



УДК 621.313.32

СТЕФАНИШИН Д.В., докт. техн. наук, пров. н. с.

ІТГІП НАН України, м. Київ, проф. каф. гідротехнічного будівництва НУВГП, м. Рівне

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ НА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ "САЯНО-ШУШЕНСКАЯ ГЭС – МАЙНСКАЯ ГЭС"

*Приводятся результаты оценки вероятности гидродинамической аварии на гидроэнергетическом комплексе "Саяно-Шушенская ГЭС – Майнская ГЭС", выполненной при декларирувании безопасности напорных гидросооружений Саяно-Шушенской ГЭС в 2010 г.*

Учитывая интерес [1, 2] к урокам аварии, которая произошла 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС (С-Ш ГЭС), в настоящей статье предлагаются к обсуждению результаты, полученные нами в 2010 г. при расчетах вероятности гидродинамической аварии (ГДА) на гидроэнергетическом комплексе (ГЭК) "Саяно-Шушенская ГЭС – Майнская ГЭС" (МГЭС).

Целью расчетов было установление вероятностей модельных сценариев ГДА, утвержденных в качестве рабочих на Техническом совещании, состоявшемся в ОАО "Ленгидропроект" в ноябре 2009 г., для подготовки Декларации безопасности гидросооружений Саяно-Шушенской ГЭС на период временной эксплуатации берегового водосброса и восстановленных гидроагрегатов ГЭС с 01.06.10 по 01.10.11 гг.

В частности, при расчетах вероятности ГДА на гидросооружениях Саяно-Шушенской ГЭС учитывались четыре сценария, утвержденных Техническим совещанием:

$A_1$  – при прохождении землетрясения происходит перераспределение и нарастание напряжений в теле и левобережном склоне примыкания плотины. Склон приходит в состояние предельного равновесия. Происходит потеря устойчивости 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.

$A_2$  – повреждение конструкций водобойного колодца во время пропуска половодья при сбросе через эксплуатационный водосброс расхода 5000 м<sup>3</sup>/с и неполной готовности берегового водосброса (I очередь). Возможное переполнение водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС выше форсированного подпорного уровня (ФПУ) с угрозой прочности и устойчивости арочно-гравитационной плотины.

$A_1$  – повреждение и выход из строя гидроагрегата из-за разгерметизации проточной части. Поступление воды в машинный зал и его затопление.

$A_4$  – разрушение устоя водоприемника берегового водосброса вследствие необратимой деформации основания. Излив воды в нижний бьеф через один туннель.

При оценке вероятности ГДА на гидросооружениях Майнской ГЭС учитывались два модельных сценария, утвержденных Техническим совещанием:

$A_5$  – переполнение водохранилища МГЭС из-за отказа механического оборудования сегментных затворов при пропуске поверочного максимального расхода, регулируемого СШГЭС, вероятностью превышения 0,01 % с разрушением грунтовых плотин. Неконтролируемое опорожнение водохранилища с образованием волны прорыва.

$A_6$  – повышение фильтрационных расходов в теле грунтовых плотин с суффозионным выносом материалов. Развитие фильтрации с образованием прорана. Неконтролируемое опорожнение водохранилища с образованием волны прорыва.

Вероятностные расчеты проводились методом деревьев отказов и неисправностей [3, 4]. Этот метод позволил осуществить логическое интегрирование вероятностей по отдельным сценариям и оценить обобщенную вероятность ГДА на ГЭК. Фрагменты разработанного нами дерева отказов и неисправностей приводятся на Рис. 1–9.

На представленных диаграммах (Рис. 1–9) различными символами изображаются:

- пятиугольником – практически достоверное событие, вероятностью равной единице;
- ромбами – сложные события и состояния, подлежащие дальнейшему анализу;
- окружностями – некоторые исходные (базовые) события и состояния, способные инициировать ту или иную аварийную ситуацию; вероятности возникновения этих событий и состояний задавались до расчета дерева отказов и неисправностей;
- закругленными прямоугольниками – условия, при реализации которых ожидается дальней-



Таблица 1. Логические операторы и оценка вероятностей событий—следствий методом деревьев отказов и неисправностей

Наименование логического оператора	Формула для расчета вероятности результирующего события при известных вероятностях исходных событий и условий
"ИЛИ"	$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(B_i)), \quad (1)$
"И"	$P(A) = \prod_{i=1}^n P(B_i), \quad (2)$
"исключительное ИЛИ"	$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i), \quad (3)$
"Блокировка"	$P(A) = P(B) \cdot P(C), \quad (4)$
"Частичная блокировка"	$P(A) = P(B_1) \cdot P(C) + P(B_2) \cdot (1 - P(C)), \quad (5)$

В формулах (1)-(5) вероятности:  $P(B_i)$  – исходного  $i$ -го события  $B$ ;  $P(C)$  – условия  $C$ ;  
 $P(A)$  – результирующего события  $A$ .

шее развитие аварийной ситуации;

- прямоугольниками – следствия – различного рода результирующие события и состояния, вероятности которых рассчитывались в зависимости от действия соответствующих логических операторов (Табл. 1).

Во всех случаях для базовых аварийных событий и состояний, связанных с потерей прочности и устойчивости гидросооружений, отказами механического и гидроэнергетического оборудования, действиями персонала, а также событий—условий, при которых аварийные ситуации спо-

собны получить дальнейшее развитие вплоть до ГДА, принимались гранично-допускаемые нормами или предельно-достижимые верхние значения вероятностей их реализации [3, 5–7]. Таким образом, по полученным результатам, которые приводятся на диаграммах дерева отказов и неисправностей (Рис. 1–9), можно судить о некоторых гранично-допускаемых (достижимых верхних оценках) вероятностей результирующих событий и состояний, включая как отдельные сценарии аварии, так и ГДА на ГЭК в целом.

Результаты расчетов, включая промежуточ-

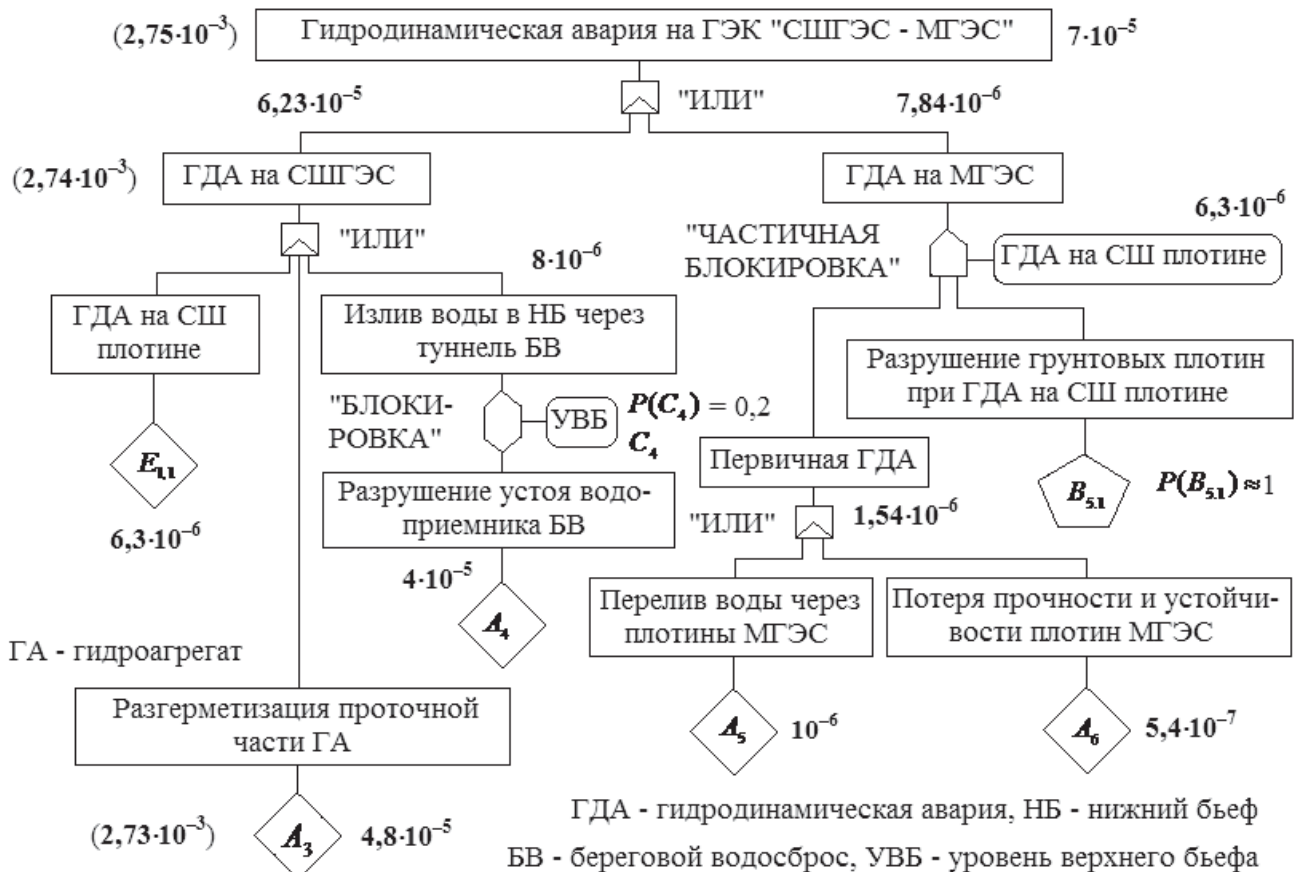


Рис. 1. Головные события и состояния диаграммы дерева отказов и неисправностей (в скобках приводятся результаты расчета вероятности ГДА на ГЭК для ситуации, сложившейся на 17.08.2009 г.)

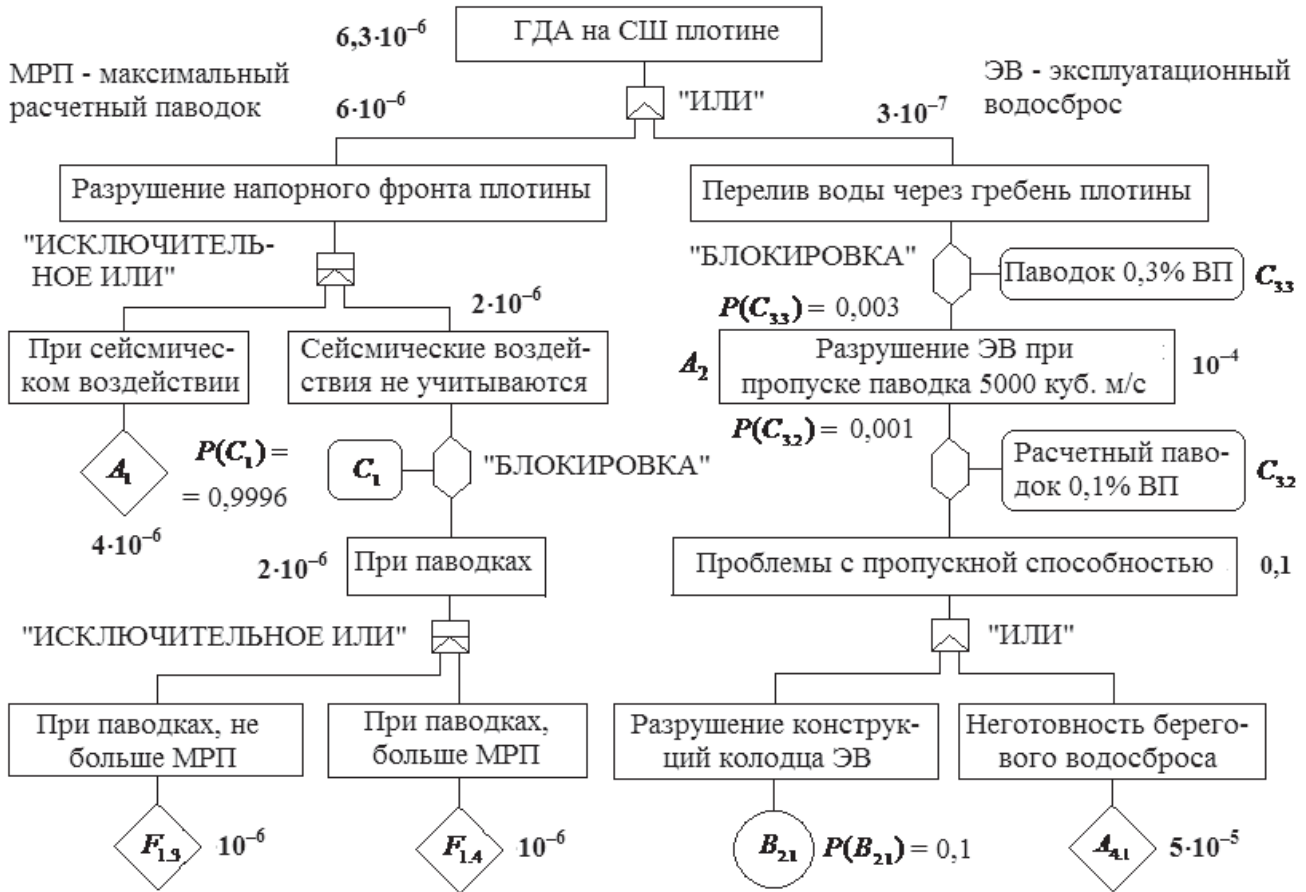


Рис. 2. Расчет вероятности возникновения гидродинамической аварии на Саяно-Шушенской плотине

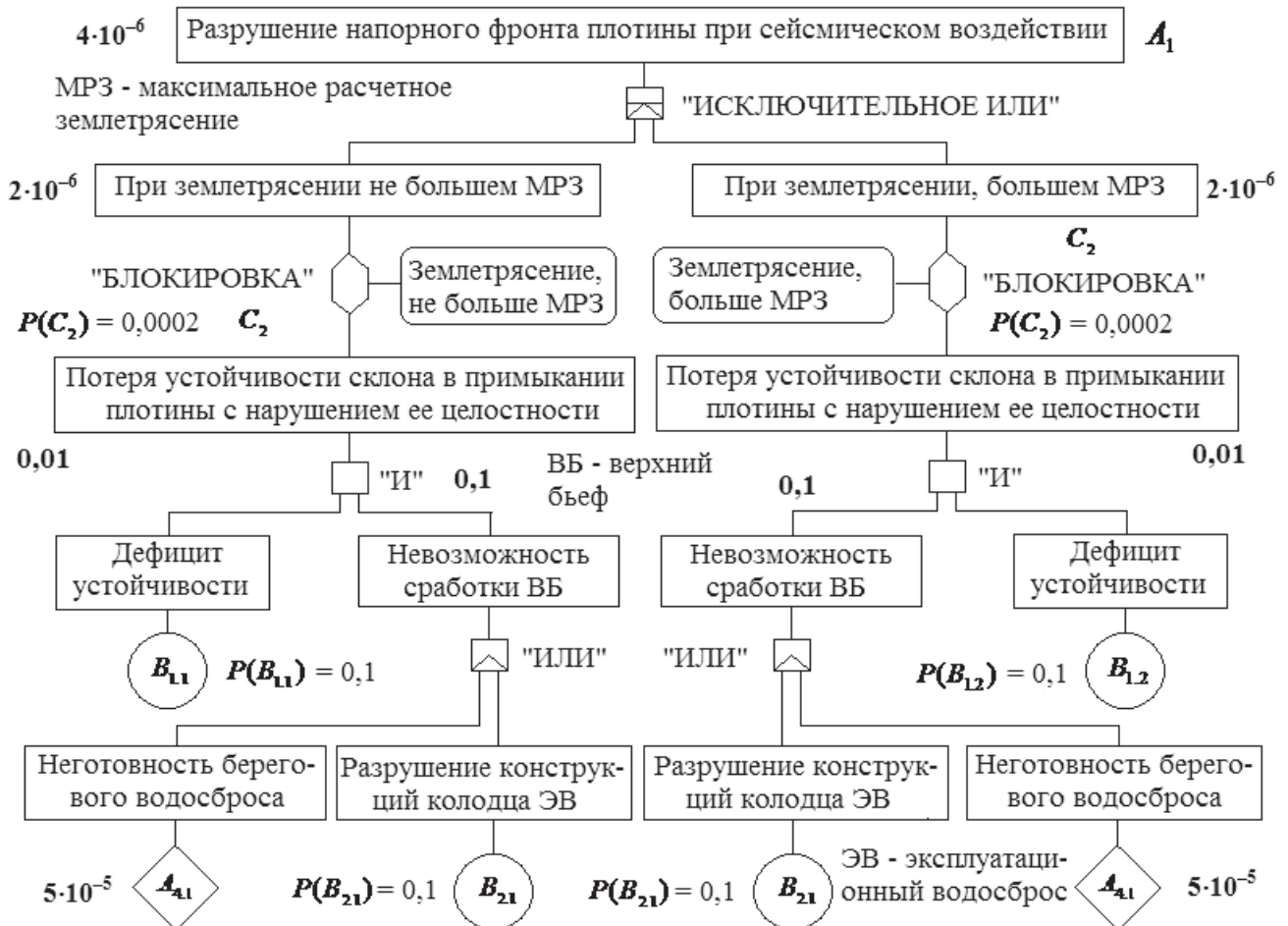
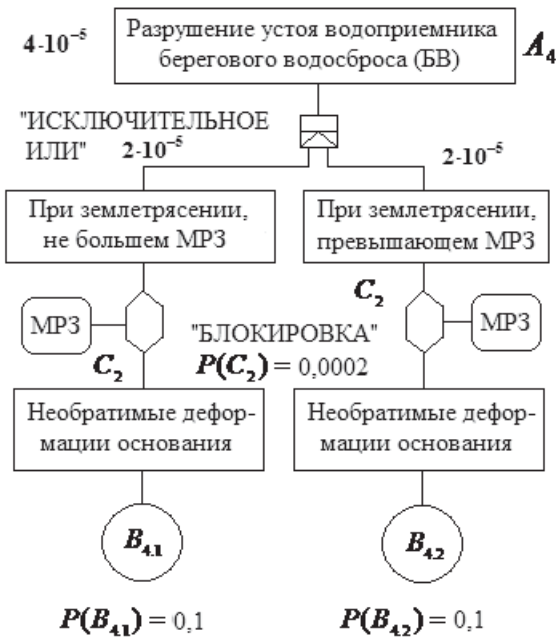


Рис. 3. Расчет вероятности разрушения напорного фронта Саяно-Шушенской плотины при сейсмических воздействиях (сценарий A1)





MRZ - максимальное расчетное землетрясение  
 Рис. 6. Расчет вероятности разрушения устоя водоприемника берегового водосброса Саяно-Шушенского гидроузла (сценарий  $A_4$ )

ные, демонстрируются на диаграммах дерева отказов и неисправностей. Были получены две оценки гранично-допускаемой вероятности ГДА на ГЭК: 1) на момент аварии 17.08.2009 г. ( $2,75 \cdot 10^{-3}$ , год<sup>-1</sup>); 2) с учетом модернизации гидроагрегатов и системы управления их безопасностью ( $7 \cdot 10^{-5}$ , год<sup>-1</sup>).

По результатам расчетов можно сделать несколько замечаний.

Оказалось, что основной вклад в полную вероятность ГДА на ГЭК вносит сценарий – "Повреждение и выход из строя гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС из-за разгерметизации проточной части. Поступление воды в машинный зал

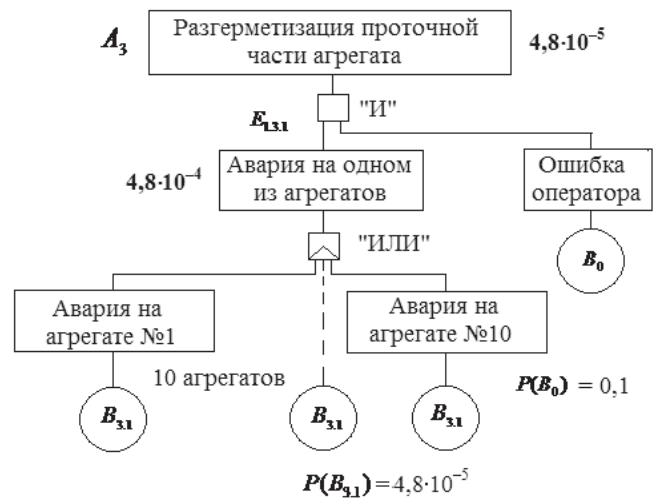


Рис. 7. Расчет вероятности разгерметизации проточной части гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС (сценарий  $A_3$ )

и его затопление". Вклад этого сценария в полную вероятность ГДА на ГЭК до аварии 17.08.2009 г. составила больше 99%; на период с 01.06.10 по 01.10.11 гг. – более 69%.

В целом, расчетная вероятность ГДА на Саяно-Шушенском гидроузле до аварии 17.08.2009 г. оказалась в 350 раз выше, чем на Майнском гидроузле; на период с 01.06.10 по 01.10.11 гг. – в 8 раз.

Следует отметить, что, несмотря на то, что значения вероятностей исходных (базовых) событий, связанных с потерей прочности и устойчивости Саяно-Шушенской плотины, принимались предельными, вероятность возникновения ГДА собственно на плотине ( $6,3 \cdot 10^{-6}$ , год<sup>-1</sup>) оказалась на порядок ниже допустимого значения вероятности аварии на гидросооружениях I класса ( $5 \cdot 10^{-5}$ , год<sup>-1</sup>), установленной российскими нормами [8].

Однако вероятность ГДА на плотине Сая-



Рис. 8. Расчет вероятности перелива воды через грунтовые плотины Майнской ГЭС (сценарий  $A_5$ )

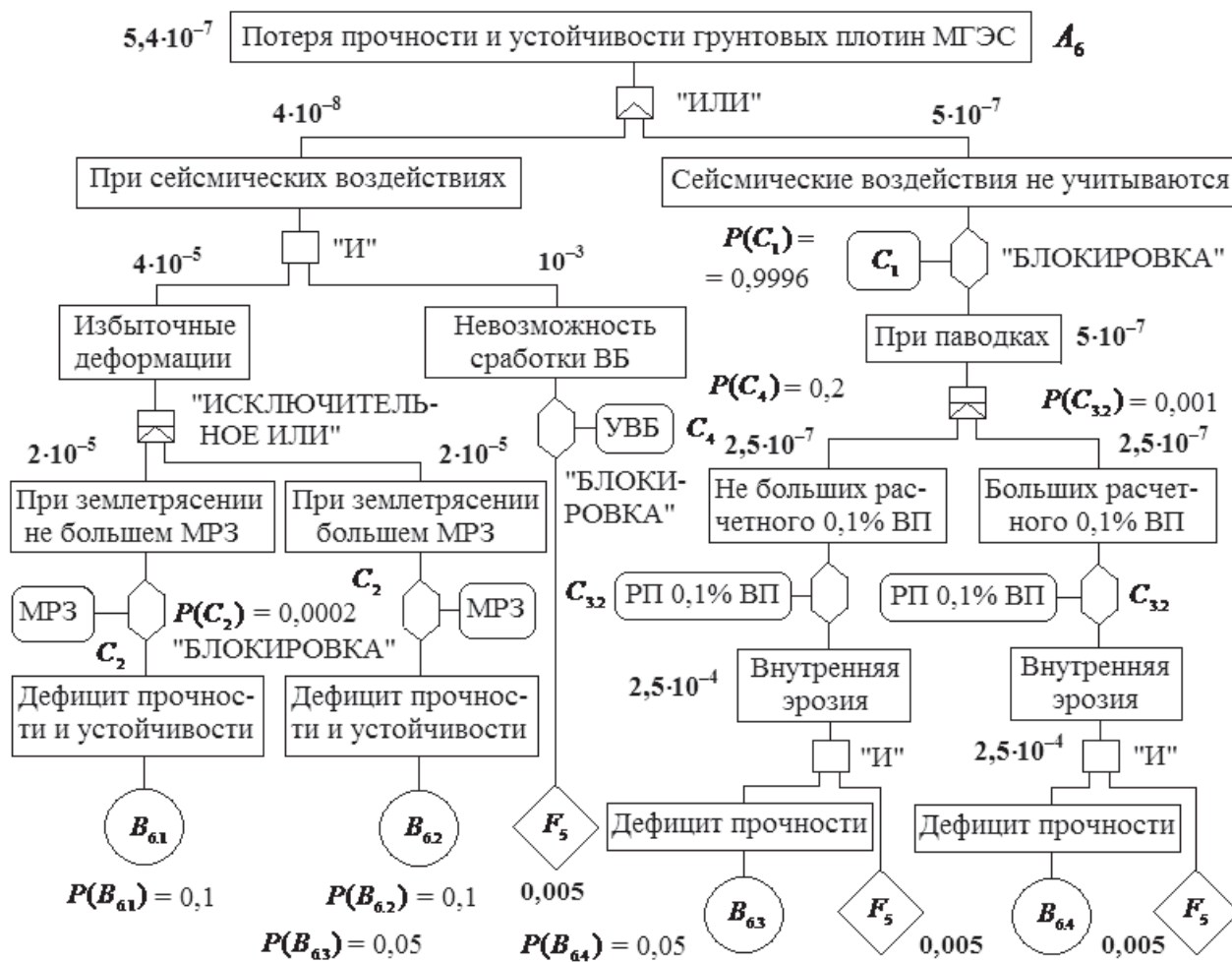


Рис. 9. Расчет вероятности потери прочности и устойчивости грунтовых плотин Майнской ГЭС (сценарий  $A_6$ )

но-Шушенской ГЭС превышает вероятность первичной ГДА на Майнском гидроузле ( $1,54 \cdot 10^{-6}$ , год<sup>-1</sup>), полученной без учета влияния аварийных событий на Саяно-Шушенском гидроузле.

Вероятность  $2,73 \cdot 10^{-3}$ , год<sup>-1</sup> (средний период повторения аварийного события больше 360 лет), еще не свидетельствует о том, что авария 17.08.2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС была неизбежна. Но то, что вероятность этой аварии составила по расчетам 99% от вероятности ГДА на ГЭК в целом, заставляет задуматься о том, какие вопросы на Саяно-Шушенском гидроузле нужно было решать в первую очередь, чтобы авария не произошла.

Практика показывает, что решающее значение при возникновении техногенных аварий, так или иначе, имеет человеческий фактор – невнимательность, игнорирование опасности, непрофессионализм и пр. Авария на Саяно-Шушенской ГЭС, которая случилась 17 августа 2009 г., не является исключением из этого правила, что подтвердили результаты проведенных нами вероятностных расчетов.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Мищенко Б.И. Причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, вытекающие из анализа Акта технического расследования // Гідроенергетика України. – 2010. – № 3. – С. 25–31.

2. Иванов В.Н. Уроки аварии, произошедшей 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС // Гідроенергетика України, – 2010. – № 4. – С. 48–50.

3. Векслер А.Б., Ивашищев 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.

4. Стефанишин Д.В. Дослідження надійності гідравлічних систем зі складною мережевою структурою методом дерев відмов // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 2(30). Рівне: НУВГП. – 2005. – С.75–82.

5. Стефанишин Д.В. Про оцінку ймовірностей аварій на річкових гідропорудах в результаті екстремальних явищ, пов'язаних з повеннями // Екологічна безпека та природоохористування. Зб. наук. праць. Вип. 4. Київ: КНУБА, ІТГП НАНУ. – 2009. – С. 28–48.

6. Стефанишин Д.В. Методика оцінки ймовірностей аварій на гідропорудах на основі рандомізації результатів розрахунків споруд за методом граничних станів // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наукових праць. Вип. 34. Рівне: НУВГП. – 2009. – С. 109–115.

7. Стефанишин Д.В., Романчук Е.Г. Вероятностное моделирование гипотетических сценариев двух нетиповых аварий на гидроэнергетических объектах при отказах автоматики: [Электронный документ] // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2011. (<http://pamag.ru/pressa/vmgs-heo>).

8. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. – М.: Госстрой России, 2004. – 24 с.