления:

$P_{PHE} = P_{ВЕН} \cdot R F_i$  - для вероятности человеческой ошибки (ВЧО) невозможности восстановления положения;

$P_{ЕНЕ} = P_{ВЕН} \cdot R F_i$  - для ВЧО невозможности электропитания.

Полная ВЧО для компонента оценивается суммой этих выражений:

$$P_{HEP} = P_{PHE} + P_{ЕНЕ}.$$

В данной работе рассматриваются действия персонала при аварийных ситуациях на АЭС.

Послеаварийные ошибки персонала представляют собой ошибки при выполнении действий, являющихся ответными на аварийную ситуацию после наступления исходного события (динамических действий), и определяются уровнем тренировки оперативного персонала, существующими инструкциями, знаниями, которыми обладают операторы, а также другими факторами. Эти ошибки персонала возникают вследствие ошибок при диагностике или выполнении [1, 2, 5].

Моделирование включает качественный и количественный анализ надежности персонала, как одних из финальных задач при проведении АНП.

### Качественный анализ

Качественный анализ проводится для определения процедуры выполнения функций персонала с учетом конкретных условий его деятельности на АЭС, разработки моделей надежности в виде деревьев ошибок (деревьев событий) персонала (ДОП).

При проведении качественного анализа надежности персонала решаются следующие основные задачи [1, 2, 5]:

1. Определение перечня действий персонала (задач или функций) для рассматриваемых доминантных аварийных последовательностей.
2. Определение места выделенных функций персонала в разработанных моделях надежности систем и аварийных последовательностей (деревьях отказов и деревьях событий).
3. Выбор итоговых показателей надежности персонала.
4. Предварительный анализ алгоритмов выполнения рассматриваемых функций персонала АЭС (инструкций для противоаварийных действий), а также результатов детерминистического анализа процессов.
5. Определение требований к действиям персонала (критерии успеха и своевременности).
6. Определение условий деятельности персонала и рассматриваемых ситуаций.
7. Определение структуры оперативной группы персонала и особенностей взаимодействия операторов.

8. Выявление возможных ошибок персонала.
9. Детальное моделирование действий персонала на деревьях ошибок персонала.
10. Качественный отбор доминантных действий персонала для последующего количественного анализа.

Завершается качественный анализ надежности персонала выбором конечных состояний для количественного анализа.

### **Количественный анализ**

Количественный анализ проводится в следующем порядке [1, 2, 5]:

1. Количественный отбор доминантных действий персонала для детального моделирования.
2. Выбор номинальных исходных данных для доминантных последовательностей ошибок персонала, полученных при разработке деревьев ошибок.
3. Определение особенностей деятельности персонала при выполнении рассматриваемых функций персонала - факторов деятельности (ФДП) и факторов восстановления (ФВ) и выбор моделей для их учета и корректировки исходных данных по надежности персонала.
4. Анализ уровней зависимости между членами группы персонала и вероятностями выполнения последующих функций от предшествующих.
5. Оценка времени успешного выполнения функций в целом.
6. Оценка вероятности несвоевременного выполнения функции за допустимое время, в течение которого персонал должен приступить к выполнению или закончить выполнение требуемой функции и корректировка вероятностей невыполнения функций.
7. Оценка условных (на требование) вероятностей ошибок персонала (ВОП) для выбранных функций.

## **1.2. Разработка программы мониторинга (контроля) обеспечения безопасности АЭС**

Авторами была начата работа по созданию программы мониторинга (контроля) обеспечения безопасности атомных электростанций. Ниже дано краткое описание сегодняшнего состояния программы. Для ее разработки была настроена инфраструктура. Использовано средство изоляции Docker и система контроля версий git [6]. Создан один изолированный контейнер и установлены все необходимые инструменты: Python3.7 [7], Django [8], Sqlite3 [9]. С помощью стандартных средств Django [8] создана основа веб-приложения и начато его изменение и дополнение.

Логика приложения работает на Python3.7 [7], данные хранятся в базе Sqlite3 [9]. Для отрисовки страниц был использован шаблонизатор. Страницы отрисовывались с помощью автоматической генерации html страниц. Используются языки html, CSS, JavaScript.

После настройки инфраструктуры началась работа над приложением программы. Работа начата с вывода на экран списка всех АЭС и добавления кнопок управления. После этого началось заполнение страниц каждой АЭС.

Приложение состоит из:

- верхней «шапки» с кнопками поиска, главной страницы и контактами (рис. 2);
- под «шапкой» можно увидеть 2 столбика, в которых отделены блоки под каждую из АЭС (рис. 2);
- в блоке содержится: название АЭС, ее изображение, описание и кнопка перехода на страницу АЭС (рис. 2);
- на странице АЭС также присутствует верхняя «шапка», название АЭС, ее изображение и полное описание (рис. 3);
- под названием, изображением и полным описанием АЭС представлены данные паспорта безопасности (рис. 3).

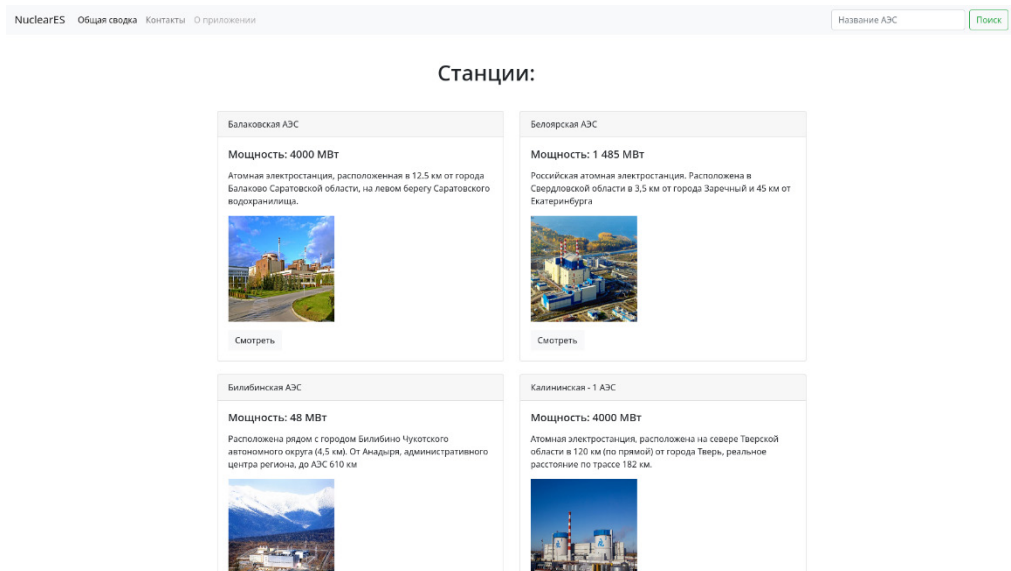


Рис. 2. Общий вид программы мониторинга (контроля) обеспечения безопасности АЭС

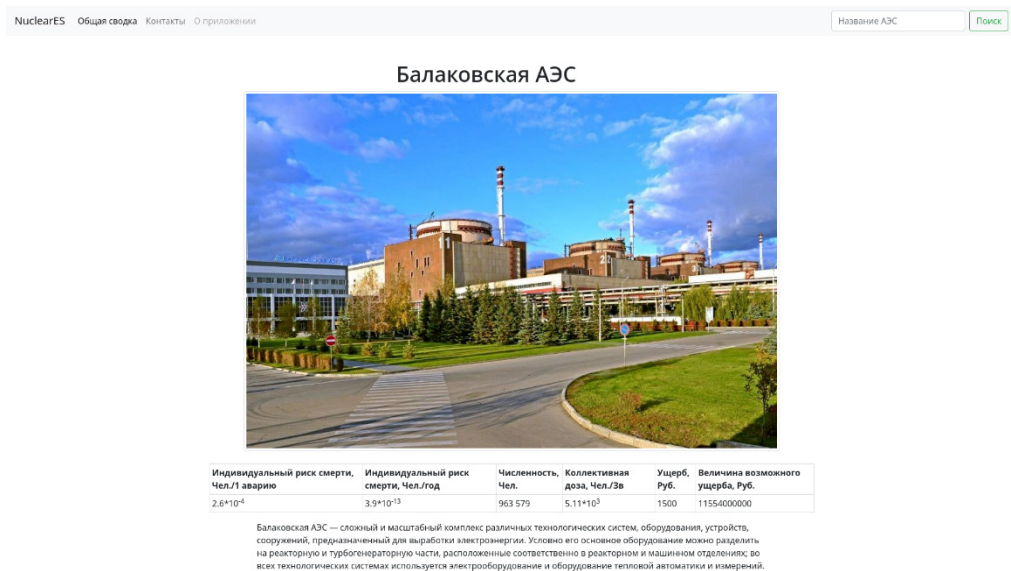


Рис. 3. Программа мониторинга (контроля) обеспечения безопасности АЭС. Страница АЭС

### 3. Результаты

1. Начата работа по выполнению оценки действий персонала при наиболее опасных (запроектных) авариях с выбросом источников тепловых нейтронов с низкой плотностью потока. Также начата разработка методического подхода для решения задач оценки доз внешнего и внутреннего облучения и оценки ущерба населению (с учетом возрастного состава населения), проживающему вокруг АЭС, при наиболее опасных (запроектных) авариях с выбросом источников тепловых нейтронов с низкой плотностью потока.

2. Начата разработка программы мониторинга (контроля) обеспечения безопасности атомных электростанций.

### Выводы

В дальнейшем необходимо:

1. Продолжить работу по выполнению оценки действий персонала при наиболее опасных (запроектных) авариях с выбросом источников тепловых нейтронов с низкой плотностью потока.

2. Продолжить разработку методического подхода для решения задач оценки доз внешнего и внутреннего облучения и оценки ущерба населению (с учетом возрастного состава населения), проживающему вокруг АЭС, при наиболее опасных (запроектных)

авариях с выбросом источников тепловых нейтронов с низкой плотностью потока.

3. Продолжить разработку программы мониторинга (контроля) обеспечения безопасности атомных электростанций.

### Благодарность

Работа выполнена и опубликована при поддержке РФФИ, гранты 18-07-00225, 18-07-0909, 18-07-01111, 19-07-00445.

### Список литературы:

1. Swain, A.D. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application / A.D. Swain, H.E. Guttman, H.E. NUREG / CR-1278, August, 1983.
2. Khakimova, A.Kh.. Visualization of bibliometric networks of scientific publications on the study of the human factor in the operation of nuclear power plants based on the bibliographic database Dimensions. Scientific Visualization Journal, in prin / A.Kh. Khakimova, O.V. Zolotarev, M.A. Berberova // Scientific Visualization, 2020, volume 12, number 2, Pp. 127 - 138.
3. Humphreys, P. Assessor Guide Safety and Reliability Directorate / P. Humphreys // United Kingdom Atomic Energy Authority, RTS 88 / 95 Q, Oktober 1988.
4. Human Reliability Analysis - Taking into Account of Pre-accident Human Actions. TIERSRU / 4NT / 33 / 00 RDS / 590, BELGATOM, Nuclear Engineering and Consulting Services, Brussels.
5. Haunaman, G.W. and Spurgin, A.J. Systematic Human Action Reliability Procedure (SHARP) / G.W. Haunaman, A.J. Spurgin, // EPRI NP-3583, Electric Power Research Institute, Palo Alto California, Project 2170-3, Interim report. June 1984.
6. Чакон, С. Git для профессионального программиста / С. Чакон, Б. Штрауб / - Питер, 2017. - 496 с. - ISBN 978-5-496-01763-3.
7. Beazley, D, Guido Van Rossum. Python: Essential Reference. - New Riders Publishing, 1999.
8. Чан У., Биссекс П., Форсье, Д. Django. Разработка веб-приложений на Python = Python Web Development with Django / У. Чан, П. Биссекс, Д. Форсье // пер. с англ. А. Киселёв. - СПб.: Символ-Плюс, 2009. - 456 с. - (High Tech). - ISBN 978-5-93286-167-7.
9. Андреев, В.В. Разработка моделей, алгоритмов и программного комплекса для решения задач оценки риска на АЭС при запроектных авариях. Вестник БГТУ / В.В. Андреев, М.А. Берберова, О.В. Золотарев, В.В. Чуенко, Е.В. Карпушин, Д.В. Дьячков, А.В. Суворов // 2020. - С. 43-51. <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-4-43-51>.

### References:

1. Swain, A.D. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application / A.D. Swain, H.E. Guttman, H.E. NUREG / CR-1278, August, 1983.
2. Khakimova, A.Kh.. Visualization of bibliometric networks of scientific publications on the study of the human factor in the operation of nuclear power plants based on the bibliographic database Dimensions. Scientific Visualization Journal, in prin / A.Kh. Khakimova, O.V. Zolotarev, M.A. Berberova // Scientific Visualization, 2020, volume 12, number 2, Pp. 127 - 138.
3. Humphreys, P. Assessor Guide Safety and Reliability Directorate / P. Humphreys // United Kingdom Atomic Energy Authority, RTS 88 / 95 Q, Oktober 1988.
4. Human Reliability Analysis - Taking into Account of Pre-accident Human Actions. TIERSRU / 4NT / 33 / 00 RDS / 590, BELGATOM, Nuclear Engineering and Consulting Services, Brussels.
5. Haunaman, G.W. and Spurgin, A.J. Systematic Human Action Reliability Procedure (SHARP) / G.W. Haunaman, A.J. Spurgin, // EPRI NP-3583, Electric Power Research Institute, Palo Alto California, Project 2170-3, Interim report. June 1984.
6. CHakon, S. Git dlya professional'nogo programmista / S. CHakon, B. SHtraub / - Piter, 2017. - 496 p. - ISBN 978-5-496-01763-3.
7. Beazley, D, Guido Van Rossum. Python: Essential Reference. - New Riders Publishing, 1999.
8. CHan U., Bisseks P., Fors'e, D. Django. Razrabotka veb-prilozhenij na Python = Python Web Development with Django / U. CHan, P. Bisseks, D. Fors'e // per. s angl. A. Kiselyov. - SPb.: Simvol-Plyus, 2009. - 456 p. - (High Tech). - ISBN 978-5-93286-167-7.
9. Andreev, V.V. Razrabotka modelej, algoritmov i programmnogo kompleksa dlya resheniya zadach ocenki riska na AES pri zaproektnyh avariyah. Vestnik BGTU / V.V. Andreev, M.A. Berberova, O.V. Zolotarev, V.V. CHuenko, E.V. Karpushin, D.V. D'yachkov, A.V. Suvorov // 2020. - Pp. 43-51. <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-4-43-51>.

*Статья поступила в редколлегию 15.04.2020.*

*Рецензент: канд. техн. наук, доц.,*

*Брянский государственный технический университет*

*Подвесовский А.Г.*

*Статья принята к публикации 23.04.2020.*

### Сведения об авторах

**Андреев Вячеслав Викторович**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Ядерные реакторы и энергетические установки»  
Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексея (Нижний Новгород, Россия)

E-mail: [vyach.andreev@mail.ru](mailto:vyach.andreev@mail.ru)

### Information about authors:

**Andreev Vyacheslav Viktorovich**

Full Doctor, Professor, Head of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia)

E-mail: [vyach.andreev@mail.ru](mailto:vyach.andreev@mail.ru)

**Берберова Мария Александровна**

к.т.н., доцент кафедры информационных технологий и естественно-научных дисциплин АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия), научный сотрудник АНО Международный Центр по ядерной безопасности (Москва, Россия), заместитель директора по науке АНО «Научно-исследовательский Центр физико-технической информатики» (Нижний Новгород, Россия)  
E-mail: maria.berberova@gmail.com

**Чуенко Владислав Васильевич**

бакалавр, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)  
E-mail: xetyrj22@gmail.com

**Золотарев Олег Васильевич**

К.т.н., доцент, заведующий кафедрой информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)  
E-mail: ol-zolot@yandex.ru

**Карпушин Егор Викторович**

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)  
E-mail: egor9731@yandex.ru

**Дьячков Дмитрий Владимирович**

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)  
E-mail: dimitri.dyach@gmail.com

**Суворов Андрей Викторович**

магистрант, кафедра телекоммуникационных систем и информационной безопасности АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)  
E-mail: suvorov-97@mail.ru

**Федосеева Алена Юрьевна**

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)  
E-mail: listik1301@yandex.ru

**Фиксаков Григорий Николаевич**

магистрант, кафедра телекоммуникационных систем и информационной безопасности АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)  
E-mail: nekron06@mail.ru

**Berberova Maria Aleksandrovna**

PhD, docent, Department of Information Technology and Natural Sciences, Researcher ANO International Nuclear Safety Center (Moscow, Russia), Deputy Director for Science ANO «Scientific and Research Center for Information in Physics and Technique» (Nizhny Novgorod, Russia)

E-mail: maria.berberova@gmail.com

**Chuenko Vladislav Vasilievich**

bachelor, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)  
E-mail: xetyrj22@gmail.com

**Zolotarev Oleg Vasilievich**

Ph.D., Docent, Head of the Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)

E-mail: ol-zolot@yandex.ru

**Karpushin Egor Victorovich**

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)  
E-mail: egor9731@yandex.ru

**Dyachkov Dmitriy Vladimirovich**

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)  
E-mail: dimitri.dyach@gmail.com

**Suvorov Andrey Victorovich**

Master student, Department of Telecommunication Systems and Information Security ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)  
E-mail: suvorov-97@mail.ru

**Fedoseeva Alena Yuryevna**

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)  
E-mail: listik1301@yandex.ru

**Fiksakov Grigoriy Nikolaevich**

Master student, Department of Telecommunication Systems and Information Security ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)  
E-mail: nekron06@mail.ru