

А.В. Антонов¹, Г.А. Ершов², О.И. Морозова¹

¹Обнинский институт атомной энергетики; ²Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ"; e-mail: OIMorozova@yandex.ru)

СРАВНЕНИЕ УРОВНЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКОВ ОТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Показано, что прогнозирование рисков от эксплуатации энергоблоков атомных станций целесообразно выполнять в терминах опасности, одновременно указывающей на частоту (вероятность) возникновения аварий и на типы и количества радионуклидов, вышедших в окружающую среду.

Ключевые слова: безопасная эксплуатация энергоблока атомной станции.

A.V. Antonov, G.A. Ershov, O.I. Morozova

COMPARISON OF SAFETY LEVELS AND RISKS FROM OPERATION OF UNITS OF NUCLEAR POWER PLANTS

It is shown that forecasting risks from operation of units of nuclear power plants advisable to carry out in terms of hazard, same time indicating on frequency (probability) of accidents and the types and quantities of radionuclides, which departed in environment.

Key words: safe operation of unit of nuclear power plant

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 7 июля 2014 г.

Введение

Для современной цивилизации *энергоблоки атомных станций (ЭБ АС)* представляют собой инструмент, использование которого позволяет вырабатывать необходимые объёмы электроэнергии в глобальных масштабах, не оказывая при этом столь же сильного негативного влияния на природные биогеохимические процессы, которые имеют место при использовании традиционных энергоресурсов (нефти, природного газа, каменного угля), а также предотвращая возможный мировой энергетический "голод".

Однако получившие наибольший общественно-политический резонанс аварии на АС "Three Mile Island" (США, 1979 г.), Чернобыльской АС (СССР, 1986 г.) и АС "Fukushima-Daichi" (Япония, 2011 г.) продемонстрировали, что дальнейшее использование ЭБ АС тесно связано с решением ряда проблем, связанных с воздействием ЭБ АС на человека и природную среду, важнейшей из которых является обеспечение безопасности ЭБ АС. Более того, использование ЭБ АС в качестве объектов выработки электроэнергии фактически определяется именно общественным мнением об уровне безопасности ЭБ АС, так как в глазах широкой общественности эксплуатация ЭБ АС связана, прежде всего, с тяжестью биологических ущербов, наступающих вследствие возможных аварий, сопровождающихся выходом *радионуклидов (РН)* в окружающую среду, а именно – с получаемыми дозами облучения и последствиями облучения для здоровья людей, а также с радиоактивным заражением окружающей среды [1, 2, 5, 8, 9]. В конечном счёте, именно радиационные риски, а не уровень экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС представляют наибольший "интерес" для широкой общественности.

Радиационный риск

Основными контролируруемыми параметрами, по которым оценивается радиационная нагрузка на персонал ЭБ АС и население, являются годовая эффективная и эквивалентная дозы облучения [6]. Понимая под термином "риск" сочетание вероятности возникновения неблагоприятного события и его объёма (величины), радиационный риск, обуславливаемый эксплуатацией ЭБ АС, может быть интерпретирован и определён как [4, 5]:

- вероятность превышения установленных пределов [6] дозовых нагрузок для персонала ЭБ АС и населения:

$$R = \int_{D_{II}}^{\infty} f(D) dD, \quad (1)$$

где $f(D)$ – дифференциальная функция распределения (плотность вероятности) случайной прогнозной величины дозовой нагрузки;

D_{II} – научно обоснованный установленный дозовый предел, например, установленный в [6];

- математическое ожидание наносимого радиационного ущерба (радиационный ущерб может выражаться, например, в детерминированных и стохастических последствиях облучения – лучевых поражений органов и тканей, врождённых уродств и аномалий, злокачественных опухолей и лейкозов и проч. [1, 2, 6]:

$$R_{MO} = \int_{-\infty}^{\infty} Y_p f(Y_p) dY_p, \quad (2)$$

где Y_p – функция, выражающая изменение непрерывной случайной величины ущерба того или иного вида, например, в зависимости от степени загрязнения окружающей среды РН;

$f(Y_p)$ – дифференциальная функция распределения случайной величины ущерба (плотность вероятности).

Тяжесть радиационного риска зависит от качественных и количественных характеристик радиоактивного выброса, произошедшего на ЭБ АС и под воздействие которого могут попасть люди (здесь и далее, говоря о радиоактивных выбросах или о РН, вышедших в окружающую среду, будем понимать такие аварийные ситуации, в результате которых превышаются пределы радиационной безопасности, устанавливаемые в [6]). Под качественными характеристиками радиоактивного выброса подразумевается радионуклидный состав произошедшего выброса в целом и химико-физические и радиологические свойства вышедших в окружающую среду РН в частности. Под количественными характеристиками радиоактивного выброса подразумевается количество РН, вышедших в окружающую среду, и то, каким образом эти РН распределяются и каким образом впоследствии накапливаются в окружающей среде.

Качественные и количественные характеристики радиоактивного выброса зависят от технологических схем ЭБ АС (типов реакторов ЭБ АС), времени, прошедшего после последней перегрузки *ядерного топлива (ЯТ)* (влияет на количество и типы накопленных к моменту аварии РН, характера разрушений активной зоны реактора ЭБ АС [4-6, 8] и проч. При прогнозировании качественных и количественных характеристик радиоактивного выброса основное внимание уделяется анализу процессов повреждения и поведения ЯТ во время развития аварий, ведущих к выходу РН в окружающую среду.

Но сам по себе факт выхода РН в окружающую среду негарантированно свидетельствует, что люди подвергнутся тяжёлой техногенной дозовой нагрузке (имеется в виду, что человек ежедневно подвергается действию ионизирующего излучения естественного происхождения): важнейшим фактором тяжести дозовой нагрузки на персонал ЭБ АС и население является то, как именно вышедшие РН распределяются в окружающей среде (в процессе распределения РН в окружающей среде происходит внешнее облучение людей, попадающих в зону распространения РН, а также внутренне облучение, если РН попадают в организм ингаляционным путём и накапливаются в нем).

Распределение радиоактивных веществ в окружающей среде

Существуют различные методики прогнозирования распределения РН в окружающей среде, каждая из которых так или иначе предполагает представление окружающей среды в виде нескольких элементов биосферы (рис. 1). РН попадают в один из этих элементов и далее различными способами распространяются по той или иной схеме до тех пор, пока не выйдут из системы или не перейдут в такую среду, откуда их дальнейшее распространение практически исключается [5, 8].

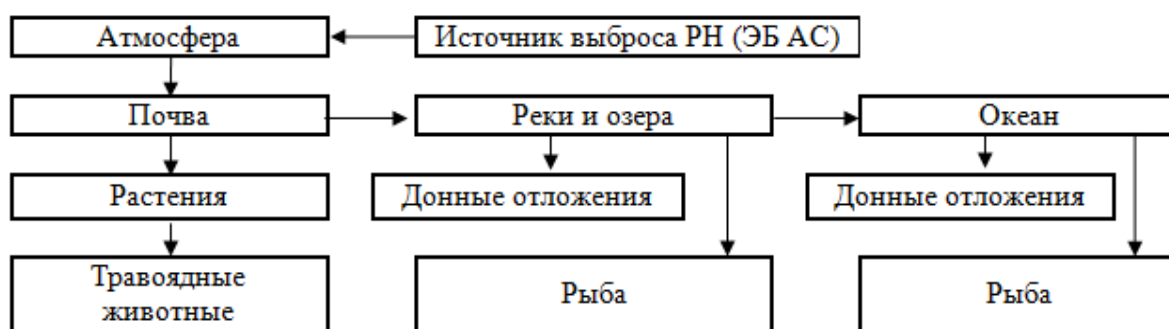


Рис. 1. Пример путей распространения РН в окружающей среде [5]

Содержание РН в объектах окружающей среды и их изменение определяются процессами их образования и переноса. В свою очередь эти процессы можно понять только с учётом ядерно-физических, химических, геохимических и биохимических свойств самих РН и закономерностей процессов их переноса

в различных средах [6, 8]. К настоящему времени накоплен значительный объём знаний о процессах образования, переноса и накопления естественных и искусственных РН в биосфере [2-6, 8]. Схемы образования/переноса различных РН существенно отличаются друг от друга из-за различия свойств среды, в которой они локализованы, и различия свойств самих РН. В общем случае динамика перехода РН из одной среды в другую и динамика обмена между средами может быть выражена дифференциальным уравнением:

$$\frac{dC_i}{dt} = C_{0,i} + \sum_n K_{ni} C_n - \sum_j K_{ij} C_j, \quad (3)$$

где C_i – концентрация РН в i -й среде;

$C_{0,i}$ – скорость изменения концентрации РН в i -й среде, обусловленная поступлением РН в результате антропогенного воздействия на среду;

K_{ni} – коэффициент переноса РН из n -й среды в i -ю среду;

K_{ij} – коэффициент переноса из i -й среды в j -ю среду.

Вместо концентрации РН C_i в i -й среде в уравнении (3) могут использоваться количества РН в средах, выраженные в соответствующих единицах. Тогда величина $C_{0,i}$ получает смысл интенсивности поступления РН в i -ю среду. С использованием уравнения (3) представляется возможным определить концентрацию РН в любой среде, а, следовательно, и дозовую нагрузку на персонал ЭБ АС и население в расчёте на тот или иной временной интервал.

Расчёты дозовых нагрузок на персонал ЭБ АС и население проводятся с учётом всех возможных путей распространения РН между средами. Анализ процессов распространения РН в различных средах и между различными средами представлен, например, в работах [2, 4-6, 8], в которых обосновывается, что важной первичной средой, поступление РН в которую приводит к их дальнейшему переносу с последующим переходом в гидросферу и на сушу, является атмосфера Земли.

Распространение РН в атмосфере происходит путём рассеивания вследствие [2, 5, 8] ветрового переноса, обуславливающего образование струи радиоактивного выброса, и диффузии, вызываемой наличием в атмосфере множества разнообразных беспорядочных завихрений масс воздуха. Математическое моделирование ветрового переноса и атмосферной диффузии развивается по двум направлениям, для каждого из которых возможно описание распространения РН в окружающей среде в эйлеровых и лагранжевых координатах на основе статистической теории, конечным результатом которой является гауссова модель распределения РН в окружающей среде, или путём решения дифференциальных уравнений переноса, полученных в предположении пропорциональности потока радиоактивной примеси градиенту её концентрации в воздухе (так называемая К-теория) [2].

В качестве моделей распространения РН в атмосфере могут быть использованы модель локального масштаба (в зоне радиусом 10 км) Пасквилла-Гиффорда; мезомасштабная Лагранжева модель, описывающая с достаточной точностью распространение РН в атмосфере до расстояний в несколько десятков километров; региональная Лагранжева модель, описывающая распространение РН в атмосфере на большие расстояния (до 1000-1500 км) [2, 3-5, 8].

Характер распространения РН в атмосфере существенно зависит от скорости ветра и вертикального температурного профиля атмосферы, последний из которых, в свою очередь, зависит от метеорологических условий. В настоящее время предложено несколько систем классификации метеорологических условий (например, системы Пасквилла, Пасквилла-Гиффорда, Тернера, Улига, Смита, Лэна и Черча, Клюга и др.) [2, 9].

Наряду с метеорологическими факторами характер распространения РН в атмосфере зависит от температуры, скорости истечения выбрасываемых радиоактивных газов и взаимодействия ветрового потока с расположенными вблизи источника выброса (то есть вблизи ЭБ АС) зданиями и сооружениями [2, 9].

Также при анализе распространения РН в атмосфере учитываются, например, сухое оседание РН и вымывание РН из облака радиоактивного выброса осадками, в результате которых происходит уменьшение концентрации примеси РН в атмосфере, и, как следствие, радиоактивное загрязнение территорий. При этом возникают дополнительные пути переноса РН к человеку. Например, РН, попадающие в водную среду при осаждении из облака радиоактивного выброса, мигрируют в водной среде за счёт течений, адвективного и турбулентного обмена, сорбцией на взвешенных в воде частицах и в донных отложениях, десорбцией со взвешенных частиц и переходом в растворенную фазу и др.

При определении дозовых нагрузок также важную роль играет учёт поля внешнего излучения от почвы, загрязнённой попавшими на неё и/или в неё РН [2]. С одной стороны, почва является основным источником естественных РН; с другой – искусственные РН, либо оседая на поверхность земли из атмосферы, либо попадая из водоёмов, накапливаются в почве. В этих процессах миграции РН в почве важную роль играют разнообразные биохимические процессы (например, живые организмы поднимают РН в верхние слои почвы, а диффузия и фильтрационный ток воды передвигают РН вниз) [4, 8].

Таким образом, можно заключить, что путь от выхода РН в окружающую среду вследствие аварий на ЭБ АС до доз облучения, создаваемых вышедшими РН в организме человека, крайне сложен, так как характер распределения РН в окружающей среде определяется химико-физическими и радиологическими свойствами самих РН, аэрогидрогазодинамическими и термодинамическими свойствами произошедшего радиоактивного выброса, условиями окружающей среды (метеорологическими, климатическими, географическими, топографическими и проч.) как во время протекания радиоактивного выброса, так и в период распространения и накопления РН в окружающей среде.

Учитывая вышесказанное, можно "придумать" следующую ситуацию. Если на каком-либо ЭБ АС, расположенном в месте А (например, место А – это холмистая местность, вблизи находится несколько озёр, больших лесных массивов нет, рядом располагается город-миллионник), произошла авария, сопровождающаяся радиоактивным выбросом, то тяжесть дозовой нагрузки для людей, попавших в зону распространения облака радиоактивного выброса, будет, например, E_A (эффективная доза) и H_A (эквивалентная доза). Но если "перенести" этот же самый ЭБ АС в место Б (например, место Б – это гористая местность с множеством рек, на которой произрастают большие объёмы лесных массивов, рядом располагается несколько небольших населённых пунктов) и принять, что на этом ЭБ АС произошла точно такая же авария, которая сопровождалась точно таким же радиоактивным выбросом, то тяжесть дозовой нагрузки будет уже другой – E_B (эффективная доза) и H_B (эквивалентная доза). Гарантированная разница тяжести дозовых нагрузок в условиях "одинаковости" как ЭБ АС, так и произошедших радиоактивных выбросов объясняется разницей "внешних" условий, в данном случае это различные места расположения ЭБ АС (место А и место Б). В приведённом примере рассматривались различия в географических условиях расположения ЭБ АС, но также необходимо принимать во внимание и влияние различных климатических, метеорологических, топографических и других условий, при которых происходит выход и последующее распространение РН в окружающей среде (например, время суток, когда произошёл радиоактивный выброс, влажность, направления дующих ветров, влияние градиентов и т.п.).

Прогнозирование радиационного риска

Если рассматривать безопасность ЭБ АС как "состояние защищённости настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения" [10], то, по сути, при прогнозировании радиационных рисков от эксплуатации ЭБ АС не столь важно ни что за ЭБ АС (то есть тип реактора, количество и виды систем (элементов), важных для безопасности, защитных систем безопасности, локализирующих систем безопасности и проч.), на котором произошёл выход РН в окружающую среду, ни какие процессы привели к повреждению ЯТ и последующему выходу РН в окружающую среду и проч. Фактически, конечный "результат", то есть дозы облучения, создаваемые в организме человека (тяжесть дозовой нагрузки), зависят от того, какие именно РН вышли в окружающую среду и в каком количестве и как именно эти РН распределяются и накапливаются в окружающей среде.

Таким образом, измерение рисков от эксплуатации ЭБ АС в терминах опасности, одновременно указывающей и на вероятность (частоту) причинения ущерба, и на прогнозируемую дозовую нагрузку для населения (см. формулы (1) и (2)) не представляется целесообразным, так как получаемые результаты, то есть значения радиационных рисков от эксплуатации ЭБ АС, напрямую зависят от "внешних" условий (метеорологических, климатических, географических, топографических и др.), во время которых происходит выброс РН в окружающую среду.

Следовательно, при оценке рисков от эксплуатации ЭБ АС следует ориентироваться на "собственные" характеристики ЭБ АС, так как величины доз облучения, создаваемых в организме человека вследствие выхода РН в окружающую среду от одного и того же ЭБ АС, но при разных "внешних" условиях, будут различными. Более того, использование "собственных" характеристик ЭБ АС позволяет сравнивать уровни безопасности различных ЭБ АС, так как безопасность одного и того же ЭБ АС, выраженная в терминах радиационной нагрузки на персонал и население при различных "внешних" условиях, во время которых происходит радиоактивный выброс, будет различной. В качестве "собственных" характеристик ЭБ АС могут использоваться частота (вероятность) повреждения ЯТ и/или частота (вероятность) превышения предельного аварийного выброса – так называемые вероятностные показатели безопасности, которые используются для оценки приемлемости уровня безопасности ЭБ АС (целевые значения вероятностных показателей безопасности, к которым нужно стремиться при эксплуатации российских ЭБ АС, регламентируются документом [7]).

Соответственно, целесообразным является измерение рисков от эксплуатации ЭБ АС в терминах опасности, одновременно указывающей и на частоту причинения ущерба, то есть частоту возникновения аварий на ЭБ АС, приводящих к выходу РН в окружающую среду, и на его величину, то есть на качественные и количественные характеристики РН (типы РН и их количество), вышедших в окружающую среду вследствие возникновения подобных аварий:

$$R = P_i \times U_i, \quad (4)$$

где P_i – вероятность (частота) возникновения рассматриваемой аварии i ;

U_i – ущерб от рассматриваемой аварии i , выраженный в терминах количественных и качественных характеристик вышедших в окружающую среду РН.

Сравнение уровней безопасности различных ЭБ АС.

Сравнение радиационных рисков от эксплуатации различных ЭБ АС

Для определения "собственных" характеристик ЭБ АС применяется **вероятностный анализ безопасности (ВАБ)**. ВАБ представляет собой системный анализ уровня безопасности ЭБ АС, в процессе которого разрабатываются логико-вероятностные модели ЭБ АС, определяются значения вероятностных показателей безопасности ЭБ АС и результаты которого используются для количественных оценок уровня безопасности ЭБ АС и для выработки решений при проектировании и эксплуатации ЭБ АС [1, 7].

В зависимости от решаемых задач и целей дальнейшего использования получаемых результатов, традиционно различают три уровня ВАБ:

- ВАБ уровня 1, который состоит в определении аварийных последовательностей, ведущих к повреждению ЯТ и который позволяет проводить оценку частоты (вероятности) повреждения ЯТ;

- ВАБ уровня 2, в рамках которого анализируется дальнейшее развитие определенных на предыдущем уровне анализа аварийных последовательностей, приводящих к повреждению ЯТ; определяются возможные пути выхода РН в окружающую среду. При этом проводится оценка качественных и количественных характеристик радиоактивного выброса и выполняется оценка частоты (вероятности) превышения предельного аварийного выброса;

- ВАБ уровня 3, в рамках которого устанавливаются величины радиоактивного загрязнения почвы, водоёмов, пищи и проч. и проводится оценка влияния вышедших в окружающую среду РН на здоровье населения (прогнозируются величины дозовых нагрузок).

Следует отметить, что определение вероятностных показателей безопасности ЭБ АС ВАБ уровня 1 является приоритетным, так как результаты данного уровня анализа "по цепочке" влияют на результаты ВАБ уровня 2 (результаты ВАБ уровня 1 являются входными данными для ВАБ уровня 2) и на результаты ВАБ уровня 3 (результаты ВАБ уровня 2 являются входными данными для ВАБ уровня 3).

Учитывая вышесказанное, можно заключить, что результаты ВАБ уровня 3, то есть прогнозируемая тяжесть дозовой нагрузки на людей, не могут быть использованы в качестве ориентира при определении уровня безопасности ЭБ АС, так как, как было показано, тяжесть радиационной нагрузки очень во многом определяется именно "внешними" характеристиками окружающей среды, а не "собственными" характеристиками ЭБ АС, на котором произошёл выброс РН в окружающую среду. В этом смысле при сравнении уровней безопасности различных ЭБ АС и при определении рисков от эксплуатации ЭБ АС следует ориентироваться на результаты ВАБ уровня 1 и ВАБ уровня 2, а не на результаты ВАБ уровня 3, так как при выполнении ВАБ уровня 1 анализируются аварийные последовательности, ведущие к повреждению ЯТ, а при выполнении ВАБ уровня 2 анализируются дальнейшие возможные пути развития аварийных последовательностей, приведших к повреждению ЯТ (определённых на этапе ВАБ уровня 1), и определяются возможные пути выхода РН в окружающую среду, а также определяются качественные и количественные характеристики произошедшего радиоактивного выброса.

Выводы

1. Определяя уровень безопасности ЭБ АС с позиций тяжести дозовых нагрузок, необходимо ориентироваться на частоту (вероятность) возникновения аварий, связанных с повреждением ЯТ, и частоту (вероятность) превышения предельного аварийного выброса, так как дозы облучения, создаваемые в организме человека вследствие выхода РН в окружающую среду от идентичных ЭБ АС, но при разных условиях окружающей среды во время протекания радиоактивного выброса и распространения РН в окружающей среде, будут различными. Более того, оперирование характеристиками "частота (вероятность) возникновения аварий, связанных с повреждением ЯТ", и "частота (вероятность) превышения предельного аварийного выброса" позволяет сравнивать уровни

безопасности различных ЭБ АС, так как безопасность одного и того же ЭБ АС, выраженная в терминах радиационной нагрузки на персонал и население при различных "внешних" условиях, во время которых происходит радиоактивный выброс, будет различной.

2. Целесообразной является оценка рисков от эксплуатации ЭБ АС не в терминах тяжести радиационной нагрузки на персонал ЭБ АС и население, а в терминах опасности, одновременно указывающей и на частоту (вероятность) причинения ущерба, то есть частоту (вероятность) возникновения аварий на ЭБ АС, связанных с выходом РН в окружающую среду, и на его величину, то есть на тип и количество РН, вышедших в окружающую среду вследствие возникновения подобных аварий.

Литература

1. *Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н.* Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах: учебное пособие в системе образования МЧС России и РСЧС. М.: Деловой экспресс, 2004. 352 с.
2. *Гусев Н.Г., Беляев В.А.* Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
3. *Зубков В.Н.* Математическое моделирование распространения радиоактивных веществ в воздушной среде в районах объектов энергетики: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Ростов-на-Дону, 2009. 120 с.
4. *Кузнецов В.М., Никитин В.С., Хвостова М.С.* Радиоэкология и радиационная безопасность. История, подходы, современное состояние. М.: Восход-А, 2011. 1208 с.
5. *Кузнецов В.М., Шингаркин М.А., Хвостова М.С.* Обеспечение радиационной безопасности населения, радиационно-экологический мониторинг гидросистем и территорий, находящихся в зоне воздействия ФГУП ПО "Маяк". М.: ООО "НИПКЦ Восход-А", 2013. 160 с.
6. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).* Санитарные правила и нормы СанНип 2.6.1.2523-09 (Утв. постановлением Главного санитарного врача РФ Онищенко от 7 июля 2009 г. № 47).
7. *Общие* положения обеспечения безопасности атомных станций. (ОПБ-88/97). НП-001-97 (Утв. постановлением Госатомнадзора России от 14 ноября 1997 г. № 9).
8. *Сахаров В.К.* Радиоэкология: учебное пособие. С.-Пб.: изд-во "Лань", 2006. 320 с.
9. *Стукин Е.Д.* Формирование радиоактивного загрязнения окружающей среды и особенности его радионуклидного состава после ядерных взрывов и аварии на Чернобыльской АЭС: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2001. 120 с.
10. *Федеральный* закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ "О радиационной безопасности населения" (с изм. и доп.).