

УДК 519.2:[627.8.059.22]

**Г. И. Касперов**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);  
**В. Е. Левкевич**, кандидат технических наук, доцент (КИИ МЧС Республики Беларусь);  
**С. М. Пастухов**, старший преподаватель (КИИ МЧС Республики Беларусь)

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АВАРИЙ ПРИ ОБОСОБЛЕННОМ И КАСКАДНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Представлена методика оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий на искусственных водных объектах Республики Беларусь, разработанная на основании метода построения деревьев отказов. Данная методика может быть использована для оценки риска возникновения гидродинамических аварий, а также для разработки краткосрочных и долгосрочных прогнозов.

The methodology for assessment of the hydrodynamic disaster probability on artificial water objects of Republic of Belarus has been presented. The developed methodology can be applied for hydrodynamic disaster probability assessment as well as for short-term and long-term prognoses.

**Введение.** В настоящее время гидрологическая сеть Республики Беларусь насчитывает 26 каскадов, в состав которых входит 76 водохранилищ [1]. Большое количество искусственных водных объектов, расположенных на территории республики и имеющих продолжительный срок эксплуатации, вызывает необходимость разработки методики оценки риска возникновения на них гидродинамических аварий с целью оценки и обеспечения требуемого уровня безопасности на каждом этапе их существования.

Анализ литературных источников показал, что в большинстве случаев при оценке безопасности искусственных водных объектов учитываются лишь отказы технических систем, а действием опасных природных процессов и явлений пренебрегается [2, 3]. Применительно к водохранилищам, расположенным на территории Республики Беларусь, актуальной задачей является оценка вероятности возникновения гидродинамических аварий на основе максимально полного учета природных и техногенных факторов риска, технического состояния и территориального расположения объектов, которая позволит разработать долгосрочные и краткосрочные прогнозы для условий искусственных водоемов, расположенных в каскадах.

**Основная часть.** Вероятность возникновения аварийных ситуаций на искусственных водных объектах рассматривается как одна из составляющих риска. Структурная схема оценки риска приведена на рис. 1, из которой видно, что для расчета этой величины требуется проведение натурных наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений напорного фронта, а также лабораторных.

**Сценарий 1** – перелив воды через гребень плотины. Такое развитие событий возможно вследствие нарушения эксплуатации водосброс-

ных сооружений, а также вследствие возникновения «сверхрасчетного паводка». Нарушение режима эксплуатации водосбросных сооружений происходит в результате их естественного старения, что, в свою очередь, приводит к заклиниванию, механическому повреждению затворов и выходу их из работоспособного состояния [4].

Так называемый «сверхрасчетный паводок» возможен при одновременном возникновении таких опасных природных процессов и явлений, как очень сильный дождь, сильный ветер, интенсивное снеготаяние. Причиной перелива воды через гребень плотины при каскадном расположении водоемов может быть также аварийный сброс воды либо разрушение вышележащего гидроузла.

**Сценарий 2** – образование прорана в теле плотины. Данный сценарий возможен при очередном либо одновременном ледовом воздействии на напорные верховые откосы, протекании на них процессов абразии, вследствие колебания уровня воды, а также волнового воздействия. Кроме того, причинами прорана могут являться фильтрационные деформации сооружений (суффозионный вынос грунта из основания и тела плотины) [4].

Как отмечается в работе Векслера А. Б., Ивашинцова Д. А., Стефанишина Д. В. [6], среди достоинств построения и изучения сценариев возникновения аварий и нарушений при анализе надежности и безопасности гидротехнических сооружений могут быть отмечены следующие.

1. В основе разработки и изучения сценариев возникновения аварий лежит системный анализ причин и следствий, в рамках которого наиболее полно выявляются все закономерности развития событий в системе. Системный анализ позволяет проследить цепочки событий, состояний и процессов.

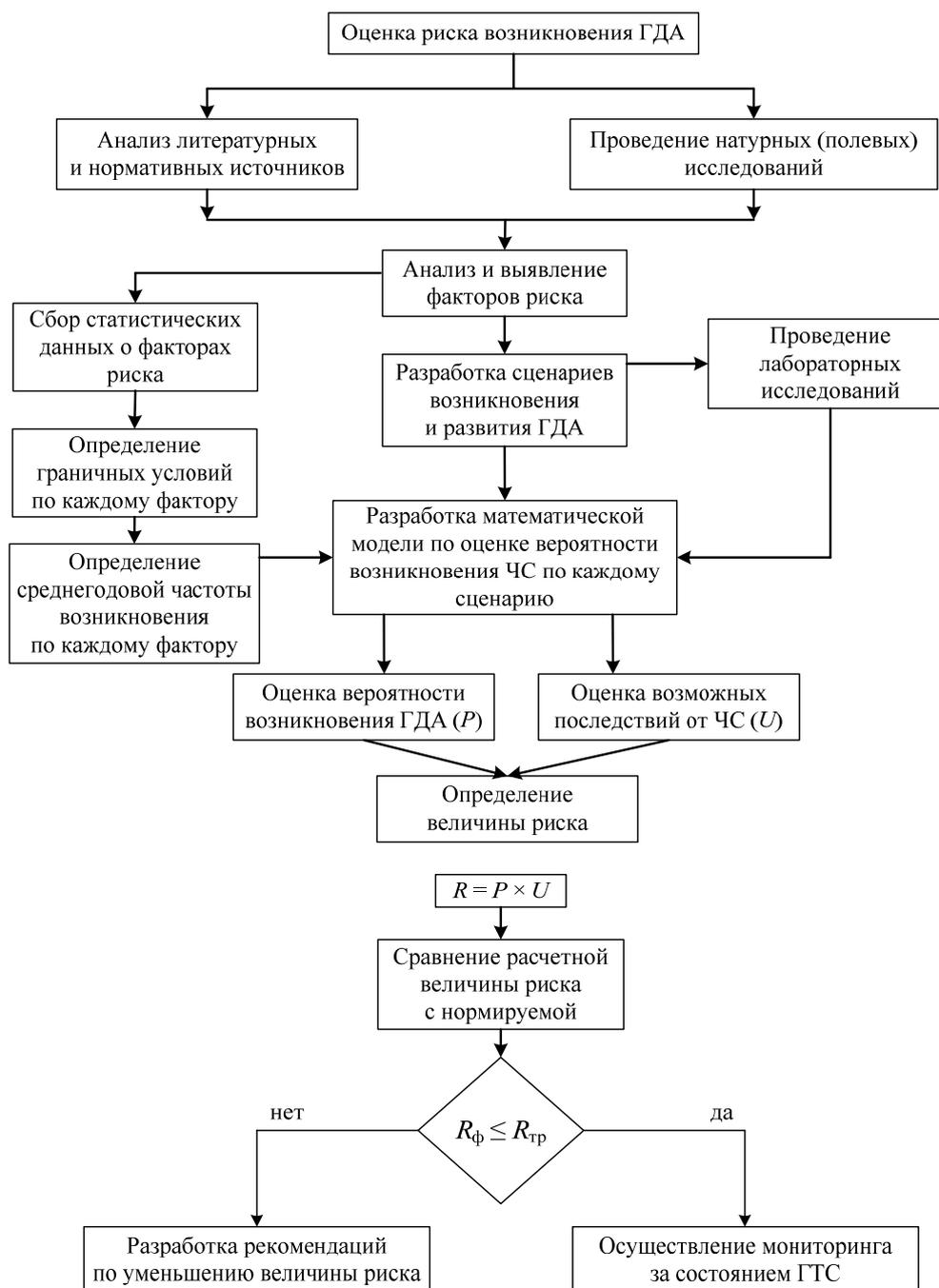


Рис. 1. Структурная схема оценки риска возникновения гидродинамической аварии (ГДА)

2. При построении сценариев возникновения аварий на объектах можно проследить причинно-следственные отношения между уже состоявшимися на момент анализа и возможными событиями и состояниями. В процессе описаний вероятных аварий можно существенно облегчить понимание задач оценки и обеспечения надежности и безопасности гидротехнических сооружений, способствовать разработке решений по недопущению опасных ситуаций и смягчению последствий их реализации.

3. При рассмотрении сценариев возникновения аварий и нарушений можно учесть как

естественные причины их реализации, так и субъективные, связанные с деятельностью человека. Анализ одновременно могут подлежать экстраординарные и расчетные события, состояния, вызываемые различными эксплуатационными отказами и нарушениями.

4. Сценарии возникновения аварий и нарушений являются наиболее общими моделями, при помощи которых можно осуществить как качественный, так и количественный анализ причин аварий и нарушений на конкретном гидротехническом сооружении. Возможность такого анализа определяется наличием и

полнотой требуемой исходной информации по действующим факторам, определяющим надежность и безопасность гидротехнических сооружений.

Реализация каждого сценария рассматривается как независимое событие. Все события, инициирующие возникновение гидродинамических аварий, связываются посредством построения дерева отказов. В вершине дерева располагается непосредственно аварийное событие (либо возникновение одного из сценариев), а ветви образуют исходные события (факторы риска), по которым получены значения среднегодовых частот [5]. По мнению ряда исследователей [6, 7], применение данных моделей для описания эстафетного (в нашем случае каскадного) механизма развития аварийных ситуаций наиболее полно отражает причинно-следственные связи между исходными событиями.

Сущность данной модели заключается в том, что вначале создается графологическая схема, называемая деревом отказов, которая представляет собой совокупность причинно-следственных связей, объединяющих суть явления и последовательность событий в нем. На завершающем этапе разработанная схема подвергается качественному и количественному анализу с разработкой математической модели по ее решению.

В вершине дерева отказов располагается непосредственно аварийное событие (либо один из сценариев), а ветви образуют исходные события

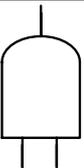
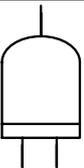
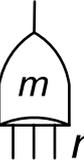
(факторы риска), по которым имеются значения вероятностей или среднегодовых частот.

На рис. 2 представлена укрупненная схема возникновения гидродинамической аварии в результате реализации двух вышеприведенных сценариев. Отдельной ветвью на этой схеме вынесены события, возникающие вследствие действия человеческого фактора, поскольку они происходят на всех этапах существования искусственных водных объектов. Подробное описание каждой ветви дерева отказов, приведенного на рис. 2, показано на рис. 3–5.

Все аварийные события были заключены в виде отдельных блоков, между которыми с помощью логических знаков устанавливались причинно-следственные связи. В соответствии с [6] построение логических схем осуществлялось таким образом, чтобы каждый логический знак при неограниченном числе входов имел только один выход (пример на рис. 2). Характеристика и условные обозначения логических знаков, используемых для построения дерева отказов, приведены в таблице.

Непосредственно аварийное событие (гидродинамическая авария) заключено в прямоугольный блок, который означает, что данное событие возникает в результате появления более элементарных отказов. Отказы ввиду их изученности и наличия достаточных статистических данных рассматривались как исходные события и были помещены внизу в круглые блоки (рис. 3, 4).

Условные обозначения и характеристика логических знаков

Условное обозначение	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
	И	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
	ИЛИ	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий
	ПРИОРИТЕТНОЕ И	Выходное событие происходит, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо
	« $m$ из $n$ » (выборка)	Выходное событие происходит, если случается $m$ из $n$ входных событий

Отказы, связанные с человеческим фактором, детально не разработаны, поэтому данные события были помещены в блоки в виде ромба (рис. 5).

Вероятности возникновения событий принимались по опубликованным нормативным и литературным источникам [2, 5, 8, 9].

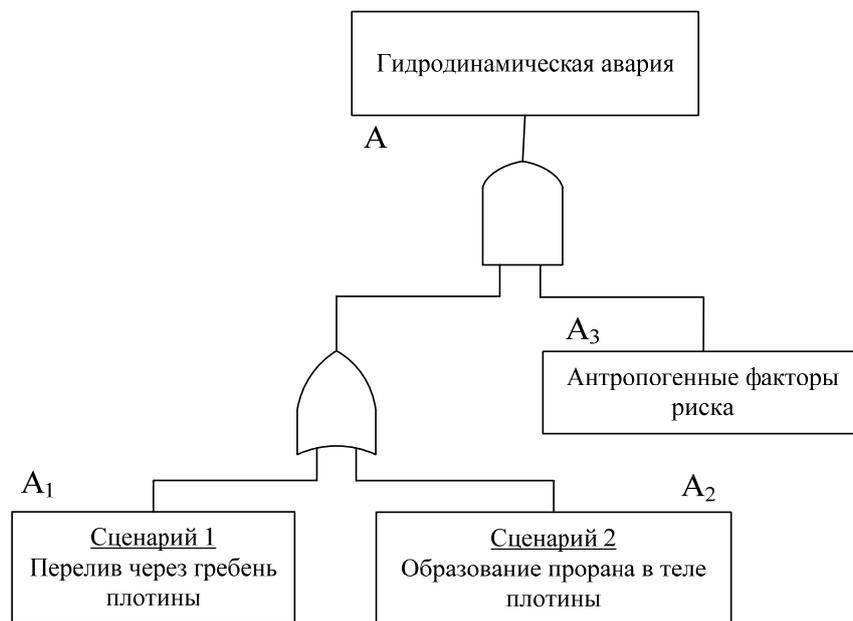


Рис. 2. Укрупненная схема дерева отказов для оценки вероятности возникновения гидродинамической аварии

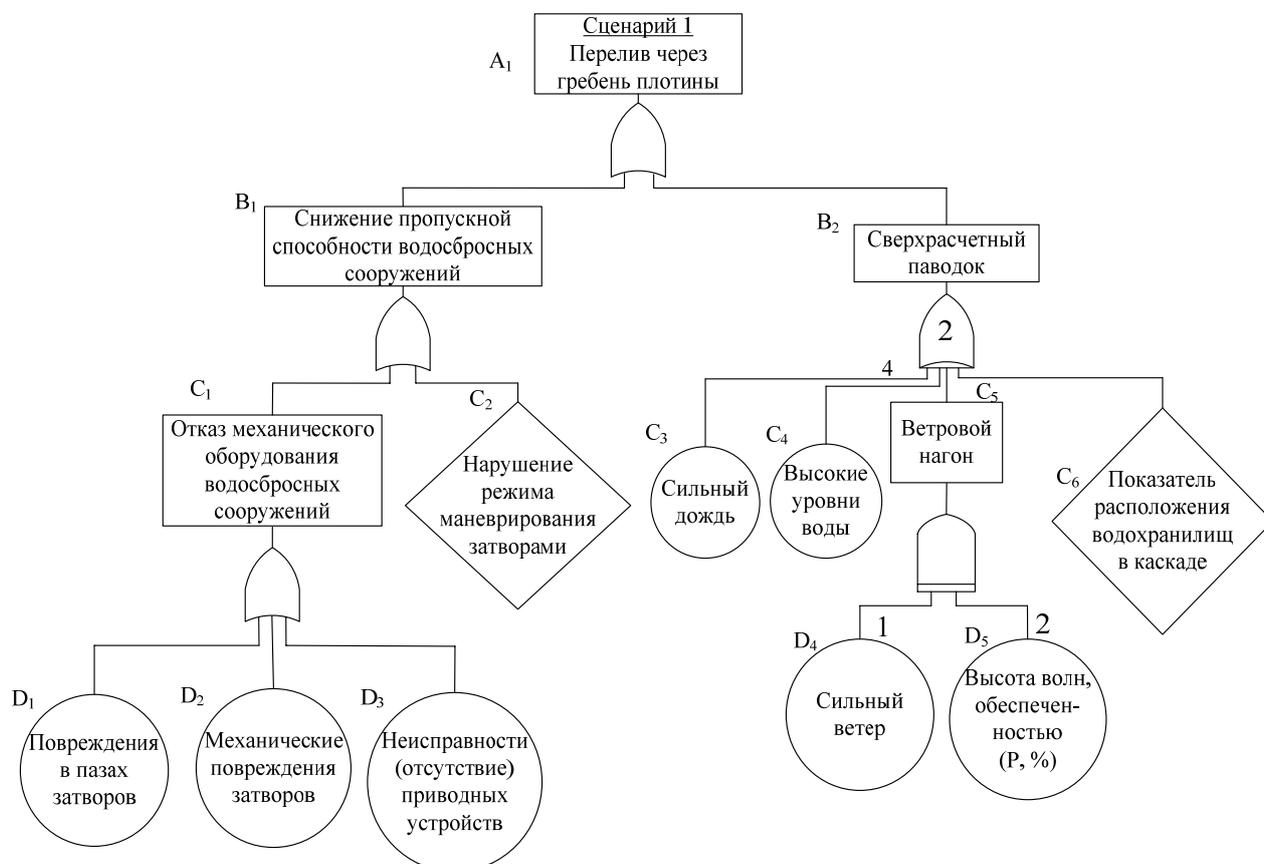


Рис. 3. Схема дерева отказов для оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий по сценарию 1

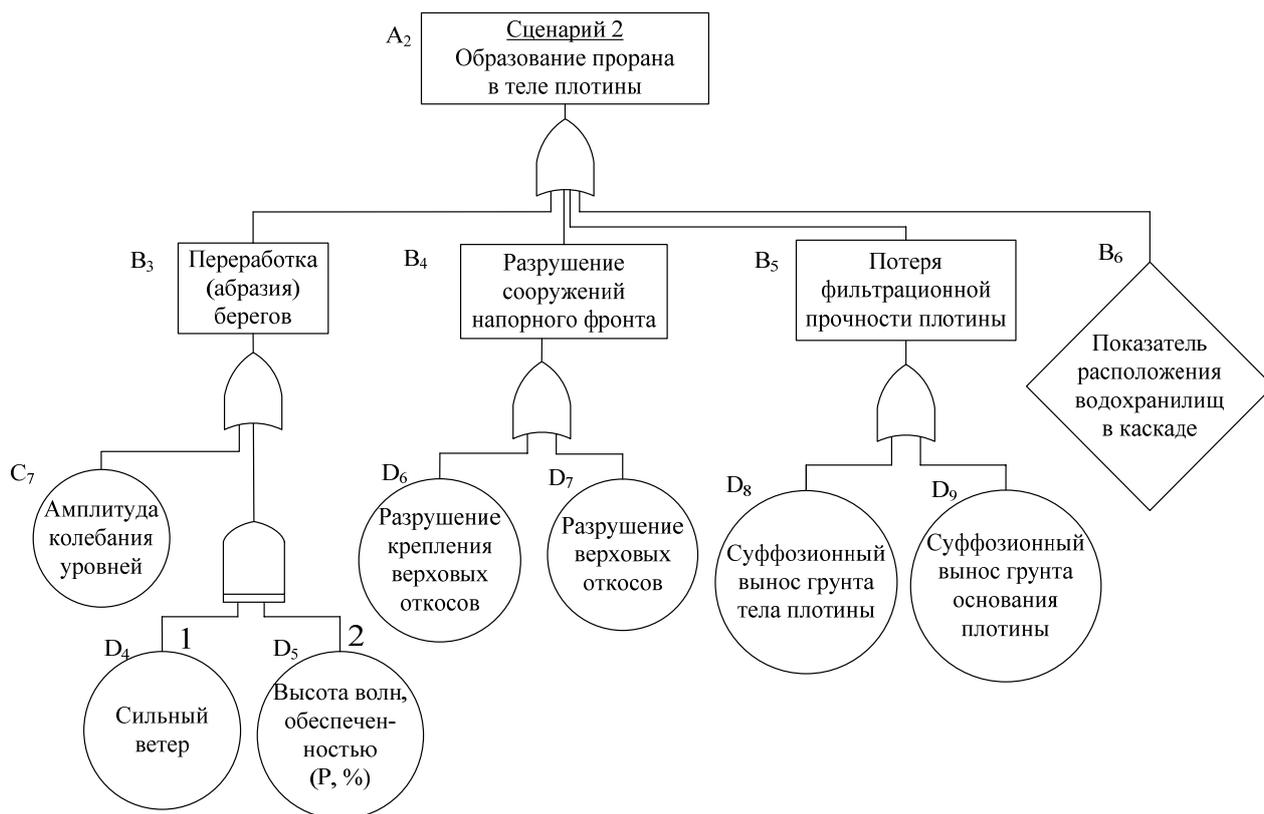


Рис. 4. Схема дерева отказов для оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий по сценарию 2

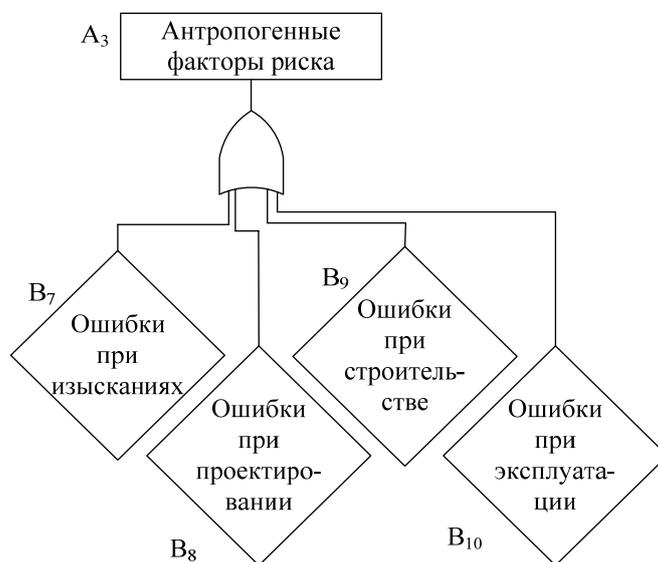


Рис. 5. Схема дерева отказов, учитывающая антропогенные факторы риска

Решение дерева отказов выполнялось на основании модели возникновения аварии и теоремы умножения и сложения вероятностей. В результате решения представленного на рис. 1 дерева отказов определялась вероятность возникновения каждого сценария и гидродинамической аварии в целом.

Определение вероятности возникновения аварии по сценарию 1 (дерево отказов на рис. 2) осуществляется по формуле

$$P(A1) = P(B1) + P(B2) - P(B1B2), \quad (1)$$

где  $P(B1)$  – вероятность снижения пропускной способности водосбросных сооружений;  $P(B2)$  –

вероятность возникновения «сверхрасчетного (катастрофического) паводка», определяемая по формуле

$$P(B1) = P(C1) + P(C2) - P(C1C2), \quad (2)$$

где  $P(C1)$  – вероятность отказа механического оборудования водосбросных устройств;  $P(C2)$  – вероятность нарушения режима маневрирования затворами, определяемая по формуле

$$P(C2) = P(D1) + P(D2) + P(D3) - P(D1D2) - P(D1D3) - P(D2D3) + P(D1D2D3), \quad (3)$$

где  $P(D1)$  – вероятность возникновения повреждений в пазах затворов;  $P(D2)$  – вероятность механического повреждения затворов;  $P(D3)$  – вероятность неисправности (отсутствия) приводных устройств.

В соответствии с формулой (1) результирующее событие ( $A1$ ) имеет логический знак «ИЛИ», т. е. оно наступает, если имеет место одно из исходных событий  $B1$  или  $B2$ .

Согласно представленному на рис. 2 дереву отказов, исходные события ( $C3 - C6$ ) связаны с событием ( $B2$ ) логическим знаком выборки « $m$  из  $n$ » (два события из четырех). Следовательно, для того чтобы произошло событие ( $B2$ ), одновременно должно произойти не меньше двух событий из данной выборки. В соответствии с [5] путем преобразований логического знака выборки « $m$  из  $n$ » с помощью эквивалентов логических знаков «И» и «ИЛИ» для события ( $B2$ ) получаем вид дерева отказов, представленный на рис. 6.

На основании приведенного на рис. 6 дерева отказов вероятность возникновения события  $P(B2)$  рассчитывается по формуле:

$$P(B2) = P(C3C4) + P(C3C5) + P(C3C6) + P(C4C5) + P(C4C6) + P(C5C6), \quad (4)$$

где  $P(C3)$  – вероятность возникновения сильного дождя;  $P(C4)$  – вероятность возникновения высоких уровней воды;  $P(C5)$  – вероятность образования ветрового нагона вследствие последовательного возникновения сильного ветра ( $D4$ ) и высоты волны обеспеченностью  $P\%$  ( $D5$ ), определяемая по формуле (7);  $P(C6)$  – критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов, принимаемый для сценария перелива воды через гребень плотины.

Обоснование, подробное описание и расчет данного критерия приведен в работе [9].

Для водохранилищ, расположенных в каскаде, формула (4) преобразуется в выражение

$$P(B2) = P(C3C6) + P(C4C6) + P(C5C6) - P(C3C6C4C6) - P(C3C6C5C6) + P(C3C6C4C6C5C6). \quad (5)$$

Для водохранилищ, расположенных обособленно, формула (4) преобразуется в выражение

$$P(B2) = P(C3C4) + P(C3C5) + P(C4C5) - P(C3C4C3C5) - P(C3C4C4C5) + P(C3C4C3C5C4C5), \quad (6)$$

где  $P(C5)$  – вероятность возникновения ветрового нагона, определяемая по следующей формуле:

$$P(C5) = P(D4) \cdot P(D5|D4), \quad (7)$$

где  $P(D4)$  – вероятность возникновения сильного ветра;  $P(D5|D4)$  – условная вероятность образования волн высокой обеспеченности при возникновении сильного ветра, т. е. наступление события  $D5$  возможно только при наступлении события  $D4$ .

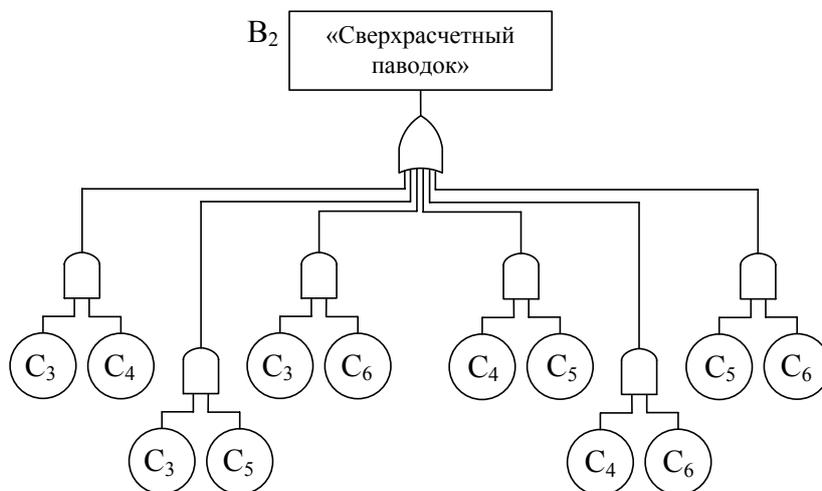


Рис. 6. Схема дерева отказов для расчета вероятности возникновения «сверхрасчетного паводка»  $P(B2)$

Определение вероятности возникновения аварии по сценарию 2 (рис. 4) осуществляется по формуле

$$P(A_2) = P(B_3) + P(B_4) + P(B_5) + P(B_6) - P(B_3B_4) - P(B_3B_5) - P(B_3B_6) - P(B_4B_5) - P(B_4B_6) - P(B_5B_6) + P(B_3B_4B_5) + P(B_3B_4B_6) + P(B_3B_4B_5B_6), \quad (8)$$

где  $P(B_3)$  – вероятность возникновения процесса переработки (абразии) верховых откосов земляных подпорных сооружений;  $P(B_4)$  – вероятность разрушения сооружений напорного фронта;  $P(B_5)$  – вероятность потери фильтрационной прочности плотины;  $P(B_6)$  – вероятность возникновения гидродинамических аварий, учитывающая каскадное расположение гидроузлов (критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов) при образовании прорана в теле земляной плотины.

Вероятность возникновения процесса переработки (абразии) напорных верховых откосов  $P(B_3)$  учитывает колебание уровней воды в водохранилище, а также совместное ветровое и волновое воздействия и определяется по формуле

$$P(B_3) = P(C_7) + P(D_4|D_5) - P(C_7D_4|D_5), \quad (9)$$

где  $P(C_7)$  – вероятность (обеспеченность) амплитуды колебания уровней; 1/год;

Вероятность разрушения сооружений напорного фронта  $P(B_4)$  определяется по формуле

$$P(B_4) = P(D_6) + P(D_7) - P(D_6D_7), \quad (10)$$

где  $P(D_6)$  – вероятность разрушения крепления верховых откосов;  $P(D_7)$  – вероятность разрушения верховых откосов;

Вероятность потери фильтрационной прочности плотины ( $B_5$ ) возможна вследствие суффозионного выноса грунта основания и тела плотины будет определяться по формуле

$$P(B_5) = P(D_8) + P(D_9) - P(D_8D_9), \quad (11)$$

где  $P(D_8)$  – вероятность суффозионного выноса грунта из тела плотины;  $P(D_9)$  – вероятность суффозионного выноса грунта из основания плотины.

Учет ошибок вследствие наличия «человеческого фактора» производился по формуле

$$P(A_3) = P(B_7) + P(B_8) + P(B_9) + P(B_{10}) - P(B_7B_8) - P(B_7B_9) - P(B_7B_{10}) - P(B_8B_9) - P(B_8B_{10}) - P(B_9B_{10}) + P(B_7B_8B_9) + P(B_7B_8B_{10}) + P(B_7B_8B_9B_{10}), \quad (12)$$

где  $P(B_7) = 9,0 \cdot 10^{-4}$  – вероятность возникновения гидродинамических аварий вследствие ошибок при проведении изысканий;  $P(B_8) = 5,0 \cdot 10^{-3}$  – вероятность возникновения гидродинамических аварий вследствие ошибок при проектировании;  $P(B_9) = 9,0 \cdot 10^{-4}$  – вероятность возникновения гидродинамических аварий вследствие ошибок при строительстве;  $P(B_{10}) = 3,5 \cdot 10^{-3}$  – вероятность возникновения гидродинамических аварий вследствие ошибок при эксплуатации.

Вероятности возникновения каждого фактора ( $B_7$ – $B_{10}$ ) принимались на основании опубликованных литературных источников [2, 5].

Таким образом, полная вероятность возникновения гидродинамической аварии (событие  $A$ ) определялась по следующей формуле:

$$P(A) = \{[P(B_1) + P(B_2) - P(B_1B_2)] + [P(B_3) + P(B_4) + P(B_5) + P(B_6) - P(B_3B_4) - P(B_3B_5) - P(B_3B_6) - P(B_4B_5) - P(B_4B_6) - P(B_5B_6) + P(B_3B_4B_5) + P(B_3B_4B_6) + P(B_4B_5B_6) + P(B_3B_4B_5B_6)]\} \times [P(B_7) + P(B_8) + P(B_9) + P(B_{10}) - P(B_7B_8) - P(B_7B_9) - P(B_7B_{10}) - P(B_8B_9) - P(B_8B_{10}) - P(B_9B_{10}) + P(B_7B_8B_9) + P(B_7B_8B_{10}) + P(B_8B_9B_{10}) + P(B_7B_8B_9B_{10})]. \quad (13)$$

С учетом того, что произведение вероятности двух и более исходных событий является очень малой величиной ( $10^{-12} - 10^{-6}$ ), в сравнении со значением их суммы ( $10^{-4} - 10^{-3}$ ), формулу (13) можно упростить до следующего вида:

$$P(A) = \{[P(B_1) + P(B_2)] + [P(B_3) + P(B_4) + P(B_5) + P(B_6)]\} \cdot [P(B_7) + P(B_8) + P(B_9) + P(B_{10})] = [P(A_1) + P(A_2)] \cdot P(A_3). \quad (14)$$

К тому же значения, полученные по формуле (14), будут всегда больше значений, полученных по формуле (13), следовательно, использование данной формулы не приведет к снижению вероятности возникновения события ( $A$ ).

**Заключение.** Разработана методика оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий, которая учитывает одиночное и каскадное расположение искусственных водных объектов, различные сценарии их возникновения, а также действие природных, техногенных и антропогенных факторов риска на напорные гидротехнические сооружения. Разработанная математическая модель может быть использована при прогнозировании, а также для оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на искусственных водных объектах.

Разработанная методика оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий в даль-

нейшем будет уточнена в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка методик, алгоритмов и программных средств для оценки ущербов от чрезвычайных ситуаций на водных объектах Республики Беларусь различного типа» Государственной программы научных исследований «Научное обеспечение повышения эффективности работы государственных органов по укреплению обороноспособности и безопасности Республики Беларусь, уровня национальной безопасности и защищенности населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Дальнейшие научные исследования позволяют обобщить и проанализировать данные об эксплуатации водохранилищ в Республике Беларусь в сочетании с имитационным моделированием и моделированием волны прорыва; оценки технического состояния сооружений напорного фронта и воздействия на них ледовых торосов, а также учета заиления.

### Литература

1. Широков, В. М. Водохранилища Беларуси: справочник / В. М. Широков, В. А. Пидоплечко. – Минск: Універсітэцкае, 1992. – 80 с.
2. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений: СТП ВНИИГ 230.2.001–00. – СПб.: Всерос. науч.-исслед. ин-т им. Б. Е. Ведеева, 2000. – 87 с.
3. Беллендир, Е. Н. Основные сценарии возникновения и развития аварий и чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях и подход к количественной оценке ущерба для

расчета страховых сумм / Е. Н. Беллендир, С. В. Сольский, Н. Я. Никитина // О независимой аудиторской и оценочной деятельности в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, страхование ответственности за причинение вреда в случае аварии на опасном промышленном объекте: материалы семинара МЧС России, Москва, 23–24 июля 1998 г. – М., 1998. – С. 134–142.

4. Малик, Л. К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений / Л. К. Малик // Проблема безопасности. – М.: Наука, 2005. – 354 с.

5. Хенли, Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.

6. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие / М. И. Фалеев [и др.]; под общ. ред. М. И. Фалеева. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.

7. Гришин, А. М. Моделирование и прогноз катастроф: в 2 ч. / А. М. Гришин. – Томск: Том. ун-т, 2003. – Ч. 1. – 524 с.

8. Fell, R. Methods for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping – piping through the embankment: univ report R-428 / R. Fell, Ch. Wan, M. Foster; University of new South Wales. – Sydney 2052, Australia, 2004. – 71 с.

9. Левкевич, В. Е. Анализ экспериментальных данных по моделированию уровенного режима каскадов водохранилищ при возникновении аварийных ситуаций / В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов // Вестник Командно-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – № 2 (12). – С. 14–25.

*Поступила 06.03.2011*