

## МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ С УЧЁТОМ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ

© 2022 **Родионов Дмитрий Григорьевич**

доктор экономических наук, профессор Высшей инженерно-экономической школы  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),  
Россия, Санкт-Петербург  
E-mail: dmitry.rodionov@spbstu.ru

© 2022 **Алексеев Владимир Алексеевич**

аспирант Высшей инженерно-экономической школы  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),  
Россия, Санкт-Петербург  
E-mail: alexvalex94@gmail.com

© 2022 **Терентьева Дарья Андреевна**

магистрант  
Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),  
Россия, Санкт-Петербург  
E-mail: dulybina@mail.ru

© 2022 **Конников Евгений Александрович**

кандидат экономических наук, доцент Высшей инженерно-экономической школы  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),  
Россия, Санкт-Петербург  
E-mail: konnikov.evgeniy@gmail.com

Следствием современных тенденций глобализации и цифровизации является экспоненциальный рост потребностей в энергии. Одной из наиболее эффективных и распространённых направлений генерации энергии является атомная энергетика. При этом потенциальный ущерб окружающей среде от атомной электростанции значительно менее явный чем от использования углеводородных источников энергии. Вследствие этого данным потенциальным ущербом значительно пренебрегают, что, в свою очередь, может привести к значительным экологическим последствиям в долгосрочном периоде. В рамках данного исследования предлагается универсальный инструментарий предиктивной оценки воздействия АЭС на окружающую среду, основанный на принципах нечеткой логики.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, АЭС, атомная энергетика, экология, окружающая среда, устойчивое развитие, нечетка логика, выбросы.

Разрушительное влияние на окружающую среду объектов энергетики представляет собой главную экологическую проблему данной отрасли. Основываясь на том, что отказаться от объектов крупной энергетики невозможно, государство контролирует степень данного воздействия, финансирует проекты по возмещению экологического ущерба и обязует предприятия совершать плату за НВОС (негативное воздействие на окружающую среду).

Разрушительное влияние на экологию различных объектов контролируется Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации. В зависимости от степени

воздействия объекты делятся на IV категории в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28.09.2015 N 1029 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий». Данные категории можно ранжировать следующим образом: I — сильное воздействие, II — умеренное воздействие, III — незначительное воздействие, IV — минимальное воздействие. Категория присуждается объекту при обязательной постановке на государственный учет [1, 2].

Атомные электростанции относятся ко второй категории воздействия на окружающую

среду, что обусловлено экологичностью данной технологии производства энергии. При ядерной реакции высвобождается значительное количество энергии при отсутствии процесса горения и вредных для окружающей среды выбросов веществ, образующихся в данном процессе. Кроме того, энергоёмкость топлива для АЭС очень высока в сравнении с энергоёмкостью топлива на ТЭЦ. Несмотря на экологичность технологии, атомные электростанции постоянно оказывают воздействие на окружающую среду тем или иным образом, которое не зафиксировано в виде нормативов ввиду сложности количественного подсчета.

Авторы считают, что данный подход не является верным с научной точки зрения, так как не включает комплексное влияние на окружающую среду такого объекта энергетики как атомная электростанция.

Поскольку исследование комплексного влияния АЭС на окружающую среду предполагает выход за рамки нормативных показателей, разработанных Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации, и разработки самостоятельной системы оценки влияния, авторы прибегают к методологии нечетко-множественного моделирования. При помощи нечетко-множественного моделирования можно оценить комплексное влияние АЭС на окружающую среду вне зависимости от того, существует ли норматив для используемого индикатора оценки влияния [3].

На протяжении всего существования атомной электростанции оказывается влияние на окружающую среду, которое можно разделить на 3 временных категории: влияние АЭС на экологию во время строительства, влияние АЭС на экологию во время эксплуатации, влияние АЭС на экологию после истечения срока эксплуатации.

Каждая категория обусловлена факторами, которые либо учитываются на данный момент в соответствии с законом об охране окружающей среды, либо имеют место быть, но не фиксируются как «причинение вреда экологии».

При строительстве атомной электростанции осуществляется значительная проектно-исследовательская работа перед реализацией самого проекта. Согласно Перечню видов инженерных изысканий, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации N 20 установлены следующие основные виды инженерных изысканий [4]:

- инженерно-геодезические;
- инженерно-геологические;
- инженерно-гидрометеорологические;
- инженерно-экологические;
- инженерно-геотехнические.

Для осуществления строительства атомной электростанции необходимо провести вышеописанные изыскания в рамках составления проектной, проектной и рабочей документации.

Любое строительство промышленных объектов влечет за собой причинение весомого ущерба экосистеме территории, на которой располагается сам объект. В случае с АЭС под воздействие попадает не только площадка для строительства самого здания электростанции, зданий для хозяйственных нужд и охлаждающих сооружений, но вся СЗЗ (санитарно-защитная зона).

Одним из ключевых показателей влияния АЭС на окружающую среду являются выбросы веществ в атмосферу. Выбросы в атмосферу различных веществ на этапе строительства атомной электростанции происходят в результате деятельности, непосредственно связанной со строительными работами. Кроме того, источником данного загрязнения на этапе строительства может послужить транспорт. В основном данные выбросы представляют собой результат горения нефтепродуктов, окись углерода, окись азота, окись серы, углеводороды, выбросы от аэрозолей для сварки и прочее. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ контролируются нормативами показателей, соответствующим предельно допустимым выбросам, лимитным выбросам и сверхлимитным выбросам. Большая часть вышеописанных выбросов в атмосферу негативно влияет на изменчивость климата, представляющую собой одну из главных проблем экологии в мире на данный момент. Поэтому необходимо учитывать данный фактор при оценке влияния АЭС на окружающую среду.

Кроме того, немаловажное значение имеет фактор пылевого загрязнения. Строительную отрасль часто критикуют за то, что она является одним из тяжелых загрязнителей, которые генерируют пыль в атмосферу от строительных работ. Эмиссия строительной пыли возникает в результате многих видов деятельности, таких как земляные работы, бурение, транспортировка сыпучих материалов, погрузка и выгрузка, хранение материалов под открытым небом, изготовление бетона и раствора, резка и заполнение, а также движение техники. Эти действия высвобождают

кальциевый элемент PM<sub>2.5</sub>, который является компонентом строительной пыли и загрязнителем окружающей среды.

Твердые частицы могут оказывать различное, но в равной степени разрушительное воздействие на окружающую среду по отношению к парниковым газам. Воздушно-капельное течение и мелкие твердые частицы могут непосредственно изменять глобальный баланс поступающей солнечной радиации, искажать эффект альбедо и вступать в реакцию с другими загрязнителями. Данный фактор также необходимо учитывать при комплексной оценке влияния АЭС на окружающую среду, так как он наносит значительный ущерб экологической обстановке.

Следующим фактором воздействия является шумовое загрязнение, также известное как шум окружающей среды или звуковое загрязнение. Оно представляет собой распространение шума с различными воздействиями на деятельность человека или животных, большинство из которых в определенной степени вредны. Основным источником шумового загрязнения в период строительства АЭС выступает строительная техника. Воздействие антропогенного шума значительно сказывается на биосфере: пчелы теряют ориентирование, и их личинки погибают, у птиц наблюдается преждевременная линька, у других представителей фауны может произойти преждевременное воспроизведение потомства и т.д. Установлено, что беспорядочный шум мощностью 100 дБ влияет на прораствание семян, а именно задерживает его. Для сокращения шумового воздействия разрабатываются мероприятия, которые помогают ограничить влияние на окружающую среду, например, возводятся шумозащитные экраны.

Необходимо учесть, что строительство такого объекта как атомная электростанция — долгий процесс, на протяжении которого данный фактор негативного воздействия на окружающую среду присутствует постоянно. Именно поэтому его фиксация и учет в комплексном влиянии АЭС на экологию является обязательным.

Также разрушительному воздействию может подвергаться ландшафт площадки строительства, так как атомная электростанция представляет собой крупный промышленный объект, важную роль в возведении которого играют такие прочные и, что самое главное, тяжелые материалы как бетон, что обусловлено повышенными требованиями к безопасности объекта во избежание

утечек радиоактивных отходов.

Комплекс зданий, возводимых в рамках реализации строительства АЭС и тяжелая строительная техника, необходимая непосредственно для сооружения объекта, оказывают сильное воздействие на изменение ландшафта площадки строительства. В связи с этим происходит нарушение структуры почвенного покрова и его биогеоэкологической и биосферной функций. Почва, выступающая в качестве среды обитания, становится абсолютно непригодной для жизни в сложившейся обстановке, и, помимо этого, изменяется водный режим данной территории, а также происходит механическое повреждение почвы. Данное воздействие осуществляется на протяжении всего этапа строительства, что связано с перемещением строительной техники по территории будущего объекта, необходимостью формировать котлованы для строительства зданий и трансформировать земельный покров в соответствии с требованиями проекта.

Воздействие АЭС сказывается также и на изменении растительного покрова, последнего показателя влияния в данной временной категории. Растительный покров представляет собой важную составляющую экосистемы территории, отведенной под санитарно-защитную зону и саму площадь застройки. В связи с реализацией строительства происходит полное сведение растительного покрова в местах будущих зданий и сооружений, складов строительных материалов и техники, подъездных трасс и прочего. Несмотря на то, что растительный покров сохраняется на большей части СЗЗ, его частичное сведение оказывает влияние на локальную экосистему, хоть и менее значительное, чем другие факторы. А значит, данный показатель также необходимо учитывать при оценке комплексного влияния АЭС на окружающую среду.

Таким образом, авторы выделяют пять показателей воздействия АЭС на окружающую среду на этапе строительства. Следующим шагом необходимо оценить влияние атомных электростанций на экологию во время эксплуатации. Промежуточным этапом между строительством и эксплуатацией является ввод в эксплуатацию атомной электростанции. Ввод в эксплуатацию является процессом, важным для последующей безопасной эксплуатации АЭС, и следует обеспечивать, чтобы этот процесс тщательно разрабатывался, планировался, выполнялся и регулировался. Процесс ввода в эксплуатацию следует

рассматривать как постепенный переход от стадии строительства к стадии эксплуатации станции [5].

Далее наступает период эксплуатации. Она представляет собой всю деятельность, направленную на достижение безопасным образом цели, для которой была построена АС, включая работу на мощности, пуск, остановки, испытания, техническое обслуживание, ремонт и перегрузку топлива, инспектирование во время эксплуатации и другую, связанную с этим деятельность. Именно на данном этапе начинается непосредственная работа с ядерным топливом, благодаря которому в реакторах станции происходит ядерная реакция, в результате которой выделяется огромное количество энергии и происходит ее дальнейшее преобразование. Работа с радиоактивным топливом предполагает наличие отходов в результате данной деятельности, что приводит к необходимости реализации утилизации или хранения вышеуказанных отходов в случае невозможности утилизации. Кроме того, данная технология производства энергии сопряжена с необходимостью использования охладительных систем во избежание разрушительных последствий, что, в свою очередь, приводит к тепловому воздействию на окружающую среду. Таким образом, во время эксплуатации АЭС влияет на экологию совершенно по-другому, нежели на этапе строительства. Существуют различные факторы, часть из которых учитывается на данный момент в мониторинге воздействия атомных станций на окружающую среду, а часть не фиксируется, несмотря на прямое негативное влияние.

Тепловое загрязнение является одним из серьезных негативных факторов воздействия на окружающую среду при функционировании АЭС. При КПД современных АЭС 33–35% порядка 65% тепловой энергии попадает в окружающую среду. В технологических схемах АЭС мощными открытыми источниками тепла являются градирни, водоемы-охладители, брызгальные бассейны. Их эксплуатация, как правило, приводит к изменениям микроклиматических характеристик, вызывает тепловое загрязнение водоемов, влияет на процессы жизнедеятельности флоры и фауны прилегающих к АЭС экосистем. Промышленное тепловое загрязнение в озерах зимой сохраняется в глубоководной толще до следующей зимы, тогда как добавленное летом тепло относительно быстро рассеивается в атмосферу. Соответственно, зимнее тепловое загрязнение может оказать

долгосрочное воздействие на экологию озера, воздействуя на бентические биогеохимические процессы. Самое непосредственное изменение — это снижение уровня растворенного кислорода и повышение рН. Теплая вода не может содержать столько растворенного кислорода, сколько холодная вода, и органическое вещество разлагается быстрее при более высоких температурах. Повышение концентрации разложившихся водных питательных веществ вызывает эвтрофикацию, которая чаще всего проявляется в цветении водорослей, которые блокируют солнечный свет для нижележащих водных растений. Обилие водорослей является легким источником пищи для аэробных микробов, которые растут в популяции и еще больше истощают растворенный кислород. Низкий уровень кислорода создает гипоксические мертвые зоны, которые не могут поддерживать большинство водных организмов [6]. Кроме того, быстро нагреваемая вода ускоряет метаболизм хладнокровных водных животных, таких как рыба, вызывая недоедание из-за недостатка источников пищи. Поскольку окружающая среда обычно становится более неблагоприятной для водной фауны района, многие виды исчезают, в то время как более уязвимые виды могут погибать, изменяя биологическое разнообразие как первоначальных, так и захваченных мест. Эти эффекты особенно драматичны вблизи коралловых рифов, где обитают более 2 миллионов водных видов и примерно 25% всей морской жизни. Обширные обесцвечивания кораллов (гибель кораллов) наблюдается вблизи прибрежных электростанций, которые выпускают нагретую воду в океан [7]. Системы забора воды неизбежно втягивают многие организмы в систему охлаждения электростанции, на их количество и вид влияют его расположение, конфигурация и режим работы. Данный вид воздействия непосредственно связан с технологией производства атомной энергии, при которой выделяется значительное количество тепла, и использование градирен, охладительных водоемов и брызгальных бассейнов является необходимостью во избежание перегрева реактора и разрушительных последствий.

Кроме того, наиболее разрушительным воздействием является радиационное загрязнение. Радиационное загрязнение окружающей среды при эксплуатации атомной электростанции — неотъемлемая часть процесса, связанного с ядерной энергетикой. Радиационное загрязнение можно разделить на три категории:

1. Выбросы радионуклидов в атмосферу.
2. Сбросы радиоактивных веществ в водные объекты.
3. Радиоактивные отходы.

Рассмотрим каждую из первых двух категорий радиационного загрязнения окружающей среды во время эксплуатации атомной электростанции. Первой категорией для рассмотрения являются радиоактивные выбросы в атмосферу. Отличительной особенностью атомных электростанций является технология, предполагающая использование ядерного топлива. Данный процесс приводит к образованию выбросов радионуклидов в атмосферу вместе с воздухом, проходящим через вентиляционные трубы, высота которых может составлять более 100 метров. Процесс выведения газов из помещений АЭС обязательно сопровождается дозиметрическим контролем содержания радионуклидов в удаляемом воздухе, контролем работы систем вентиляции и эффективности фильтров. Очищенные таким образом выбросы поступают в вентиляционные трубы, смешиваются с большими объемами воздуха, рассеиваются на очень большой площади. Критерием приемлемости выбросов радиоактивных газов и аэрозолей АЭС в атмосферу является не превышение проектного расчетного уровня среднесуточного и среднемесячного допустимых выбросов радионуклидов в окружающую среду, регламентированных в санитарных правилах и нормах по радиационной безопасности [9].

Второй категорией радиационного загрязнения, предложенного на рассмотрение, являются сбросы радиоактивных веществ. Загрязнение водных объектов различными веществами в результате деятельности атомных электростанций приносит огромный ущерб окружающей среде, поскольку потребность в воде как в охладителе у данного объекта энергетики очень высока. Радиационное воздействие на водные объекты может привести к гибели представителей локальной экосистемы и к дальнейшему распространению загрязнителей посредством пищевой цепочки. Частицы ядерного топлива редко обнаруживаются в стоках при нормальных условиях эксплуатации атомных электростанций, хотя они были обнаружены в выбросах шведских энергетических реакторов. Тем не менее, частицы из неисправных топливных штифтов могут попасть в охлаждающую жидкость, которая может транспортировать их к различным частям силовой установки. Чаще активируются металлические частицы или

частицы коррозии высвобождаются в охлаждающую жидкость и транспортируются в первичном контуре и иногда за пределы контура. Несмотря на то, что сбросы радиоактивных загрязняющих веществ в водные объекты по официальным данным намного ниже, нежели установленные нормативы, нельзя не рассматривать данный источник радиационного загрязнения при комплексной оценке воздействия атомных электростанций на окружающую среду.

Также одним из значительных воздействий АЭС на окружающую среду является химическое загрязнение, которое рассматривается также в двух категориях: сбросы химических элементов в водные объекты и выбросы химических веществ в атмосферу. АЭС вызывают химическое загрязнение поверхностных вод. Загрязняющие вещества можно подразделить на три группы:

1. Неорганическое вещество, не превышающее предельно допустимых концентраций (ПДК) в водах (сульфаты и хлориды кальция, магния и натрия);
2. Токсичные вещества, концентрации которых превышают их ПДК в водоемах (соли железа, меди и цинка, соединения фтора и т. Д.);
3. Вещества, влияющие на биологические значения потребности в кислороде (соли аммония, нитраты, сульфиды и т.д.).

Тяжелые металлы и соли также накапливаются в воде, используемой в качестве охладителя атомными станциями. Данные вещества при попадании обратно в их первоначальный источник могут нанести вред водной экосистеме.

Атомные электростанции в значительно меньшей степени наносят вред окружающей среде выбросами химических элементов в атмосферу, которые, в свою очередь, влияют на такую актуальную экологическую проблему как изменчивость климата. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ контролируются нормативами показателей, соответствующим предельно допустимым выбросам, лимитным выбросам и сверхлимитным выбросам.

«Объемы выбросов в атмосферный воздух атомными станциями не превышают допустимых значений и значительно ниже установленных природоохранными органами лимитов. Основная доля выбросов атомных станций приходится на пускорезервные котельные, котельные профилакториев и периодически включаемые с целью регламентного опробования резервные дизель-генераторные станции», — сообщается на сай-

те «Росэнергоатома» в разделе «воздействие на окружающую среду» [10]. В рамках эксплуатации атомных электростанций могут происходить выбросы следующих веществ:

1. Диоксид серы.
2. Оксид азота.
3. Твердые частицы.

Диоксид серы (сернистый ангидрид)  $SO_2$  — один из наиболее токсичных газообразных выбросов энергоустановок, составляющий более 90% выбросов сернистых соединений с дымовыми газами котлоагрегатов (остальные —  $SO_3$ ). Также содержится в природном газе в незначительных количествах, однако имеет место быть, а значит данный химический загрязнитель необходимо учитывать при комплексной оценке АЭС. Диоксид серы влияет на окисление, разрушает материалы, вредно влияет на здоровье человека. Продолжительность его пребывания в атмосфере относительно невелика: в сравнительно чистом воздухе — 15–20 суток, в присутствии больших количеств аммиака и других веществ — несколько часов. При наличии кислорода  $SO_2$  переходит в  $SO_3$  и, взаимодействуя с водой, образует серную кислоту. Конечные продукты указанных реакций распределяются следующим образом: в виде осадков на поверхность литосферы — 43%, на поверхность гидросферы — 13%; поглощается: растениями — 12%, поверхностью гидросферы 13%. Накопление серосодержащих соединений в основном происходит в Мировом океане. Влияние этих продуктов на людей, животных, растения и различные другие вещества разнообразно, зависит от их концентрации и многих факторов окружающей среды.

Оксиды азота ( $NO_x$ ) образуются при сжигании любого из ископаемых видов топлива, содержащих азотные соединения, а также и не содержащих за счет окисления азота воздуха. Азот образует с кислородом ряд соединений) свойства которых, активность и продолжительность существования разные и слабо зависят от вида и состава топлива. Суммарное количество оксидов азота приводят к  $NO_2$ . Их концентрация определяется режимом и организацией процессов горения топлива. Оксиды азота вредно влияют на здоровье человека, способствуют образованию парникового эффекта и разрушению озонового слоя. Кроме того, оксиды азота вызывают «вымирание лесов», кислотные дожди и так далее. Также загрязнителями выступают твердые частицы, вызывающие проблемы с дыханием при попадании в организм человека или животного.

Кроме того, необходимо отметить в качестве отдельного воздействия повышение уровня влаги в атмосфере. Данный тип воздействия связан с технологией получения энергии посредством ядерной реакции, в результате которой высвобождается значительное количество энергии и требуется охлаждение реактора. Система охлаждения, состоящая из градирен и брызгальных бассейнов, работая, приводит к повышенной влажности на территории самой атомной станции и прилегающим к ней. Увеличение влажности при реализации процесса охлаждения приводит к следующим последствиям:

- формированию пароконденсатных факелов, распространяющихся в холодный период года на расстояния до 2–3 км и более при устойчиво-стратификационной атмосфере, а также до 0,5–0,7 км в летний период;
- «затемнению» подстилающей поверхности и снижение, в связи с этим на 30–50% прихода прямой солнечной радиации в ближней к факелам зоне;
- снижению дальности метеорологической видимости в экстремальных условиях до 2–4 км, а при «застойных» явлениях в холодный период года — менее 0,5 км.

Данное воздействие атомных электростанций в целом влияет на экосистему и микроклимат локальной местности. Несмотря на то, что данное влияние в меньшей степени разрушительно в сравнении с другими типами воздействия, его необходимо учитывать при комплексной оценке влияния АЭС на окружающую среду.

Одним из самых опасных воздействий на окружающую среду являются радиоактивные отходы. Отходы представляют собой материалы, которые образуются в результате различных производственных промышленных процессов и не обладают полезными свойствами. Природоохранное законодательство тщательно следит за обращением с отходами производства и потребления в соответствии с установленными нормами на образование отходов и на лимиты по размещению отходов. Данные нормы рассчитываются на основании лицензий, полученных промышленными объектами. Основная проблема окружающей среды, связанная с ядерной энергетикой — это создание радиоактивных отходов, таких как хвосты урановой мельницы, отработавшее (использованное) реакторное топливо и другие радиоактивные отходы. Эти материалы могут оставаться радиоактивными и опасными для здоровья человека в течение тысяч лет. На радио-

активные отходы распространяются специальные нормы, регулирующие их обращение, транспортировку, хранение и удаление для защиты здоровья людей и окружающей среды. Существует три варианта формы, в которой могут находиться радиоактивные отходы: жидкая, твердая и газообразная. После образования радиоактивных отходов и до осуществления дальнейших действий (транспортировка, хранение), отходы преобразуют в более экологичные и компактные формы и состояния. Например, кондиционирование и компактирование представляют собой варианты обращения с радиоактивными отходами, благодаря которым осуществляется перевод отходов в химически стойкое и экологически безопасное твердое состояние, и перевод в форму меньшего объема. Газообразные отходы очищаются на фильтрах, заполненных сорбентами. Из системы фильтрации выходит чистый воздух, а радиоактивные вещества задерживаются на фильтрах. Фильтры утилизируются, как и другие твердые радиоактивные отходы.

Система обращения с жидкими отходами предполагает перевод в твердую форму вещества различными способами, одним из которых может выступить выпаривание. После данного перевода твердый остаток отходов подвергается процессу цементирования, остекловывания или битумирования:

- Цементирование;
- Битумирование;
- Остекловывание.

Остекловывание на данный момент представляет собой основной способ обработки отходов с высокой концентрацией радионуклидов для длительного хранения.

Для твердых радиоактивных отходов существует несколько методов переработки, например переплавка или сжигание. Для металлических отходов используется метод переплавки: радиоактивные вещества переходят в шлак, образующийся на поверхности расплава, а очищенный металл после радиационного контроля можно повторно использовать в промышленности. Еще один способ переработки отходов — сжигание, который применяется для горючих твердых отходов. Образующаяся при сжигании зола также подвергается цементированию, битумированию или остекловыванию. Для снижения объема твердых радиоактивных отходов существуют различные методы, например прессование.

Заключительный этап процесса обращения с радиоактивными отходами представляет собой

хранение и захоронение — отходы размещаются в специально оборудованных хранилищах, а воздействие на окружающую среду и человека максимально сокращается. Данные хранилища тщательно контролируются экологическими органами и отделами на самой атомной электростанции.

Основная опасность, которую составляют радиоактивные отходы — радиационное заражение окружающей среды и представителей биосферы, что может привести к генным мутациям, отчуждению земель и к тому, что зараженная местность станет непригодной и опасной для жизни людей, животных, растений и прочего. В российском законодательстве предусмотрены меры безопасности, которые ограничивают заражение окружающей среды посредством особой методики утилизации, и при невозможности утилизации, захоронения радиоактивных отходов.

Таким образом, авторы предлагают к рассмотрению семь показателей влияния АЭС на окружающую среду на этапе эксплуатации, каждый из которых должен быть учтен при комплексной оценке влияния атомной электростанции на окружающую среду. Следующим этапом исследования является оценка влияния на окружающую среду после завершения срока эксплуатации АЭС. В отличие от большинства объектов промышленности и энергетики, в частности, атомные электростанции по истечении срока эксплуатации не перестают оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Данная ситуация происходит из-за процесса получения энергии, технология которого напрямую связана с использованием ядерного топлива, а значит и с возникновением радиоактивных отходов. По истечении срока эксплуатации АЭС становится источником загрязнения, воздействие которого на окружающую среду и человека, необходимо ограничить. Сложность заключается в том, что существуют такие категории радиоактивных отходов, которые невозможно уничтожить на данном этапе развития науки, и остается лишь хранение и захоронение — процессы, связанные с риском распространения загрязняющих радиоактивных веществ при каком-либо нарушении вышеуказанных процессов. Природа ядерных отходов, образующихся на атомных электростанциях, различна по своей природе и может вызывать различные проблемы утилизации. Их токсическое воздействие на живые организмы незаметно, медленно, но неуклонно, оно может загрязнять окружающую среду, если с самого начала не будут приняты меры

предосторожности. Экологичное, регулируемое удаление химических и радиоактивных отходов является обязательным условием.

Радиоактивные отходы классифицируются как малоактивные или высокоактивные отходы. Радиоактивность этих отходов может варьироваться от немного более высокого, чем естественный фоновый уровень, например, для хвостов урановой мельницы, до гораздо более высокой радиоактивности отработанного (отработавшего) реакторного топлива и частей ядерных реакторов. Радиоактивность ядерных отходов со временем уменьшается в результате процесса, называемого радиоактивным распадом. Время, необходимое для снижения радиоактивности радиоактивного материала до половины его первоначального уровня, называется периодом полураспада радиоактивности. Радиоактивные отходы с коротким периодом полураспада часто временно хранятся перед захоронением, чтобы снизить уровень радиации в местах утилизации. Но основная сложность заключается в обращении с радиоактивными отходами, имеющими очень долгий период полураспада. Обращение с РАО в различных труднодоступных нежилых локациях, таких как: глубоководное дно, космос, пустыни, глубокие геологические формации привлекло значительное внимание ученых-ядерщиков. Если рассматривать атомные электростанции на этапе «по истечении срока эксплуатации», то сам объект представляет собой источник радиации, воздействие которого необходимо снизить и ограничить. Управление выводом из эксплуатации РАО является актуальным и сложным вопросом в основном из-за многообразия потенциальных трудностей, а также технологических решений, позволяющих их преодолеть. На данный момент эта тема не имеет «твердого основания» в российской практике, как деятельность по выводу из эксплуатации таких крупных объектов, как энергоблоки АЭС и радиохимические заводы еще впереди. Кроме того, проблема отягощена общим восприятием, что утилизация выводимых из эксплуатации РАО должна быть профинансирована государством независимо от эффективности применяемых технологий обеззараживания и донатажа (аналогично накопленным РАО, которые находятся в федеральном имуществе). Существует несколько вариантов захоронения:

- Приземное захоронение на уровне земли или в пещерах ниже уровня земли (на глубинах в десятки метров);

- Глубокое геологическое захоронение (на глубинах от 250 до 1000 м для заминированных хранилищ или от 2000 до 5000 м для скважин).

Глубокое геологическое захоронение является предпочтительным для ряда стран, в том числе и для России. «5 сентября 2019 года в Дрездене в научно-исследовательском центре имени Гельмгольца подписано пятистороннее международное соглашение о научном сотрудничестве между Федеральным государственным унитарным предприятием «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (ФГУП «НО РАО», предприятие Госкорпорации «Росатом»), Федеральным институтом ядерной безопасности Российской академии наук (ИБРАЭ РАН, Россия), Федеральным институтом геонаук и природных ресурсов (BGR, Германия), BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC, Германия) и Обществом по безопасности установок и реакторов Германии (GRS), которые занимаются исследованиями и совместной разработкой подходов и методов обращения с радиоактивными отходами и финальной изоляцией радиоактивных отходов в глубоких геологических формациях» — сообщается на веб-странице предприятия «Росатом» [11]. В связи с необходимостью ограничения воздействия от ЯРОО (ядерных и радиационно-опасных объектов) и заинтересованностью государства в реализации метода, связанного с глубокими геологическими формациями, необходимо рассмотреть потенциальное воздействие данного решения на окружающую среду в рамках комплексной оценки воздействия АЭС на экологию.

Кроме того, одним из показателей воздействия АЭС после завершения срока эксплуатации является загрязнение грунтовых вод. Задействование технологии, предполагающей использование глубокой геологической формации, принесет значительный ущерб экологии в направлениях, связанных со строительством защитных барьеров и помещением их на большой глубине. Потенциальный вред, которому подвергнется район захоронения радиоактивных отходов на уровне до 5 км ниже поверхности земли, воздействует на грунтовые воды, так как необходимо будет нарушить целостность грунта в месте предполагаемого захоронения. Кроме нарушения целостности, может быть осуществлено загрязнение грунтовых вод различными веществами вследствие использования различной техники для бурения, строительства и прочих сопутствующих процессов.

Загрязненные грунтовые воды представляют собой опасность загрязнения почв и связанных

с ними водных систем. Данный фактор необходимо учесть при комплексной оценке влияния АЭС на окружающую среду. Помимо загрязнения подземных вод, создание приземных и глубоких геологических захоронений, неизбежно связано с непосредственным воздействием на грунт и почвенный покров.

Потенциальный вред может быть нанесен строительной техникой, другим оборудованием и самим процессом создания захоронения на различных глубинах. Данный фактор необходимо учитывать при комплексной оценке воздействия на окружающую среду, так как перемешивание грунта, нарушение его целостности негативно влияет на почвенный покров и расположенные

в данной локации экосистемы. Строительство геологической формации однозначно приводит к механическому повреждению почв и отчуждению земель.

Таким образом, даже после завершения срока эксплуатации АЭС существует три показателя воздействия на окружающую среду, которые необходимо учесть, по мнению автора. Следующим этапом является определение индикаторов воздействия АЭС на окружающую среду в рамках рассмотренных 15 показателей. В таблицах 1, 2 и 3 представлены индикаторы воздействия на окружающую среду. Кроме того, представлена методология определения значения каждого индикатора.

Таблица 1. Индикаторы воздействия во время строительства АЭС

N	Частный показатель	Метод определения	Единица измерения	Характеристика метода определения
1	Выбросы в атмосферу	Количественный	мг/м <sup>3</sup>	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга
2	Запыление воздуха	Количественный	мг/м <sup>3</sup>	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга
3	Шумовое загрязнение	Количественный	дБ	Фиксируется $\Delta$ изменения фонового шума до и после начала строительства
4	Изменение ландшафтного облика площадки строительства	Экспертный	балл	Экспертом или группой экспертов выставляются баллы от 1 до 10, отражающие изменение ландшафтного облика площадки строительства
5	Изменение растительного покрова	Экспертный	балл	Экспертом или группой экспертов выставляются баллы от 1 до 10, отражающие изменение растительного покрова

Таблица 2. Индикаторы воздействия во время эксплуатации АЭС

N	Частный показатель	Метод определения	Единица измерения	Характеристика метода определения
1	Тепловое загрязнение	Количественный	°С	Фиксируется изменение температуры охлаждающего водоема (в целом или в местах сброса и забора воды)
2	Образование радиоактивных отходов	Количественный	т	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга
3	Сбросы радиоактивных веществ в водные объекты	Количественный	ГБк	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга
4	Выбросы радионуклидов в атмосферу	Количественный	ТБк	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга
5	Химическое загрязнение водных объектов	Количественный	т/год	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга
6	Выбросы химических элементов в атмосферу	Количественный	т/год	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга

7	Увеличение влажности	Количественный	%	Фиксируется измерительными приборами в рамках экологического мониторинга
---	----------------------	----------------	---	--

Таблица 3. Индикаторы воздействия после истечения срока эксплуатации АЭС

N	Частный показатель	Метод определения	Единица измерения	Характеристика метода определения
1	Вероятность нарушения процесса хранения и захоронения РАО	Статистический	%	Рассчитывается экспертом или группой экспертов в соответствии с законами статистики
2	Воздействие на литосферу	Экспертный	балл	Экспертом или группой экспертов выставляются баллы от 1 до 10, отражающие влияние на почвы и грунт
3	Воздействие на грунтовые воды	Экспертный	балл	Экспертом или группой экспертов выставляются баллы от 1 до 10, отражающие влияние на грунтовые воды

Таким образом, авторы конкретизировали влияние АЭС на окружающую среду при помощи индикаторов воздействия. Данные индикаторы являются связующим звеном в цепочке исследования, следующим шагом которого является построение нечетко-множественной модели.

Вышеописанные индикаторы представляют собой количественную оценку влияния АЭС на каждом временном этапе по каждому показателю. В дальнейшем данные индикаторы будут использоваться в качестве частных показателей нечетко-множественной модели.

### Библиографический список

1. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 27.12.2019) «Об охране окружающей среды» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/document/> (дата обращения: 05.05.2022).
2. Постановление Правительства РФ от 28.09.2015 N 1029 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий».
3. Игольникова О.С., Копылов А.В. Математические и инструментальные методы экономики // Вестник Волгоградского института бизнеса. 2013. No 3. С. 124–131.
4. Постановление Правительства РФ от 19 января 2006 г. N 20 «Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства».
5. Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды [Электронный ресурс]. 2016. С. 128. URL: <https://www-pub.iaea.org/> (дата обращения: 17.05.2022).
6. *Jebakumar J.P.P., Nandhagopal G., Babu B. R.* Impact of Coastal Power Plant Cooling System on Planktonic Diversity of a Polluted Creek System Title // Mar. Pollut. Bull. 2018. P. 133, 378.
7. *Kirillin G., Shatwell T., Kasprzak P.* Consequences of thermal pollution from a nuclear plant on lake temperature and mixing regime // J. Hydrol. 2013. Vol. 496.
8. МУ 2.6.1.042–2001 Расчет и обоснование размеров санитарно-защитных зон и зон наблюдения вокруг АЭС Title [Электронный ресурс]. 2001. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200060080> (дата обращения: 30.04.2022).
9. СанПиН 2.6.1.24–03 «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03)» [Электронный ресурс]. 2010. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294814/4294814649.htm> (дата обращения: 19.05.2020).
10. Росэнергоатом, воздействие на окружающую среду [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rosenergoatom.ru/safety\\_environment/](https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/) (дата обращения: 13.05.2022).
11. Росатом, новости [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosatom.ru/> (дата обращения: 03.05.2022).
12. Конников, Е. А. Нечетко-множественный подход к анализу инвестиционного климата нефтегазовых рынков АТР / Е. А. Конников, О. А. Конникова, А. Д. Шматко // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. — 2018. — Т. 2. — С. 422–425.
13. Вознесенская, Д. Д. Эволюция энергетики с замещением традиционных источников энергии, рассчитанная методом нечеткой логики / Д. Д. Вознесенская, И. А. Лопырев, О. В. Новикова, Е. А. Конников // Экономические науки. — 2021. — № 200. — С. 48–56. — DOI 10.14451/1.200.48.