

## ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.8

Д.В. Кузнецов

АО «ЭСКО ЕЭС»

### СЦЕНАРИЙ АВАРИИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ПРИ ПЕРЕЛИВЕ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ГРЕБЕНЬ ПЛОТИНЫ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

Рассмотрено построение сценария гидродинамической аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины», составленный методом анализа дерева отказов, для которого определены основные причины аварии и контролируемые диагностические показатели. Построение сценария аварии выполнено для трех основных причин: чрезмерная осадка гребня, сверхнормативный паводок, неработающий водосброс с учетом последовательности развития событий и соблюдения необходимых условий, приводящих к аварии. Условия аварии определялись диагностическими показателями — уровнем воды в верхнем бьефе и осадкой гребня плотины, которые одновременно являются критериями безопасности гидротехнических сооружений с грунтовыми плотинами и позволяют определять техническое состояние сооружения.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, сценарий аварии, метод анализа дерева отказов, грунтовые плотины, перелив воды через гребень, осадка гребня плотины, критерии безопасности, технические состояния

В соответствии со ст. 10 закона РФ «О безопасности гидротехнических сооружений» № 117-ФЗ от 21 июля 1997 г., «собственник гидротехнического сооружения и (или) эксплуатирующая организация представляет декларацию безопасности гидротехнического сооружения в установленном законодательством Российской Федерации порядке в уполномоченные федеральные органы исполнительной власти» [1]. При составлении декларации безопасности гидротехнических сооружений необходимо выполнить ряд требований [2, 3], в частности провести анализ схем возможных сценариев развития аварий. Сценарии возникновения и развития аварий выполняются в виде описания или построения схем при помощи графических методов анализа дерева отказов или дерева событий [4, 5]. Сценарии аварий, построенные методом анализа дерева отказов, применяют в следующих целях:

для количественной оценки риска развития аварии с использованием статистической базы данных вероятностей наступления событий (отказов);

определения возможного размера вреда [6, 7];

оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений с учетом данных натуральных наблюдений [8—11].

Построение сценария аварии *методом анализа дерева отказов* позволяет графически представить процесс перехода от одного события к другому, конкретизировать причины и события (детализировать процесс) и выявить связи

между ними [12, 13]. Первым шагом в построении дерева отказов является назначение «нежелательного» события, для гидросооружений таким событием является *гидродинамическая авария* [14]. На втором шаге определяются причины возникновения аварии. Для *грунтовых плотин и дамб* причинами аварий являются: перелив через гребень сооружения, потеря устойчивости плотины, потеря фильтрационной прочности и т.д. [15]. Далее выявляют события, способствующие развитию аварий:

- обрушение откосов плотины;

- фильтрационные деформации грунтов сооружения или основания;

- образование оврагов на откосах и гребне плотины, что означает образование промоин по ширине и глубине свыше 50 см на откосах с выходом на гребень или образование промоин на гребне;

- обрушение верхового (низового) откоса (в результате быстрого срабатывания водохранилища, подрезки откоса, просадки основания, увеличения нагрузки, сейсмического воздействия, подмыва низового откоса, обледенения низового откоса);

- перелив воды через гребень плотины;

- размыв тела плотины по поперечной поверхностной или внутренней трещине;

- размыв тела плотины в результате образования оврагов.

Выполненный анализ позволяет приступить к построению дерева отказов для логически связанных событий. При построении сценариев аварии методом анализа дерева отказов используют логические операторы («и», «или», «запрет», «приоритетное и», «исключающее или», «*т* из *n*»), связывающие события и их причины в соответствии с их взаимосвязями, а также позволяющие выстроить последовательность событий, приводящих к аварии или нежелательному событию [16].

Наиболее часто используемые логические операторы:

- «и» — выходное событие происходит, если все входные события появляются одновременно;

- «или» — выходное событие происходит, если случается любое из входных событий.

В качестве примера рассмотрим построение дерева отказов сценария гидродинамической аварии для одной из перечисленных причин — перелив воды через грунтовой гребень плотины.

Перелив воды через гребень плотины может возникать в результате следующих причин [17, 18]:

- чрезмерной осадки гребня грунтовой плотины*. Осадка гребня плотины происходит за счет уплотнения грунта тела плотины и основания под действием нерасчетных нагрузок (увеличения транспортной нагрузки и др.) или сейсмического воздействия (природного или техногенного). Когда отметка гребня достигает отметки форсированного подпорного уровня (ФПУ) и ниже, возможен перелив через плотину и разрушение сооружения. По мнению автора, чрезмерной осадкой гребня плотины необходимо считать такую осадку, которая возникла под действием нерасчетных нагрузок и (или) величина которой превышает расчетное (прогнозное) значение, учтенное в проекте;

*при сверхнормативном паводке или аварии (прорыве) вышерасположенного гидроузла.* Если водосбросы не справляются с пропуском расхода, то уровень верхнего бьефа поднимается выше отметки гребня плотины и через него переливается вода. При этом разрушение плотины наиболее вероятно в уязвимых местах, например, в примыканиях к бетонным сооружениям в местах, где плотина имеет наибольшую осадку или излом (угол поворота), и др.;

*при неработающих водосбросах или не обеспечивающих пропуск расчетного расхода водосбросных сооружениях.* Эта ситуация возникает при заклинивании затворов в пазах, ремонте водосбросных сооружений или подъемных механизмов, выходе из строя подъемного механизма, отключении электропитания и поломке механизмов ручного подъема затворов и т.п., а также вследствие ошибки оператора — оператор не поднял затворы или применил неправильную схему маневрирования затворами [19].

На Широковской плотине [15] осадки гребня до ремонта превышали 70 см. Осадка гребня грунтовой плотины Шершневского гидроузла по состоянию на 25 августа 1989 г. составила 35 см, в дальнейшем при ремонтных работах гребень грунтовой плотины был досыпан до проектной отметки [21]. На плотине Чирюртских ГЭС (Россия) до землетрясения осадки гребня достигали 70...80 см. Аварии на этих плотинах не произошли лишь по причине маловодных лет.

До трети всех аварий грунтовых плотин происходят вследствие сверхнормативных паводков. Так были размыты грунтовая плотина Киселевского гидроузла [20], плотины «Эуклидес да Кинче» и «Армандо ди Салес Оливейра» в Бразилии [15] и др.

Разрушение пазов затворов и их конструкций, неправильные эксплуатация и схема маневрирования затворов привели к подъему уровня воды и разрушению плотины «Паншет» (Индия). Плотина «Уэллнот Грув» (США) разрушилась из-за невозможности поднять затворы. Перелив воды через гребень грунтовой плотины Тирлянского гидроузла (Россия) произошел в результате обрыва троса подъемного механизма сегментного затвора при прохождении паводка. Из-за аварии системы электроснабжения, в результате которой не работали лебедки для подъема затворов, не удалось своевременно открыть отверстия водосброса, и была разрушена плотина «Чиккахоле» (Индия).

В каждом случае у сооружения имелись собственники или эксплуатирующая организация, вел работу государственный надзор, но, несмотря на это, аварии все же произошли. Необходимо отметить, что причинами повреждения и аварий также может служить человеческий фактор, т.е. недостаточная квалификация эксплуатационного персонала, незнание особенностей конструкции и условий эксплуатации гидротехнических сооружений и механического оборудования.

Таким образом, диагностическими показателями аварии в результате перелива воды через гребень плотины служат следующие признаки:

- уровни воды в бьефах;
- осадка гребня плотины;
- состояние водосбросных сооружений и их оборудования.

На рис. 1. приведен сценарий аварии «Перелив через гребень плотины Чирюртских ГЭС» в виде *дерева отказов*, представленный как пример в нормативном документе [22].



Рис. 1. Дерево отказов для сценария аварии А1 «Перелив воды через гребень плотины Чирюртских ГЭС»

При построении данного сценария аварии были учтены только две основные причины: снижение пропускной способности водосброса в паводок и сверхнормативный паводок, но не учтена *осадка гребня плотины*.

Кроме того, при построении сценария аварии методом анализа дерева отказов применение логического знака «и» означает, что выходное событие А1 «Перелив воды через гребень плотины» наступает в том случае, если входные события В1 «Снижение пропускной способности водосброса» и В2 «Сверхнормативный паводок» появляются одновременно. Однако каждое из этих событий В1 и В2 может послужить причиной перелива воды через гребень, поэтому правильнее здесь применить логический знак «или».

Событие С1 «Потеря внешнего электропитания» приводит в первую очередь к «Отказам механического оборудования водосброса», т.е. если произошла потеря внешнего электропитания, то выполнять открытие или закрытие водопропускных отверстий невозможно (например, нет электропитания приводных устройств). Следовательно, данное событие логичнее было бы перенести на ступень ниже (ступень D). Событие С3 «Террористический акт» предлагается не рассматривать, так как данное событие может привести к отказу или разрушению любого сооружения и не относится к «техническому» событию [23].

Нужно отметить еще один момент — в предлагаемом сценарии отсутствует событие, когда сооружение при расчетном паводке не обеспечивает пропуск расчетного расхода через водосброс, которое является результатом события «Оператор не поднял затворы — ошибка оператора», или была применена «неправильная» схема маневрирования затворами.

Таким образом, в приведенном примере построения сценария аварии допущены две неточности: отсутствие третьей причины аварии — «чрезмерная осадка гребня грунтовой плотины» — и неправильно применен логический знак «и». На основании приведенного анализа рассмотренный пример сценария

рия аварии «Перелив воды через гребень плотины Чирюртских ГЭС» примет вид, представленный на рис. 2.



Рис. 2. Дерево отказов для сценария аварии А1 «Перелив воды через гребень плотины Чирюртских ГЭС» с учетом внесенных изменений и указанием вероятностей наступления событий

Построение сценариев аварии для гидротехнических сооружений является одним из этапов анализа риска аварий и неотъемлемой частью его оценки. Поэтому для приведенного на рис. 2 сценария аварии выполним расчет вероятности  $p$  возникновения аварии в результате «Перелива воды через гребень плотины», используя формулы (1) и (2) для логических операторов «и», «или» соответственно [4, 6]:

$$p = \prod_{i=1}^n p_i; \quad (1)$$

$$p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (2)$$

получим результат среднегодовой вероятности аварии А1 — перелив воды через гребень плотины —  $p = 10^{-4}$  1/год. Сравнение полученного результата с допустимым уровнем риска<sup>1</sup> для сооружений 2-го класса, который равен  $(4...5) \cdot 10^{-4}$  1/год, показывает, что риск аварии грунтовой плотины соответствует нормам, но значительно превышает результат  $p = 10^{-6}$  1/год, представленный в стандарте [22].

Таким образом, уточнение причин аварий и корректное использование логических операторов позволило более точно определить среднегодовую вероятность аварии, которая составила  $10^{-4}$  1/год, в отличие от величины  $10^{-6}$  1/год, указанной в стандарте.

Вследствие малого расхождения полученного результата с допустимым уровнем риска, а также в связи с тем, что в расчетах приведены только порядки величин вероятностей отказов, уточнение полученного результата предлагается выполнить при помощи построения сценария аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины» по двум контролируемым диагностическим пара-

<sup>1</sup> Допустимый уровень риска для гидротехнических сооружений необходимо определять в соответствии с СП 58.13330.2012 «СНиП 33-01-2003. «Гидротехнические сооружения. Основные положения».

метрам: уровень воды верхнего бьефа (УВБ) и геодезическая отметка гребня грунтовой плотины.

Уровень воды в верхнем бьефе может подняться выше гребня плотины или противодиффузионного устройства в результате «Подъема уровня воды в верхнем бьефе» — событий В1 и В2 или «Осадки гребня плотины» — события В3 в случае отказов на рис. 2. В соответствии с СНиП [24] УВБ может изменяться от уровня срабатывания водохранилища (УСВ) до нормального подпорного уровня (НПУ), а в некоторых случаях до ФПУ. Перелив воды через гребень может произойти, если уровень воды начнет подниматься выше ФПУ и превысит отметку гребня плотины или гребня противодиффузионного элемента. Уровень верхнего бьефа, при котором сооружение исчерпает свои возможности в восприятии сверхнормативной нагрузки в результате потери либо прочности, либо устойчивости, либо перелива воды через гребень плотины, назовем критическим подпорным уровнем (КПУ) [25].

Событие «Перелив воды через гребень грунтовой плотины» зависит от положения гребня грунтовой плотины (отметки гребня грунтовой плотины), т.е., зная минимальную отметку гребня плотины, можно определить интервал между минимальным и максимальным возможными уровнями воды, при котором может произойти перелив воды через гребень. Поэтому анализ случаев сценария аварии по определению условия наступления «Перелива воды через гребень плотины» необходимо вести по уровню воды, сравнивая его с фактической отметкой гребня плотины.

Принимая во внимание вышеизложенное, предлагаем сценарий аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины» с учетом изменения (подъема) уровня воды в верхнем бьефе и фактического положения гребня грунтовой плотины (минимальной отметки гребня плотины), приведенный на рис. 3.

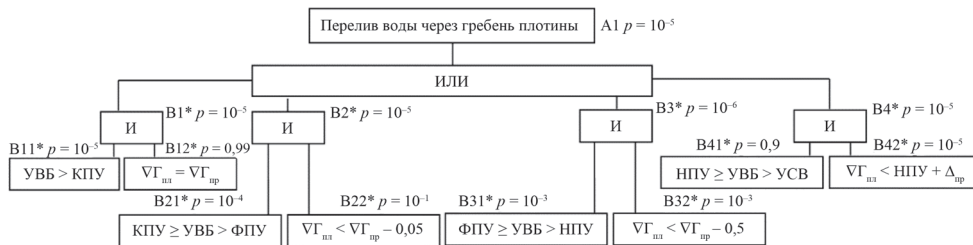


Рис. 3. Условия перелива воды через гребень плотины для сценария аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины»

Данные события раскрывают все возможные условия аварии для данного сценария, и именно поэтому два условия стоят на одном уровне (см. рис. 3), показывая аварийные случаи.

Перелив воды через гребень плотины при уровне воды выше КПУ произойдет в случае, если отметка гребня грунтовой плотины  $\nabla\Gamma$  будет равна проектной отметке  $\nabla\Gamma_{пр}$ , т.е.  $УВБ > КПУ$  (событие В11\* на рис. 3) «и»  $\nabla\Gamma = \nabla\Gamma_{пр}$  (В12\*). На рис. 3 — это случай В1\*. Если отметка гребня плотины  $\nabla\Gamma$  ниже проектной отметки  $\nabla\Gamma_{пр}$ , то перелив воды через гребень грунтовой плотины может произойти при уровнях воды ниже КПУ, т.е. в следующих случаях и при соблюдении соответствующих условий:



УВБ изменяется в интервале от ФПУ до КПУ (указание «от» не включает нижнюю границу интервала, «до» включает верхнюю границу интервала) «и» (логический оператор на схеме) отметка гребня плотины ниже величины проектной отметки гребня плотины на величину допуска на вертикальные размеры при возведении земляных сооружений, равного 0,05 м [26], т.е.  $КПУ \geq УВБ > ФПУ$  (В21\*) «и»  $\nabla\Gamma < \nabla\Gamma_{пр} - 0,05$  м (В22\*). На рис. 3 — это событие В2\*;

УВБ изменяется в интервале от НПУ до ФПУ «и» отметка гребня плотины ниже (указание «ниже» не включает верхнее значение границы неравенства) проектной отметки гребня плотины на величину нормативного запаса возвышения гребня над точкой вскатывания волны по верховому откосу, равную 0,50 м [24], т.е.  $ФПУ \geq УВБ > НПУ$  (В31\*) «и»  $\nabla\Gamma < \nabla\Gamma_{пр} - 0,5$  м (В32\*). На рис. 3 — это событие В3\*;

УВБ изменяется в интервале от УСВ до НПУ «и» отметка гребня плотины ниже отметки, равной сумме отметки НПУ плюс минимально допустимое превышение гребня плотины  $\Delta_{пр}$ , м, над уровнем воды в верхнем бьефе, который можно определить или принять для грунтовых плотин по правилам безопасности [27], т.е.  $НПУ \geq УВБ > УСВ$  (В41\*) «и»  $\nabla\Gamma < НПУ + \Delta_{пр}$  (В42\*), где  $\Delta_{пр} = 1,5$  м — для I и II класса, 1,0 м — для III и IV класса. На рис. 3 — это событие В4\*.

В рассмотренных случаях и условиях возникновения аварии отражены критерии безопасности К1, К2, К3 для нагрузки, которую оказывает уровень воды в верхнем бьефе:

$$К1(УВБ) = \nabla НПУ, \quad К2(УВБ) = \nabla ФПУ, \quad К3(УВБ) = \nabla КПУ, \quad (3)$$

и геометрического соответствия сооружения — отметка гребня плотины:

$$К1(\nabla\Gamma) = \nabla\Gamma_{пр} - 0,05 \text{ м}, \quad К2(\nabla\Gamma) = \nabla\Gamma_{пр} - 0,5 \text{ м}, \quad К3(\nabla\Gamma) = НПУ + \Delta_{пр}, \quad (4)$$

которые являются границами четырех возможных технических состояний — *нормативного, работоспособного, ограниченно-работоспособного, аварийного* [25].

Таким образом, при помощи сценария аварии, на основании рассмотренных условий — критериев безопасности, по промежуточным значениям контролируемых параметров предлагается определять состояние грунтовой плотины одновременно по двум контролируемым диагностическим показателям: уровню воды в верхнем бьефе и геодезической отметке гребня плотины. Обращаем внимание, что в рассмотренном сценарии аварии, независимо по каким условиям произошел «подъем уровня воды в верхнем бьефе выше гребня плотины» (на рис. 3 соответствует событиям В1\*, В2\*, В3\*, В4\*), состояние грунтовой плотины — *аварийное*.

Вероятность возникновения события А1 по сценарию аварии, приведенного на рис. 3, равна  $p = 10^{-5}$  1/год, что на порядок меньше допустимого значения и позволяет считать приемлемым риск возникновения аварии в результате «перелива воды через гребень плотины» для рассматриваемого примера. Использование таких условий возникновения аварии, как уровень воды в верхнем бьефе и геодезическая отметка гребня плотины в сценарии аварии (см. рис. 3), позволили уточнить вероятность отказа по сравнению с представленным в стандарте (см. рис. 1) и с предлагаемым сценарием аварии (см. рис. 2).

Как справедливо отмечают авторы монографии [16]: «Построение причинно-следственных диаграмм, деревьев событий и деревьев отказов является, воз-

можно, больше инженерным искусством, нежели научным исследованием... При построении деревьев событий и деревьев отказов исследователь имеет право на творчество и собственное видение ситуации, но при этом он должен стараться в модели как можно лучше отразить собственно исследуемую систему, ее поведение, особенности функционирования, взаимозависимости между составными частями системы», и в соответствии с правилами построения сценария аварии методом анализа дерева отказов, предлагаем объединить схемы на рис. 2 и 3 в одну (рис. 4). Для этого разделим причины аварии на две группы:

в первую группу входят снижение пропускной способности водосброса и сверхнормативный паводок, т.е. причины, в результате которых происходит подъем уровня воды в верхнем бьефе;

во вторую — чрезмерная осадка гребня грунтовой плотины, т.е. причина, в результате которой происходит такая осадка гребня грунтовой плотины, которая приводит к переливу воды через гребень.

Объединение групп осуществим при помощи четырех условий, описанных выше, наступление одного из которых приводит к переливу воды через гребень плотины.

На рис. 4 представлен обновленный и более универсальный сценарий аварии, составленный с использованием метода анализа дерева отказа «Перелив воды через гребень грунтовой плотины» для трех основных причин. Он состоит из двух ветвей развития аварии и учитывает четыре условия наступления аварии. «Левая» ветвь сценария аварии представлена для следующих причин: *сверхнормативный паводок и пропуск расчетного расхода при неработающих или не обеспечивающих пропуск расчетного расхода водосбросных сооружениях*. Эти причины характеризуются контролируемым параметром — *уровнем воды в верхнем бьефе*. «Правая» ветвь сценария представлена для такой причины, как *чрезмерная осадка гребня грунтовой плотины*, ее контролируемый параметр, влияющий на состояние грунтовой плотины, — *осадка гребня плотины*, которая характеризуется геодезической отметкой и определяется путем сравнения значений измеренной и проектной отметок.

Необходимо отметить, что при построении сценария аварии не учитывалось событие непреодолимой силы в результате противоправных действий других лиц — террористический акт. В связи с тем, что «перелив воды через гребень плотины», который характеризуется кратковременным или длительным неконтролируемым сбросом воды через гребень плотины на низовой откос, что приводит к частичным разрушениям низового откоса или аварии, в сценарий аварии предлагается включить события В1 «Размыв тела плотины» и А1 «Гидродинамическая авария» (см. рис. 4).

Приведенный на рис. 4 сценарий аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины», разработанный с применением метода анализа дерева отказов, предлагается использовать в качестве типового, а в каждом конкретном случае уточнять причины или сокращать схему в зависимости от конструктивных особенностей гидротехнических сооружений и условий эксплуатации. Сценарий аварии для каждого конкретного гидротехнического сооружения должен быть уточнен с учетом реального состояния всех элементов напорного фронта.



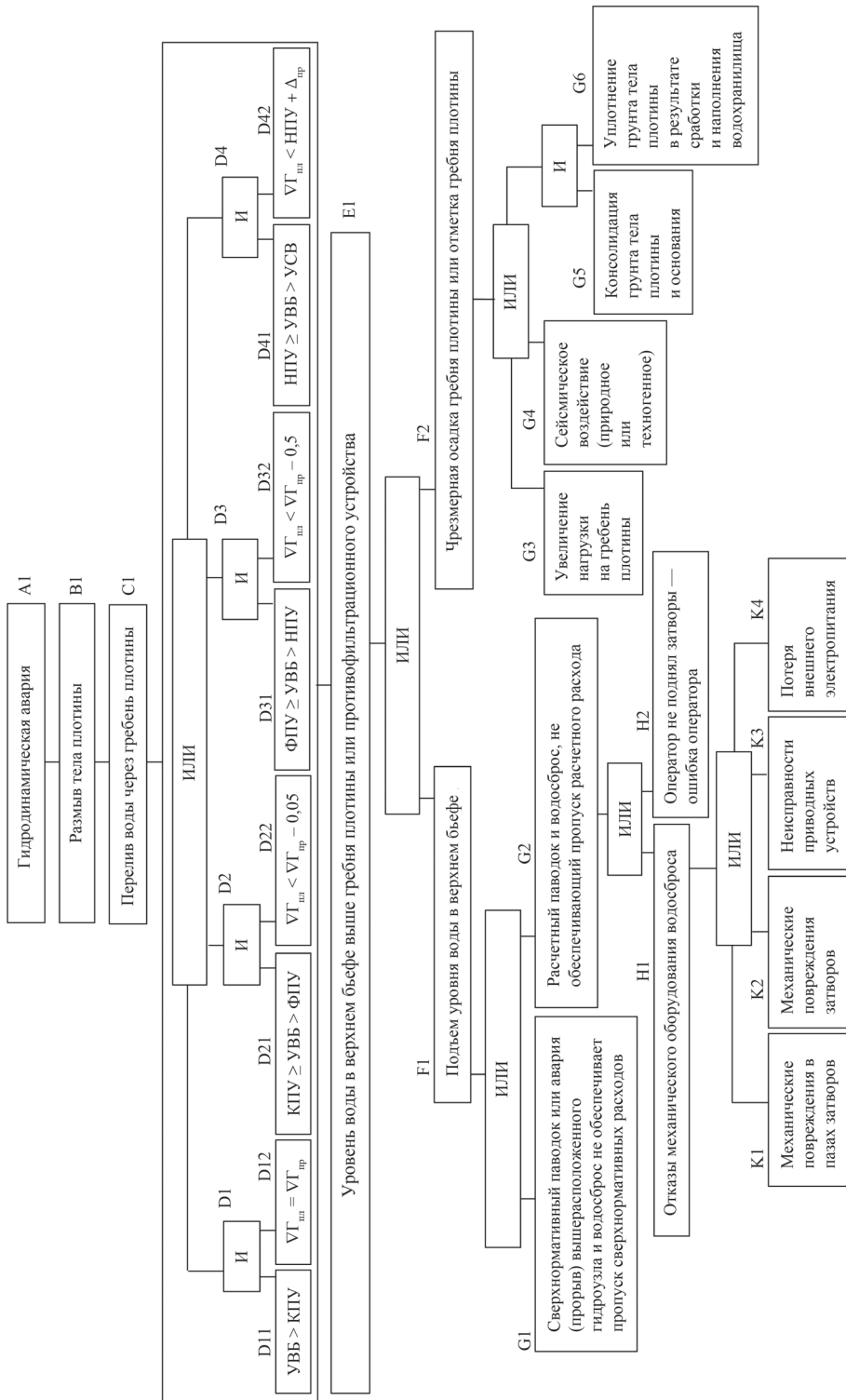


Рис. 4. Сценарий аварии, разработанный методом анализа дерева отказа «Перелив воды через гребень грунтовой плотины»

Данный сценарий аварии предлагается использовать в декларациях безопасности без выполнения расчета оценки риска. Он показывает эксплуатационному персоналу возможные условия возникновения аварии и позволяет выполнять анализ приводящих к ней причин и событий. Расчет оценки риска, вероятности возникновения аварии, предлагается выполнять по схеме, приведенной на рис. 2, а по схеме на рис. 3 выполнять уточняющий расчет.

*Выводы.* Предложена методика представления сценария аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины» методом построения и анализа дерева отказов с указанием условий развития аварии, которые отражают критерии безопасности и аварийного состояния плотины в зависимости от уровня воды в верхнем бьефе и отметок гребня грунтовой плотины.

Предлагаемая методика (см. рис. 2 и 3) позволяет более точно выполнять расчеты вероятностей возникновения аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины» и учитывать все аварийные ситуации.

Представленный сценарий аварии, разработанный методом анализа дерева отказов (см. рис. 4), позволяет:

эксплуатационному персоналу — наглядно представлять возможные причины подъема уровня воды (события G1, G2 на схеме на рис. 4) и осадок гребня грунтовой плотины (события G3, G4, G5, G6 на схеме на рис. 4), принимать соответствующие меры по их предупреждению (ремонт, маневрирование затворами и др.), оценивать возможности возникновения аварии при различных уровнях воды и при известной минимальной отметке гребня плотины (события D1, D2, D3, D4 на схеме на рис. 4);

органам государственного технического надзора и МЧС — более точно определять условия аварийных состояний конкретных грунтовых плотин при известном уровне воды и минимальной отметке гребня плотины, при пропуске паводковых расходов прогнозировать условия, при которых возможен перелив воды через гребень грунтовой плотины, использовать при расследовании возможных причин аварии «Перелив воды через гребень грунтовой плотины» конкретных сооружений.

### Библиографический список

1. О безопасности гидротехнических сооружений : Федеральный закон РФ № 117-ФЗ от 21 июля 1997 г.
2. Об утверждении дополнительных требований к содержанию декларации безопасности гидротехнических сооружений на объектах энергетики : Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 1163 от 29 декабря 2006 г.
3. Дополнительные требования к содержанию декларации безопасности и методика ее составления, учитывающие особенности декларирования безопасности гидротехнических сооружений объектов энергетики : РД-12-03-2006.
4. Хенли Е. Дж., Куамато Х. Надежность технических систем и оценка риска. М. : Машиностроение, 1984. 528 с.
5. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М. : Мир, 1984. 318 с.
6. Беллендир Е.Н., Ивашищев Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. СПб. : ВНИИГ, 2004. 532 с.

7. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса : утв. приказом МЧС РФ и Минэнерго РФ № 776/508 от 29 декабря 2003 г.

8. *Иващенко И.Н., Радкевич Д.Б., Иващенко К.И.* Вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований // Гидротехническое строительство. 2012. № 7. С. 22—28.

9. ICOLD Bulletin No. 130. Risk analysis for dam safety. Guidelines and management. Paris, France : ICOLD Publ., 162 p.

10. Risk and uncertainties in dam safety / edited by J. Hardrow. CEA Group Co. Canada, 2005. 580 p.

11. П-842-86 (Гидропроект). Рекомендации по оценке надежности гидротехнических сооружений. М. : Изд-во Гидропроект, 1986.

12. *Елохин А.Н.* Анализ и управление риском: теория и практика. М. : Страховая группа «Лукойл», 2000. 185 с.

13. *Острейковский В.А., Швыряев Ю.В.* Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. М. : Физматлит, 2008. 349 с.

14. *Векслер А.Б., Ивашиных Д.А., Стефанишин Д.В.* Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. СПб. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. 591 с.

15. *Малаханов В.В.* Техническая диагностика грунтовых плотин. М. : Энергоатомиздат, 1990. 121 с. (БГГ. Б-ка гидротехника и гидроэнергетика; Вып. 97)

16. *Гузенков С.Н., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г.* Надежность хвостовых хозяйств обогатительных фабрик. Белгород : Везелица, 2007. 674 с.

17. *Малик Л.К.* Чрезвычайные ситуации, связанные с гидротехническим строительством (ретроспективный обзор) // Гидротехническое строительство. 2009. № 12. С. 2—16.

18. *Бобков С.Ф., Боярский В.М., Векслер А.Б., Швайништейн А.М.* Основные факторы учета пропускной способности гидроузлов при декларировании их безопасности // Гидротехническое строительство. 1999. № 4.

19. *Василевский А.Г., Штильман В.Б., Шульман С.Г.* Методы оценки надежности затворов гидротехнических сооружений (системный анализ). СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2010.

20. *Калустьян Э.С.* Уроки аварий Киселевской и Тирлянкой плотин // Гидротехническое строительство. 1999. № 4. С. 48—50.

21. *Малаханов В.В., Толстиков В.В., Кузнецов Д.В.* Информационно-диагностическая программа «Шершневыский гидроузел» // Вестник МГСУ. 2006. № 2. С. 97—111.

22. СТП ВНИИГ 210.02.НТ-04. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений / под ред. Е.Н. Беллендира, Н.Я. Никитиной. 2-е изд. СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005. 99 с.

23. *Школьников С.Я.* О требованиях к выбору сценариев аварий гидротехнических сооружений при расчете вреда, который может быть причинен физическим и юридическим лицам // Гидротехническое строительство. 2014. № 7. С. 46—50.

24. Строительные нормы и правила. Плотины из грунтовых материалов : СНиП 2.06.05-84 : утв. Госстроем СССР 28.09.84. М. : Госстрой СССР, 1991. 49 с.

25. *Малаханов В.В., Кузнецов Д.В.* Совершенствование мониторинга состояния и декларирования безопасности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2016. № 1. С. 41—53.

26. СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты. М. : ВНИИГ, 1988. 128 с.

27. Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов : ПБ 03-438-02. М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2010.

Поступила в редакцию в январе 2016 г.

Об авторе: **Кузнецов Дмитрий Викторович** — инженер, главный специалист отдела управления проектами «Юг», **Акционерное общество «Энергостроительный комплекс ЭЭС» (АО «ЭСКО ЭЭС»)**, 117393, г. Москва, ул. Архитектора Власова, д. 51, dv\_kuznetcov@mail.ru.

Для цитирования: *Кузнецов Д.В.* Сценарий аварии грунтовых плотин при переливе воды через гребень плотины методом анализа дерева отказов // Вестник МГСУ. 2016. № 4. С. 94—107.

**D.V. Kuznetsov**

### SCENARIO OF AN ACCIDENT OF SOIL DAMS IN CASE OF WATER SPILL OVER A DAM CREST BY USING FAULT TREE ANALYSIS

The scenario of a hydrodynamic accident of water flow over a crest of a soil dam is considered by the method of fault tree analysis, for which the basic reasons and controlled diagnostic indicators of an accident have been defined.

Logical operators “AND”/“OR” were used for creation of a sequence of logically connected events, leading to an undesired event in the scenario of accident.

The scenario of the accident was plotted in case of three basic reasons — an excessive settling of a dam crest, an excess flood, an inoperable spillway, taking into account the sequence of the events’ development and with observance of the necessary conditions leading to an accident. “Technical” reasons were observed in the present scenario, force majeure events were not considered.

The provided scenario of the accident consists of two branches of events’ development: the left one that depends on an upstream level, and the right one that depends on settling of a dam crest. In each of the considered events an accident “the water spill over a crest of a soil dam” is possible only in case of execution of two different conditions at the same time, i.e. in case of an appropriate upstream level and the appropriate mark of a crest of a soil dam.

The conditions of the accident are defined by diagnostic indices — the upstream level and settling of a dam crest, which at the same time are safety criteria of the hydraulic structure for soil dams. They allow defining the technical condition of the construction.

Four possible technical conditions are suggested for the definition of technical statuses — normative, operable, limited operable, abnormal.

Criteria of safety are the boundaries of the state: for loading and impact — it is the upstream level, for geometrical compliance of the construction — it is a dam crest mark.

**Key words:** hydraulic structure, accident scenario, fault tree analysis, soil dams, water spill over a crest, settling of a dam crest, criteria of safety, technical conditions

### References

1. *O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* : Federal’nyy zakon RF № 117-FZ ot 21 iyulya 1997 g. [Federal Law of the Russian Federation no. 117-FZ from July 21, 1997 “On Safety of Hydraulic Structures”]. (In Russian)
2. *Ob utverzhdenii Dopolnitel’nykh trebovaniy k sodержaniyu deklaratsii bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na ob’ektakh energetiki* : Prikaz Federal’noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru № 1163 ot 29 dekabrya 2006 g. [The Order of the Federal Environmental, Technological and Nuclear Supervision Service of Russia, dated 29.12.2006 no. 1163 “On the Approval of Additional Requirements to the Contents of the Declaration of Safety of Hydraulic Structures on Power Engineering Facilities”]. (In Russian)
3. *Dopolnitel’nye trebovaniya k sodержaniyu deklaratsii bezopasnosti i metodika ee sostavleniya, uchityvayushchie osobennosti deklarirovaniya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh*

*sooruzheniy ob'ektov energetiki : RD-12-03-2006* [RD-12-03-2006 Additional Requirements to the Content of the Declaration of Safety and a Technique of Its Drawing Up Considering the Features of Declaring Safety of the Hydraulic Structures of Power Engineering Facilities]. (In Russian)

4. Henley E.J., Kumamoto H. Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice Hall, June 1980, 568 p.

5. Dhillon B.S., Singh Chanan. Engineering Reliability. New Techniques and Applications. Publication John Willey & Sons, New York, 1981, 362 p.

6. Bellendir E.N., Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V., Finagenov O.M., Shul'man S.G. Veroyatnostnye metody otsenki nadezhnosti gruntovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Probabilistic Assessment Methods of the Reliability of Soil Hydraulic Engineering Constructions]. Saint Petersburg, VNIIG Publ., 2004, 532 p. (In Russian)

7. *Metodika opredeleniya razmera vreda, kotoryy mozhet byt' prichinen zhizni, zdorov'yu fizicheskikh lits, imushchestvu fizicheskikh i yuridicheskikh lits v rezul'tate avariy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy predpriyatiy toplivno-energeticheskogo kompleksa : utverzhdena prikazom MChS RF i Minenergo RF № 776/508 ot 29 dekabrya 2003 g.* [Technique of Determining the Extent of Harm, Which Can Be Caused to Life, Health of Natural Persons, Property of Natural and Legal Individuals as a Result of Failures of Hydraulic Engineering Constructions of the Enterprises of Fuel And Energy Complex : approved by the Order of EMERCOM of Russia and the RF Ministry of Energy no. 776/508 from 29 December 2003]. (In Russian)

8. Ivashchenko I.N., Radkevich D.B., Ivashchenko K.I. Veroyatnostnaya otsenka riska avariy plotin po rezul'tatam ikh monitoringa i obsledovaniy [Probabilistic Assessment of the Risk of Accidents of Dams by Results of Their Monitoring and Inspections.] *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2012, no. 7, pp. 22—28. (In Russian)

9. ICOLD Bulletin No. 130. Risk Analysis for Dam Safety. Guidelines and Management. ICOLD Publ., Paris, France, 162 p.

10. Hardrow J., editor. Risk and Uncertainties in Dam Safety. CEA Group Co. Canada, 2005, 580 p.

11. *P-842-86 (Gidroproekt). Rekomendatsii po otsenke nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Recommendations for the Assessment of Reliability of Hydraulic Engineering Constructions. P-842-86 (Gidroproekt)]. Moscow, Gidroproekt Publ., 1986. (In Russian)

12. Elokhin A.N. *Analiz i upravlenie riskom: teoriya i praktika* [Analysis and Management of Risk: Theory and Practice]. Moscow, Strakhovaya gruppa «Lukoil», 2000, 185 p. (In Russian)

13. Ostreykovskiy V.A., Shvyryaev Yu.V. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy. Veroyatnostnyy analiz* [Safety of Nuclear Power Plants. Probabilistic Analysis]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 349 p. (In Russian)

14. Veksler A.B., Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V. *Nadezhnost', sotsial'naya i ekologicheskaya bezopasnost' gidrotekhnicheskikh ob'ektov: otsenka riska i prinyatie resheniy* [Reliability, Social and Environmental Safety of Hydraulic Structures: Risk Assessment and Decision Making]. Saint Petersburg, VNIIG im. B.E. Vedeneeva Publ., 2002, 591 p. (In Russian)

15. Malakhanov V.V. *Tekhnicheskaya diagnostika gruntovykh plotin* [Technical Diagnosis of Soil Dams]. Moscow, Energoatom-izdat Publ., 1990, 121 p. (BGG. B-ka gidrotekhnika i gidroenergetika [Library of Hydrotechnical and Hydroenergy Worker]; no. 97). (In Russian)

16. Guzenkov S.N., Stefanishin D.V., Finagenov O.M., Shul'man S.G. *Nadezhnost' khvostovykh khozyaystv obogatitel'nykh fabric* [Reliability of Tail Facilities of Concentrating Factories]. Belgorod, Vezelitsa Publ., 2007, 674 p. (In Russian)

17. Malik L.K. *Chrezvychaynye situatsii, svyazannye s gidrotekhnicheskimi stroitel'stvami (retrospektivnyy obzor)* [The Emergency Situations Connected to Hydrotechnical Construction (the Retrospective Review)]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2009, no. 12, pp. 2—16. (In Russian)

18. Bobkov S.F., Boyarskiy V.M., Veksler A.B., Shvaynshteyn A.M. *Osnovnye faktory ucheta propusknoy sposobnosti gidrouzlov pri deklarirovani ikh bezopasnosti* [Basic Factors of the Accounting for Throughput of Water-Engineering Systems When Declaring Their Safety]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1999, no. 4. (In Russian)



19. Vasilevskiy A.G., Shtil'man V.B., Shul'man S.G. *Metody otsenki nadezhnosti zatvorov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy (sistemnyy analiz)* [Methods for Assessing the Reliability of the Gates of Hydraulic Structures (Systems Analysis)]. Saint Petersburg, OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva» Publ., 2010. (In Russian)
20. Kalustyan E.S. *Uroki avariyy Kiselevskoy i Tirlyanskoy plotin* [Lessons of the Accidents of Kiselevsk and Tirlyansk Dams]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1999, no. 4, pp. 48—50. (In Russian)
21. Malakhanov V.V., Tolstikov V.V., Kuznetsov D.V. Informatsionno-diagnosticheskaya programma «Shershnevskiy gidrouzel» [Information and Diagnostic Program “Shershnevskiy Water-Engineering System”]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2006, no. 2, pp. 97—111. (In Russian)
22. Bellendir E.N., Nikitina N.Ya., editors. *STP VNIIG 210.02.NT-04. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska avariyy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [STP VNIIG 210.02.NT-04. Methodical Instructions for Risk Analysis of Accidents of Hydraulic Structures]. 2nd edition. Saint Petersburg, OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva» Publ., 2005, 99 p. (In Russian)
23. Shkol'nikov S.Ya. O trebovaniyakh k vyboru stsensariy avariyy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy pri raschete vreda, kotoryy mozhet byt' prichinen fizicheskim i yuridicheskim litsam [On the Requirements to a Choice of Scenarios of Failures of Hydraulic Engineering Constructions in Case of Calculation of Harm Which Can Be Caused to Natural and Legal Individuals]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2014, no. 7, pp. 46—50. (In Russian)
24. *Stroitel'nye normy i pravila. Plotiny iz gruntovykh materialov : SNiP 2.06.05-84 : utverzhdeny Gosstroem SSSR 28.09.84* [Construction Rules and Regulations SNiP 2.06.05-84\* Dams of Soil Materials. Approved by Gosstroy of USSR 28.09.84]. Moscow, Gosstroy SSSR Publ., 1991, 49 p. (In Russian)
25. Malakhanov V.V., Kuznetsov D.V. Sovershenstvovanie monitoringa sostoyaniya i deklarirovaniya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Improvement of Monitoring of a State and Declaring of Safety of Hydraulic Structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2016, no. 1, pp. 41—53. (In Russian)
26. *SNiP 3.02.01-87. Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenti* [Construction Rules and Regulations SNiP 3.02.01-87. Soil Constructions, Bases and Foundations]. Moscow, VNIIG Publ., 1988, 128 p. (In Russian)
27. *Pravila bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy nakopiteley zhidkikh promyshlennykh otkhodov : PB 03-438-02* [PB 03-438-02 Safety Rules for Hydraulic Structures of Liquid Industrial Wastes Reservoirs]. Moscow, ZAO NTTs PB Publ., 2010. (In Russian)

About the author: **Kuznetsov Dmitry Viktorovich** — engineer, chief specialist, Department of Project Management “South”, **JSC Energy Constructing Complex EES (ESCO UES)**, 51 Arkhitekтора Vlasova str., Moscow, 117393, Russian Federation; dv\_kuznetcov@mail.ru.

For citation: Kuznetsov D.V. Stsenariy avarii gruntovykh plotin pri perelive vody cherez greben' plotiny metodom analiza dereva otkazov [Scenario of an Accident of Soil Dams in Case of Water Spill over a Dam Crest by Using Fault Tree Analysis]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 4, pp. 94—107. (In Russian)