

**СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ
АВАРИЙ НА ПЛОТИНАХ**

Дмитрий Владимирович Стефанишин

*Ведущий научный сотрудник Института телекоммуникаций и глобального
информационного пространства Национальной академии наук Украины,
доктор технических наук*

Прогнозирование аварий на плотинах является сложной системной задачей, отягощенной неопределенностью различной природы – стохастической и нестохастической, решение которой возможно только в рамках вероятностного подхода.

В последние годы нами рассматривалось несколько практических задач, связанных с оценкой вероятностей аварий на плотинах, которые эксплуатируются, строятся или проектируются в Российской Федерации и в странах бывшего СССР. Среди них – оценка вероятностей аварий на Бурейской и Мамаканской плотинах, гидросооружениях Ленинградской и Днестровской ГАЭС, Саратовского, Рогунского, Саяно-Шушенского и Нижне-Бурейского гидроузлов, Зарамагской ГЭС-1. Некоторые сведения о результатах этих исследований, о подходах, методах и моделях, которые при этом использовались, приводятся в [1-4].

Полученные результаты использовались при подготовке деклараций безопасности плотин, при обосновании решений по повышению их надежности и безопасности, при выборе вариантов гидросооружений.

В настоящей статье основное внимание уделяется развитию сценарного подхода к решению задач и использованию на его основе логико-вероятностных методов оценки вероятностей аварий на плотинах – методов деревьев отказов и деревьев событий.

Важность сценарного подхода к решению таких задач обуславливается тем, что аварии на плотинах носят системный характер, могут определяться разными природными и техногенными факторами, взаимодействием различных гидросооружений в составе гидроузлов и могут происходить по сценариям, зависящим от индивидуальных условий проектирования, строительства и эксплуатации сооружения. При расчетах вероятностей аварий на плотинах, как показывает опыт проведения таких исследований, недостаточно иметь репрезентативные выборки статистических данных об отказах и авариях на сооружениях, применять строгие математические методы, модели и современные вычислительные технологии при расчетах сооружений. При прогнозировании возможной аварии на плотине изначально приходится ориентироваться на системный анализ проблемы, что подразумевает и разработку гипотетических сцена-

риев возможной аварии. Это связано с тем, что, во многих случаях, аварийные события на плотинах, учитывая уникальность этих сооружений и условий, в которых они проектируются, строятся и эксплуатируются, не всегда могут рассматриваться с точки зрения статистических фактов, а только как события-предположения. Сценарный подход при решении задачи вероятностного прогнозирования возможной аварии на плотине позволяет использовать синтез различных приемов и методов системного анализа: от эвристических приемов при раскрытии причинно-следственных связей до методов системно-структурного и абстрактно-логического анализа. При сценарном подходе как качество данных и математических моделей, так и обоснованность модельных сценариев аварии может определять адекватность результирующей оценки вероятности аварии на плотине, с учетом индивидуальных особенностей сооружения, его взаимодействия с другими гидросооружениями и объектами.

В результате сценарного моделирования отягощенная неопределенностью, многофакторная и, обычно, неструктурированная либо «слабо» структурированная задача прогнозирования аварии на плотине, может быть сведена к нескольким (за количеством гипотетических сценариев) «более структурированным» задачам прогнозирования, которые могут описываться более простыми математическими моделями с меньшим числом определяющих факторов и параметров.

Сценарный подход позволяет соединить возможности разных методов и моделей, используемых при оценке вероятностей отдельных аварийных событий на плотине, осуществить агрегацию моделей и синтез вероятностей, полученных для событий, инициирующих аварии либо способствующих их развитию. При оценке вероятностей отдельных аварийных событий, входящих в состав гипотетического сценария аварии, в зависимости от имеющихся данных, могут использоваться разные методы и модели: статистические; методы математической теории надежности; методы рандомизации традиционных детерминистических моделей и расчетных схем; логико-вероятностные методы (методы анализа деревьев событий, деревьев отказов) [5, 6]. При этом обобщение (агрегацию) вероятностей аварий по различным сценариям, как показывает опыт вероятностного прогнозирования, удобнее всего осуществлять логико-вероятностными методами (деревьев событий, деревьев отказов).

Метод деревьев событий

В основу метода деревьев событий по аналогии с деревом решений положен индуктивный анализ [6-8]. Дерево событий строится как бинарное граф-дерево, начиная с исходного аварийного события, способного инициировать аварийные процессы, на основе прямых логических размышлений, чтобы ответить на вопрос: «Что будет, если ...?». При этом

могут отображаться как ветви (сценарии) развития возможных аварийных ситуаций, вызываемых исходным аварийным событием, так и ветви, ведущие к затуханию аварийных процессов.

Разветвление дерева событий происходит в точках разделения сложного события на два несовместных события, более простых по сравнению с исходным событием. В результате на каждом этапе анализа в точках разделения ветвей формируются полные группы событий. Благодаря этому агрегация вероятностей реализации некоторых j -х несовместных веток (сценариев), ведущих к k -м формам аварии плотины в результате исходного i -го инициирующего аварийные процессы события, может осуществляться по формуле полной вероятности:

$$P(A_{ik}) = \sum_j P(A_{ik} | S_{ijk}) \cdot P(S_{ijk}), \quad (1)$$

где $P(A_{ik} | S_{ijk})$ – условная вероятность реализации k -й формы аварии для i -го события, инициирующего аварийные процессы за сценарием S_{ijk} ; вероятность $P(A_{ik} | S_{ijk})$ можно определять как вероятность превышения некоторой экстремальной случайной величиной (нагрузкой, влиянием, сочетанием нагрузок и т.п.) установленной допустимой границы, задаваемой, в общем случае, случайным образом [6]; $P(S_{ijk})$ – вероятность реализации события S_{ijk} (сценария аварии), предшествующего k -й форме аварии на плотине.

Для простейшего сценария, реализуемого в виде сочетания нескольких q -х элементарных независимых аварийных событий E_{ijkq} , обуславливающих возникновение и развитие этого сценария, вероятность

$$P(S_{ijk}) = \prod_q P(E_{ijkq}). \quad (2)$$

Для сценария, реализуемого в виде сочетания некоторого исходного независимого события $E_{0,ijk}$ и нескольких последовательно зависимых друг от друга аварийных событий вероятность

$$P(S_{ijk}) = P(E_{0,ijk}) \cdot P(E_{1,ijk} | E_{0,ijk}) \cdot P(E_{2,ijk} | E_{1,ijk}) \cdot \dots \quad (3)$$

В формулах (2), (3) $P(E_{ijkq})$, $P(E_{0,ijk})$ – вероятности аварийных событий E_{ijkq} , $E_{0,ijk}$; $P(E_{1,ijk} | E_{0,ijk})$, $P(E_{2,ijk} | E_{1,ijk}) \dots$ – вероятности перехода от события $E_{0,ijk}$ к событию $E_{1,ijk}$, от события $E_{1,ijk}$ к событию $E_{2,ijk}$ и т.д., с охватом всей цепочки аварийных событий, моделирующих наступление события (сценария) S_{ijk} .

Полная вероятность аварии в результате i -го аварийного события, инициирующего аварию, в случае независимости и совместности нескольких сценариев, можно оценить по формуле:

$$P(A_i) = 1 - \prod_k [1 - P(A_{ik})]. \quad (4)$$

Ниже приводится пример использования метода деревьев событий при оценке вероятности одного из гипотетических сценариев аварии (далее аварии A_1) на Саяно-Шушенской плотине. Сценарий был утвержден в качестве одного из расчетных на Техническом совещании в ОАО «Ленгидропроект» в ноябре 2009 г. для подготовки Декларации безопасности гидросооружений Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) на период временной эксплуатации берегового водосброса и восстановленных гидроагрегатов ГЭС с 01.06.10 г. по 01.10.11 г. Формулировался сценарий аварии A_1 следующим образом: «В результате землетрясения левобережный склон примыкания плотины приходит в состояние предельного равновесия. Происходит потеря устойчивости скального склона в примыкании плотины и его разрушение с нарушением монолитности тела плотины выше отметки 479 м. Разрушение напорного фронта на длине 150 м (секции 6-15) с образованием прорана и волны прорыва».

Дерево событий для оценки вероятности аварии на Саяно-Шушенской плотине в результате землетрясения приводится на рис. 1.

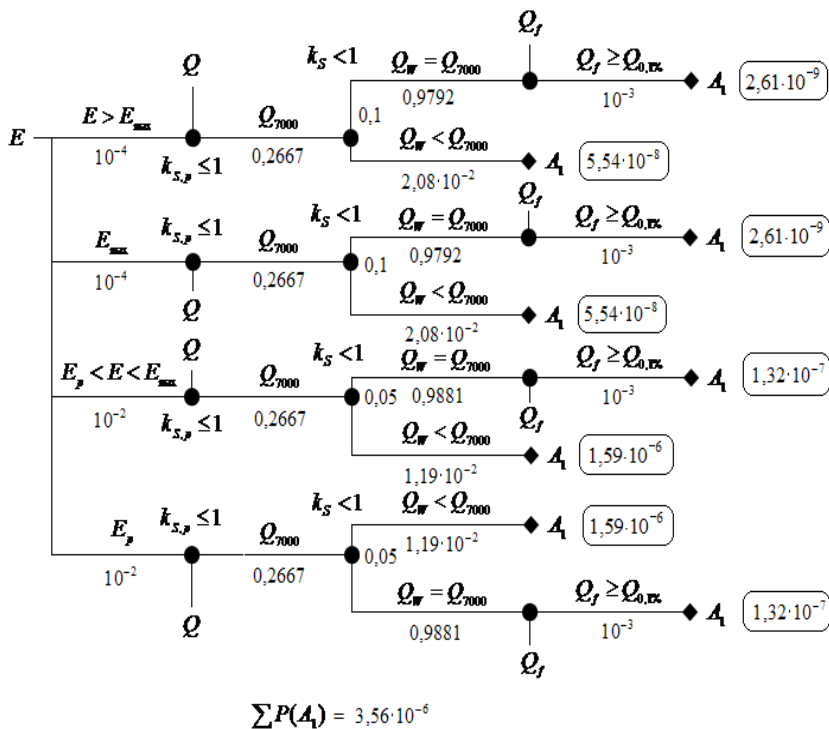


Рис. 1. Дерево событий для оценки вероятности аварии на Саяно-Шушенской плотине в результате землетрясения (сценарий A_1)

На рис. 1 приводятся следующие события, связанные с реализацией анализируемого сценария аварии:

E – землетрясение;

$E > E_{\max}$ – землетрясение, превышающее максимальное расчетное землетрясение (МРЗ); при периоде повторяемости МРЗ равном 10000 лет имеем вероятность возникновения сейсмических событий 10^{-4} , год $^{-1}$;

E_{\max} – МРЗ; при периоде повторяемости МРЗ равном 10000 лет имеем вероятность возникновения сейсмического события 10^{-4} , год $^{-1}$;

$E_p < E < E_{\max}$ – землетрясение, превышающее проектное землетрясение (ПЗ), но меньшее МРЗ; при периоде повторяемости ПЗ равном 100 лет вероятность возникновения сейсмических событий 10^{-2} , год $^{-1}$;

E_p – ПЗ; при периоде повторяемости ПЗ равном 100 лет имеем вероятность возникновения сейсмического события 10^{-2} , год $^{-1}$;

$k_{s,p} = 1$ – левобережный склон примыкания плотины приходит в состояние предельного равновесия;

Q – приток в водохранилище;

Q_{7000} – уровень воды в водохранилище на момент землетрясения соответствует сбросному расходу 7000 м 3 /с; при оценке вероятности события Q_{7000} учитывалось, что за период работы СШГЭС с 1979 г. по 2009 г. указанный сбросной расход превышался во время весеннего половодья 7 раз, во время дождевых паводков – 1 раз; имеем расчетную вероятность события 0,2667;

$k_S < 1$ – потеря устойчивости склона; с запасом по риску при уровне воды в водохранилище, который соответствует сбросному расходу 7000 м 3 /с, и МРЗ вероятность события $k_S < 1$ принималась равной 0,1; то же с запасом по риску при ПЗ вероятность события $k_S < 1$ принималась равной 0,05; такие значения вероятностей для события $k_S < 1$ соответствуют достижению состояния предельного равновесия при расчетах устойчивости по методу предельных состояний при особом и основном сочетаниях нагрузок и воздействий, соответственно;

$Q_W < Q_{7000}$ – отказ водосбросного фронта с невозможностью аварийной сработки водохранилища; оценка вероятностей события $Q_W < Q_{7000}$ осуществлялась методом деревьев отказов (см. ниже расчетные модели на рис. 2); полная вероятность $Q_W < Q_{7000}$ при МРЗ составила $2,08 \cdot 10^{-2}$, при ПЗ – $1,19 \cdot 10^{-2}$;

$Q_W = Q_{7000}$ – аварийная сработка водохранилища обеспечивается; вероятности $Q_W = Q_{7000}$ определялись как дополнение вероятностей $Q_W < Q_{7000}$ до единицы; при МРЗ имеем 0,9792, при ПЗ – 0,9881;

Q_f – паводок;

$Q_f \geq Q_{0,1\%}$ – паводок, равный расчетному паводку 0,1% вероятности превышения либо больше его; вероятность события 10^{-3} , год $^{-1}$;

A_I – разрушение напорного фронта на длине 150 м (секции 6-15) с образованием прорана и волны прорыва в результате потери устойчивости скального склона в примыкании плотины и его разрушение с нарушением монолитности тела плотины выше отметки 479 м.

В результате расчета модельного дерева событий (см. рис. 1) были получены вероятности развития аварии на Саяно-Шушенской плотине в результате землетрясения по различным сценариям A_I и полная (суммарная) вероятность гипотетической аварии A_I , равная $3,56 \cdot 10^{-6}$, год $^{-1}$.

Метод деревьев отказов

В основу метода деревьев отказов положен дедуктивный анализ [6-8]. При этом различные события, связанные с возможной аварией на плотине, разделяются:

- на базовые (исходные) события и состояния, вероятности этих событий устанавливаются до расчета дерева отказов; на диаграмме дерева отказов изображаются окружностями с одним выходом;
- головное (вершинное, результирующее) событие-следствие дерева отказов, определяемое логикой взаимодействия всех аварийных событий и состояний, включаемых в диаграмму дерева отказов; на диаграмме головное событие изображается прямоугольником с одним «входом»;
- промежуточные события-следствия, представляющие собой результаты логического взаимодействия нескольких входных событий; вероятности событий-следствий устанавливаются в зависимости от действия логических операторов (символов-операторов) (см. ниже таблицу); на диаграмме дерева отказов промежуточные события-следствия изображаются прямоугольниками с одним «входом» и одним «выходом»;
- события-условия, при реализации которых создаются предпосылки для развития аварии; вероятности событий-условий устанавливаются до расчета дерева отказов; на диаграмме дерева отказов условия изображаются округленными прямоугольниками с боковым «входом».

Используются также символы переноса (в виде треугольников), отображающие перенесение логической связи (определенной ветви дерева отказов) с одной точки диаграммы в другую и символы для нераскрытых на момент построения дерева отказов событий (в виде ромбов) [6-8].

Среди логических операторов при построении деревьев отказов наиболее часто используются [6-8]:

"ИЛИ" (отвечает логической операции «дизъюнкция»);

"И" (отвечает логической операции «конъюнкция»);

"ИСКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ ИЛИ" (отвечает логической операции «исключительная дизъюнкция»);

"БЛОКИРОВКА" (отвечает логической операции «импликация»).

Могут использоваться и другие логические операторы, в частности, "ЧАСТИЧНАЯ БЛОКИРОВКА", " M ИЗ N " и др. [6-8].

Логические операторы и оценка вероятностей
событий-следствий методом деревьев отказов

Наименование логического оператора	Формулы для расчета вероятностей событий-следствий
"ИЛИ"	$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(B_i)) \quad (5)$
"И"	$P(A) = \prod_{i=1}^n P(B_i) \quad (6)$
"ИСКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ ИЛИ"	$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i) \quad (7)$
"БЛОКИРОВКА"	$P(A) = P(B) \cdot P(C) \quad (8)$
"ЧАСТИЧНАЯ БЛОКИРОВКА"	$P(A) = P(B_1) \cdot P(C) + P(B_2) \cdot (1 - P(C)) \quad (9)$
В формулах (5)÷(9) вероятности: $P(B_i)$ – исходного i -го события B ; $p(C)$ – условия C ; $P(A)$ – результирующего события A	

Ниже приводится пример использования метода деревьев отказов при оценке вероятности отказа водосбросного фронта СШГЭС (событие $Q_w < Q_{7000}$). Моделировалась ситуация невозможности аварийной сработки водохранилища при повреждении Саяно-Шушенской плотины в результате землетрясения (см. сценарий на рис. 1).

При оценке вероятности события $Q_w < Q_{7000}$ – «отказ водосбросного фронта и невозможность аварийной сработки водохранилища» (см. рис. 2) рассматривались следующие базовые события, которые изображались на диаграммах деревьев отказов окружностями:

1) $B_{1.1.1}$, $B_{1.1.2}$, $B_{1.1.3}$ – отказы агрегатов ГЭС по пропускной способности; вероятности событий $B_{1.1.1}$, $B_{1.1.2}$, $B_{1.1.3}$ при МРЗ принимались равными 0,003; при ПЗ – равными 0,002 – вероятностям отказа направляющего аппарата [7];

2) $B_{1.2.1}$ ÷ $B_{1.2.11}$ – отказы механического оборудования эксплуатационного водосброса при маневрировании затворами; вероятности $B_{2.1}$ ÷ $B_{2.11}$ при МРЗ принимались равными 10^{-3} ; при ПЗ – $5 \cdot 10^{-4}$ [6];

3) $B_{1,3,1}$ – отказ механического оборудования берегового водосброса при маневрировании затвором; вероятность события $B_{3,1}$ при МРЗ принималась равной 10^{-3} ; при ПЗ – $5 \cdot 10^{-4}$ [6].

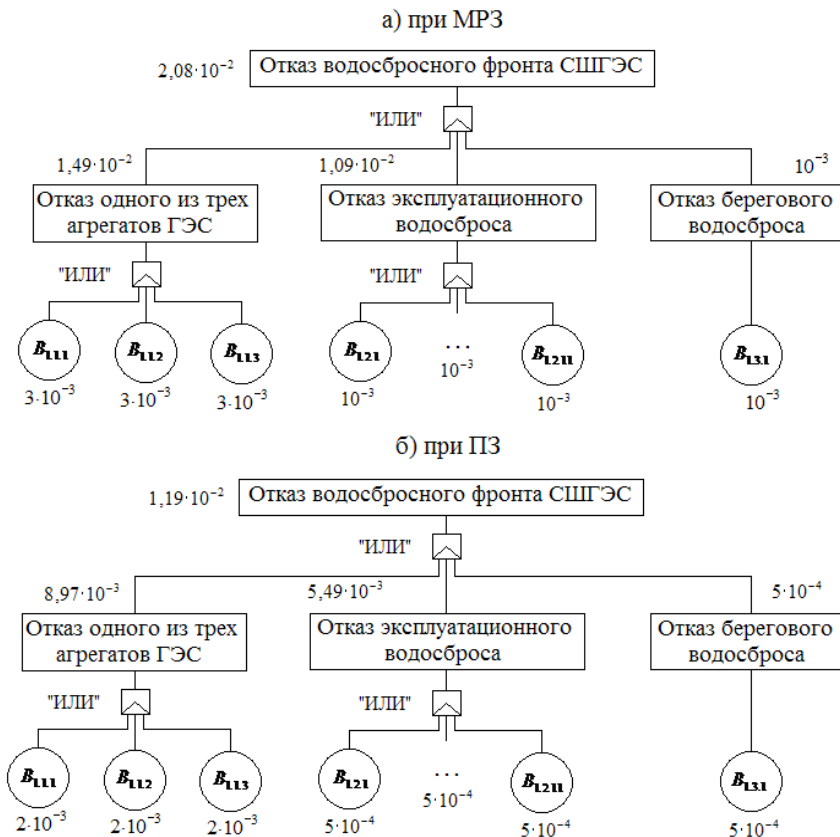


Рис. 2. Дерево отказов для оценки вероятностей события $Q_W < Q_{7000}$ – «отказ водосбросного фронта и невозможность аварийной сработки водохранилища»:
а – при МРЗ; б – при ПЗ

Таким образом, сценарный подход позволяет осуществить синтез вероятностей аварийных событий, полученных с помощью разных методов, в том числе и методами деревьев событий и деревьев отказов. В рамках сценарного подхода можно учесть сложность иерархической струк-

туры плотины как системы, реализовать принципы иерархии и наименьшего взаимодействия. В частности, при чрезмерной сложности иерархической структуры сооружений при решении задачи может использоваться агрегирование событий методом деревьев отказов. В свою очередь принцип наименьшего взаимодействия в системе реализуется в рамках метода деревьев событий. В результате синтеза этих двух методов в рамках сценарного подхода можно обеспечить адекватность результирующей оценки вероятности аварии на плотине с учетом ее индивидуальных особенностей, взаимодействия с другими гидросооружениями и объектами.

Библиографический список

1. Стефанишин Д.В. Некоторые результаты оценки вероятности аварии на плотине Бурейской ГЭС / Д.В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 2008. Т. 251. С.10-17.
2. Stefanyshyn D.V. Assessment of accident risks to support safety of the Boureya dam / D.V. Stefanyshyn // Proc. of Int. Scientific School "Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems". June 24-28, 2008. Saint-Petersburg, Russia. P.P. 377-382.
3. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності / Д.В. Стефанишин. – К.: Азимут-Україна, 2009. – 103 с.
4. Стефанишин Д.В. Вероятностное моделирование гипотетических сценариев двух нетиповых аварий на гидроэнергетических объектах при отказах автоматики / Д.В. Стефанишин, Е.Г. Романчук: [Эл. документ] // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2011. (<http://pamag.ru/prensa/vmgs-heo>).
5. Стефанишин Д.В. Статистические оценки живучести плотин при авариях / Д.В. Стефанишин: [Эл. документ]// Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2011. (<http://pamag.ru/prensa/stat-ocenka-plotina>).
6. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин // СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002. – 589 с.
7. Kumamoto H., Henley E.J. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists / H. Kumamoto, E.J. Henley // New York. IEEE Press. 1996. – 597 p.
8. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams. Vol. 1. Q. 76. 19-22 September. Beijing-China. 2000. – 896 p.