

Chemical interaction of ground and liquid radioactive wastes (RAW) during underground disposal was studied. Complex physical and chemical processes during underground disposal were demonstrated. Acid-base and oxidation-reduction reactions cause the elements of ground-solution system to rearrange and the ground composition to change. Methodic investigation of the chemical interactions allows improving the liquid RAW disposal technology and developing adequate mathematical models designed to predict nuclide migration in the aquifer.

УДК 621.039.58

АДАПТАЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ К ПРЕДПРИЯТИЯМ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

В.Н. Крутых, В.В. Стародумов

ФГУП «Сибирский химический комбинат»

В работе рассмотрены вопросы применения детерминистических и вероятностных методов проведения анализа безопасности предприятий ядерного топливного цикла. Отмечена важность формирования базы данных исходных событий, инициирующих возникновение аварийных ситуаций. Приведена схема сбора данных по отказам оборудования, которая реализуется на Сибирском химическом комбинате. На примере оценки безопасности гидротехнических сооружений показана возможность использования разработанной методики комплексного вероятностно-детерминистического подхода к анализу безопасности промышленных объектов.

Предприятия ядерного топливного цикла (ПЯТЦ), в том числе и производства Сибирского химического комбината (СХК), относятся к предприятиям, аварии на которых, связанные с выбросом больших количеств радиоактивных веществ, могут привести к необратимым последствиям для населения и окружающей природной среды. Поэтому обеспечение безопасности при проектировании, строительстве, эксплуатации ПЯТЦ является приоритетной задачей.

В настоящее время для оценки безопасности ПЯТЦ используется детерминистический подход, основывающийся на строгом выполнении при проектировании, строительстве и эксплуатации требований, накладываемых существующими нормативными документами. Однако детерминистический подход имеет ряд существенных недостатков применительно к ПЯТЦ, а именно:

1. Невозможно написать нормативные акты на все случаи жизни. Для ПЯТЦ в некоторых случаях требования санитарных правил противоречат требованиям правил по взрывопожаробезопасности.
2. Консерватизм. Предприятие не заинтересовано во внедрении более надежной техники, так как защитные мероприятия, предусмотренные нормативными документами, в этом случае необходимо выполнять в полном объеме.
3. Неоднозначность толкования норм и правил эксплуатационными, проектными и надзорными организациями.
4. Отсутствие количественной оценки и четкого обоснования «слабых» мест производства.

Помимо этого, данный подход не позволяет сделать количественную оценку риска, выполнение которой в настоящее время требует ряд законодательных актов.

Все эти недостатки устраняет вероятностный анализ безопасности (ВАБ), который в настоящее время находит все более широкое применение.

ВАБ представляет собой системный анализ безопасности предприятия, который позволяет выявить основные источники аварий, разработать необходимые сред-

ства и мероприятия для достижения приемлемого уровня безопасности как на проектной стадии, так и на стадии эксплуатации. Выполнение ВАБ позволяет:

1. Определить множество возможных состояний предприятия, которые могут возникнуть при его эксплуатации в результате реализации различных событий, вызванных отказами оборудования, компонентов систем, ошибочными действиями персонала или внешними по отношению к предприятию воздействиями.
2. Выделить подмножество состояний с нарушением установленных в проекте пределов безопасности. Определить для каждого такого состояния размеры последствий или степень нарушения безопасности. Выполнить классификацию состояний в зависимости от тяжести последствий.
3. Разработать вероятностные модели или аварийные последовательности (АП) для состояний с нарушением безопасности.
4. Выполнить оценки вероятностей реализации АП с нарушением безопасности. Определить суммарные по всем АП вероятности для каждой группы состояний с нарушением безопасности. Выполнить количественную оценку уровня безопасности в результате сравнения полученных значений вероятностных показателей с соответствующими критериями.
5. Определить для каждой группы состояний с нарушением безопасности доминантные АП, вносящие наибольшие вклады в суммарные вероятности их реализации. Определить причины (отказ оборудования и систем, межсистемные зависимости, ошибочные действия персонала, внешние воздействия и т.д.) реализации доминантных АП и разработать дополнительные меры по их устранению.
6. Определить основные АП, являющиеся источниками риска, и дать основу для разработки технических средств и инструкций по управлению тяжелыми авариями.
7. Оценить уровень детерминистических принципов обеспечения безопасности, заложенных в действующей нормативной документации. Дать направления по ее дальнейшему совершенствованию.
8. Сформировать требования надежности и эффективности вновь разрабатываемого оборудования.

На крупном производстве, обладающем сложной внутренней структурой, ВАБ является практически единственным способом комплексного анализа безопасности. Это вызвано невозможностью проведения полномасштабных, длительных испытаний оборудования, с учетом всех структурных зависимостей, в производственных условиях. Положение усугубляется уникальностью многих производств, что не позволяет делать заключения об их безопасности на основании предшествующего опыта.

Методология ВАБ получила развитие, широкое применение и признание во всем мире в области обеспечения радиационной безопасности АЭС [1–4]. Важнейшим достоинством методологии является то, что она не только позволяет количественно оценить риск, но и представляет собой эффективный инструмент разработки конкретных мероприятий (технических, организационных и пр.) для повышения безопасности исследуемых объектов. Таким образом, для наиболее эффективного решения задач обеспечения безопасности ПЯТЦ представляется необходимым использование многолетнего мирового опыта применения методологии ВАБ АЭС. В связи с этим требуется ее адаптация к широкому спектру новых объектов исследования, которыми являются ПЯТЦ.

С 1998 г. на СХК проводится работа по внедрению методов ВАБ для оценки безопасности его производств. Работы в этом направлении проводились и ранее, но

они носили эпизодический характер, преследовали узкие цели и не охватывали весь комплекс предприятий. Взяв за основу методики ВАБ АЭС [4], мы провели их адаптацию применительно к ПЯТЦ.

Практика работы в области ВАБ показывает, что успешность применения данного метода при анализе безопасности производственных объектов в первую очередь определяется наличием исчерпывающей базы данных по вероятности возникновения исходных событий, приводящих к возникновению и способствующих последующему развитию аварийных ситуаций. К таким исходным событиям относятся отказы оборудования, внешние природные и антропогенные воздействия, человеческий фактор и т.п. До настоящего времени подобная база данных по предприятиям СХК отсутствовала, поэтому в качестве первого шага в направлении внедрения ВАБ на СХК явилась разработка методических рекомендаций по организации сбора данных по отказам оборудования в подразделениях комбината.

Данные рекомендации определяют принципы классификации оборудования и отказов, структуру сбора, обработки и формирования базы данных по отказам оборудования, форму отчетной документации. В зависимости от обращающихся веществ и выполняемых функций оборудование подразделяется на типы и группы соответственно. Предусмотрена классификация отказов по их последствиям. Пример классифицирования оборудования и отказов приведен в таблице.

Т а б л и ц а

Пример классифицирования оборудования и отказов.

Группы Оборудования	Аппараты, трубопроводы, трубопроводная арматура, насосы и компрессионные машины, средства контроля и измерения, средства автоматизации, предохранительные устройства (клапаны), электрооборудование и проводка, грузоподъемное оборудование, системы вентиляции и газоочистки, средства сигнализации (включая САС), средства защиты (боксы), транспортные средства (емкости, ТУКи)
Виды отказов	Течь, нарушение герметичности, засорение, отказ на срабатывание, отказ при работе, обесточивание, короткое замыкание
Типы оборудования	Делящиеся вещества, радиоактивные вещества, СДЯВ, взрывопожароопасные вещества, котлонадзорное оборудование

Структура сбора, обработки и формирования базы данных по отказам оборудования показана на рис. 1.

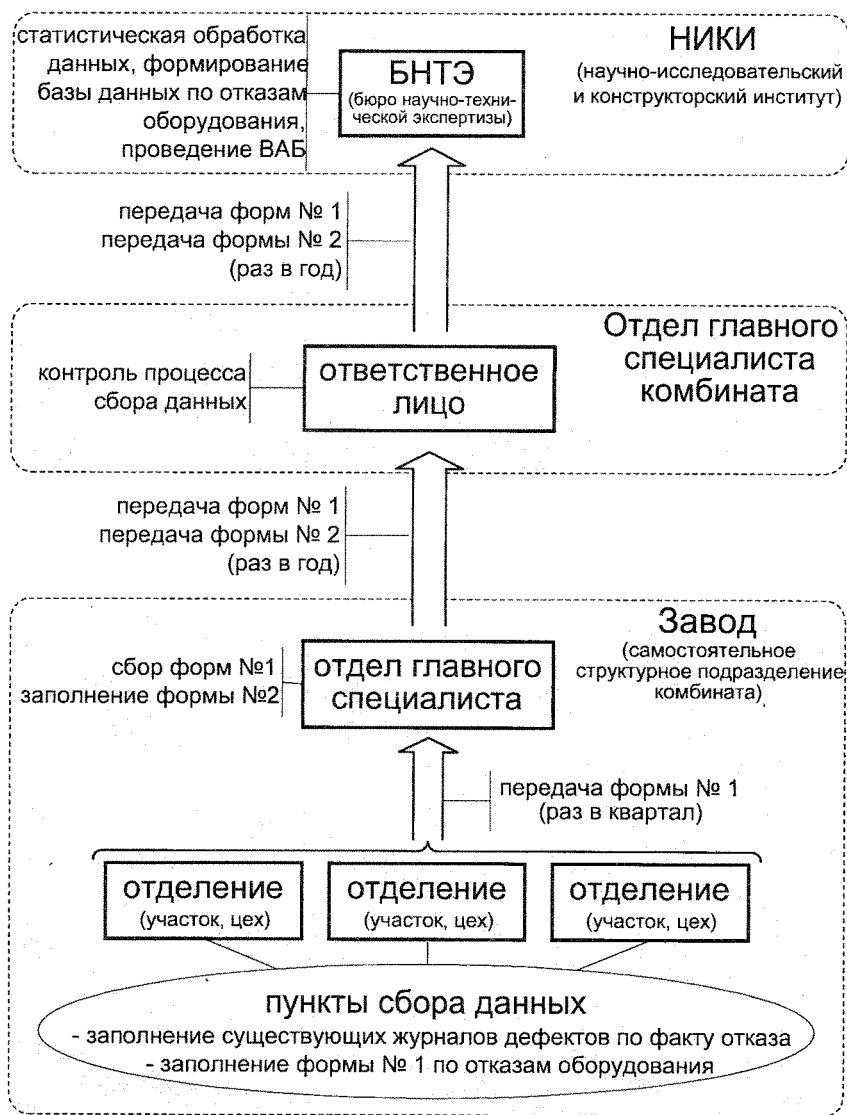


Рис. 1. Структура сбора, обработки и формирования базы данных по отказам оборудования

Ниже представлены формы для сбора данных по отказам оборудования. Периодичность их заполнения и направления движения показаны на рис. 1. В формах приведен пример их заполнения, согласно таблице.

Форма № 1
Количество эксплуатируемого оборудования
завод _____ за _____ год

Группа оборудования	Общее число единиц	Число единиц оборудования по типам					Примечание
		делящиеся	радиоактивные	взрыво-жаро-опасные	СДЯВ	котлонадзорное	
Аппарат							
г/п механизмы							
Трубопровод							
Средства контроля и измерения							

Форма № 2
Отказы оборудования
завод _____ отделение (цех, участок) _____
за _____ (квартал) _____ года

Группа оборудования	Вид отказа	общее число отказов	Число отказов по типам оборудования					Последствия отказа				примечание
			делящиеся	радиоактивные	взрывопожаро-опасные	СДЯВ	котлонадзорное	выброс	пожар	взрыв	СЦР	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Аппарат	течь											
Трубопровод	течь											
	засорение											
г/п механизмы	отказ при работе											
Средства контроля и измерения	отказ на срабатывание											

В соответствии с разработанной схемой (рис. 1) на СХК определены структура и количество пунктов сбора данных по отказам технологического оборудования, проведена классификация оборудования по типам и группам (см. таблицу), налажена схема движения информации, скорректированы формы представления данных с учетом специфики каждого структурного подразделения комбината.

В дальнейшем планируется создание базы данных по отказам оборудования, эксплуатируемого на предприятиях СХК; разработка программ обработки статистических данных; анализ и установление причинно-следственных связей между нежелательными исходными событиями, которые могут привести к авариям; выбор сценариев аварий; выполнение расчетов вероятности аварий по разработанным сценариям; выполнение количественной оценки риска. Все это позволит повысить безопасность производств при минимизации затрат, обосновать страховые взносы, упростить процедуру получения лицензии от надзорных органов государственного регулирования безопасности.

Однако реализация такого комплексного подхода займет достаточно длительный период, в то время как вероятностные оценки безопасности технологических объектов требуются уже в настоящее время. Выход из положения был найден в применении комбинированного вероятностно-детерминистического подхода к анализу безопасности промышленных объектов. Данный подход предполагает выделение двух режимов эксплуатации оборудования: типичного и уникального. Типичный режим эксплуатации означает, что оборудованию могут быть сопоставлены аналоги с примерно одинаковыми характеристиками. В этом случае возможно использование статистических данных по исходным событиям аварий, собранных на аналогах, при проведении вероятностного анализа безопасности исследуемого объекта. В случае уникального режима эксплуатации, когда прямых аналогов нет, а существующей статистики недостаточно, применяются детерминистические методы оценки безопасности.

Разработанная методика комплексного применения вероятностно-детерминистического подхода к анализу безопасности промышленных объектов бы-

ла применена в рамках подготовки Декларации о безопасности гидротехнических сооружений СХК.

В комплексе гидротехнических сооружений (ГТС) водохранилищ наиболее ответственным элементом является ее плотина. Аварийные ситуации, приводящие к их разрушению, имеют максимально тяжелые последствия. Несмотря на индивидуальность каждой плотины, в процессе ее эксплуатации можно выделить три характерных этапа: первые годы эксплуатации (5 – 7 лет), «нормальная эксплуатация» (40 – 60 лет) и «старение» (более 60 лет). Анализ статистических данных, проведенный в ходе выполнения исследований, показал, что наиболее ярко индивидуальные свойства ГТС проявляются в первые годы эксплуатации. Это обусловлено тем, что в этот период выявляются ошибки, допущенные при проектировании, и дефекты строительства. Индивидуален и этап «старения» плотин, поскольку на него накладываются отпечаток особенности эксплуатации каждого конкретного водохранилища (режим эксплуатации, уникальность физико-химических процессов в системе водохранилище–плотина и т.п.). Для этих этапов трудно вывести какие-либо закономерности, поэтому при обосновании безопасности ГТС необходимо использовать детерминистические подходы, основанные на прочностных и гидравлических расчетах с использованием экспериментальных данных, полученных в ходе натурных наблюдений за состоянием строительных конструкций и изменением физико-химических свойств грунтов. На этапе «нормальной эксплуатации», напротив, наблюдаются закономерности, не зависящие от характеристик конкретной плотины. Поэтому для обоснования безопасности ГТС на этой стадии возможно использование вероятностных оценок с привлечением статистики по отказам плотин в отечественном и мировом плотиностроении.

Поскольку плотины водохранилищ СХК находятся в стадии «нормальной эксплуатации» (40 – 45 лет), то для обоснования их безопасности нами был использован вероятностный анализ. Обоснованность данного подхода подтверждается также тем, что обследование плотин, проведенное комиссией СХК, в состав которой входил представитель комитета природных ресурсов по Томской области, показало их удовлетворительное техническое состояние.

Вероятность аварии плотин рассчитана на основании статистических данных из [6] и составляет не более $3,4 \cdot 10^{-4}$ плотин/год. Величина годовой вероятности аварии такого же порядка (10^{-4} год⁻¹) встречается и в работах других авторов [7, 8]. В настоящее время в нормативных документах по гидротехническому строительству вероятностные критерии безопасности плотин отсутствуют. Сравнение полученного значения с вероятностными критериями, применяемыми для обоснования ядерной и радиационной безопасности, показывает приемлемость уровня риска эксплуатации данных сооружений. Как следует из [8], полученное значение 10^{-4} год⁻¹ соответствует допустимому уровню вероятности аварии ответственных конструкций инженерных систем с внезапными отказами.

Разрушение плотин водохранилищ может быть обусловлено как внутренними, так и внешними причинами. На текущем этапе эксплуатации, учитывая удовлетворительное техническое состояние плотин, доминирующей причиной разрушения является перелив воды через гребень плотины. Другие внешние и внутренние причины разрушения плотин или не приводят к их мгновенному разрушению, или не являются преобладающими на данном этапе эксплуатации. Исключение составляют аварии, связанные с процессом старения плотин. Однако проведенное обследование плотин не выявило развития каких-либо деструктивных процессов, позволяющих в настоящее время принять данный тип аварий в качестве основной причины их разрушения.

Оценка последствий аварий, связанных с разрушением плотин, показала, что величина экологического ущерба, рассчитанная по методике [9], не превысит размер финансового обеспечения ответственности СХК.

На основании сделанного анализа составлены рекомендации о проведении работ по определению остаточного ресурса плотин, организации непрерывных натурных наблюдений за их состоянием. Это позволит в дальнейшем, используя метод предельных состояний, определить остаточный ресурс плотин и, в случае необходимости, разработать мероприятия по его продлению. Проведенные исследования позволили СХК получить лицензию на дальнейшую эксплуатацию водохранилищ.

Литература

1. *Вероятностный анализ безопасности: INSAG-6: Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности.* – Вена: МАГАТЭ, 1993. 27 с.
2. *Потенциальное облучение и ядерная безопасность: INSAG-9: Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности.* – Вена: МАГАТЭ, 1996. 35 с.
3. *Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем / Под ред. В.П. Соколова.* – М.: Логос, 2001. 232 с.
4. *Швыряев Ю.В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения.* – М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1992. 266 с.
5. *Стародумов В.В. Вероятностный анализ безопасности предприятий ядерного топливного цикла. Первая Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным проблемам радиохимии и атомной энергетике: Сборник тезисов докладов.* – Нижний Новгород, 2001. С. 104-106.
6. *Чоговадзе Г.И., Гогоберидзе М.И., Какауридзе Р.Г., Микашвили Ю.Н., Мирцхулава Д.Ц. Анализ основных факторов, вызывающих инциденты и аварии на плотинах, оценка показателей надежности плотин // Гидротехническое строительство. 1980. № 7. С. 34-38.*
7. *Лятхер В.М., Золотов Л.А., Иващенко И.Н., Янчер А.И. Оценка надежности гидросооружений // Гидротехническое строительство. 1985. № 2. С. 6-13.*
8. *Лятхер В.М., Иващенко И.Н. Сейсмостойкость грунтовых плотин.* – М.: Наука, 1986.
9. *Межотраслевая методика расчета экономического ущерба от радиационных аварий при использовании радиоактивных веществ в народном хозяйстве (рег. № Р-03/98).* – СПб.: РЭСцентр, 1998. 53 с.

ADAPTATION OF PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS METHODOLOGY TO THE NUCLEAR FUEL CYCLE ENTERPRISES

V.N. Krutykh, V.V. Starodumov

FUSE "Siberian Group of Chemical Enterprises"

In this paper the problems on application of deterministic and probabilistic methods for safety analysis of nuclear fuel cycle enterprises are considered. The importance of database creation for starting events initiating the emergencies is noted. The plan of data collection on plant failures being realized at the Siberian Group of Chemical Enterprises is presented. A possibility to use the devised procedure of comprehensive probabilistic and deterministic approach to the safety analysis of industrial installations is shown by the example of safety evaluation for water-development works.