

УДК 519.2:[627.8.059.22]

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АВАРИЙ ПРИ КАСКАДНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Левкевич В.Е.* , к.т.н., доцент, Пастухов С.М.* , Мильман В.А.** , к.ф.-м.н.

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

**Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
e-mail: plamennyj98@gmail.com

Представлена методика оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий на искусственных водных объектах Республики Беларусь, разработанная на основании метода построения деревьев отказов. Методика учитывает воздействие природных, техногенных и антропогенных факторов риска на искусственные водные объекты, а также обособленное и каскадное расположение водохранилищ. Проведен расчет вероятности возникновения гидродинамических аварий для Свислочского каскада. Разработанная 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 the Republic of Belarus has been presented. It has been developed on the basis of the fault-tree analysis method. The methodology considers natural and anthropogenic risk factors effects on the artificial water objects; the tandem and isolated reservoirs arrangement has been considered as well. The probability calculation results for hydrodynamic disaster of Svisloch tandem reservoir system have been presented. The developed methodology can be applied for hydrodynamic disaster probability assessment as well as for short-term and long-term prognoses.

(Поступила в редакцию 18 января 2011 г.)

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 Беларусь и имеющих продолжительный срок эксплуатации, вызывает необходимость разработки методики оценки риска возникновения на них гидродинамических аварий с целью оценки и повышения уровня безопасности на каждом этапе их существования.

Начавшийся в конце XX столетия (в Трондхейме, Норвегия) процесс разработки согласованного на международном уровне подхода к анализу и оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях показал, что в дальнейшем его развитии заключен потенциал существенного улучшения безопасности плотин [2]. Одним из наиболее важных показателей, входящих в понятие «риск», является вероятность возникновения аварийных событий. Оценка этого показателя представляет собой сложную задачу, поскольку «напрямую» рассчитать вероятность возникновения гидродинамических аварий не представляется возможным ввиду отсутствия достаточного количества статистических данных.

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 зачастую пренебрегают [2, 3]. Применительно к водохранилищам, расположенным на территории Республики Беларусь, актуальной задачей является оценка вероятности возникновения гидродинамических аварий на основе максимально полного учета природных, техногенных и антропогенных факторов

риска, технического состояния и территориального расположения объектов, которая позволит разработать долгосрочные и краткосрочные прогнозы для условий искусственных водоемов, расположенных в каскадах.

ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

Возникновение гидродинамических аварий нами рассматривалось с точки зрения возможной реализации двух сценариев: перелив воды через гребень плотины и образование прорана в теле плотины. Обоснование расчетных сценариев и их подробное описание приведено в работе [4]. Каждый сценарий возникновения гидродинамических аварий рассматривался как независимое событие.

Для оценки вероятности использовалась логико-вероятностная модель, которая впервые была предложена Э. Хенли и Х. Кумамото в работе [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. 1 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. 1, показано на рис. 2–4.

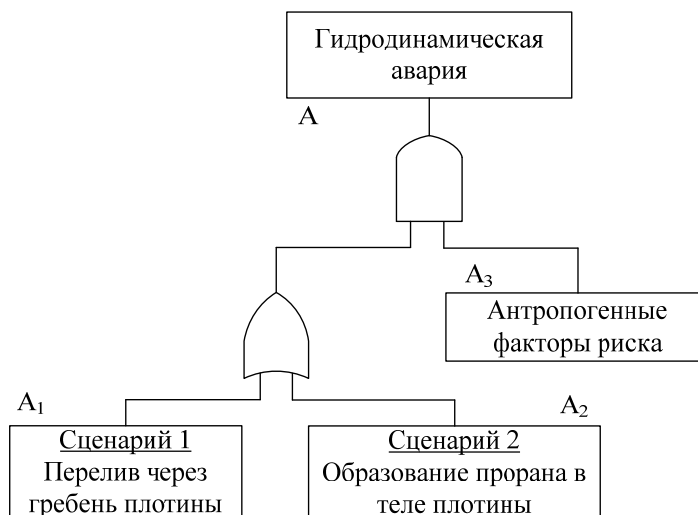


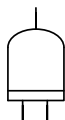



Рисунок 1 – Укрупненная схема дерева отказов для оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий

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 логи-

ческий знак при неограниченном числе входов имел только один выход (см. рис. 1). Характеристика и условные обозначения логических знаков, используемых для построения дерева отказов, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика и условные обозначения 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
	« <i>m</i> из <i>n</i> » (выборка)	Выходное событие происходит, если случается <i>m</i> из <i>n</i> входных событий

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. 2, 3).

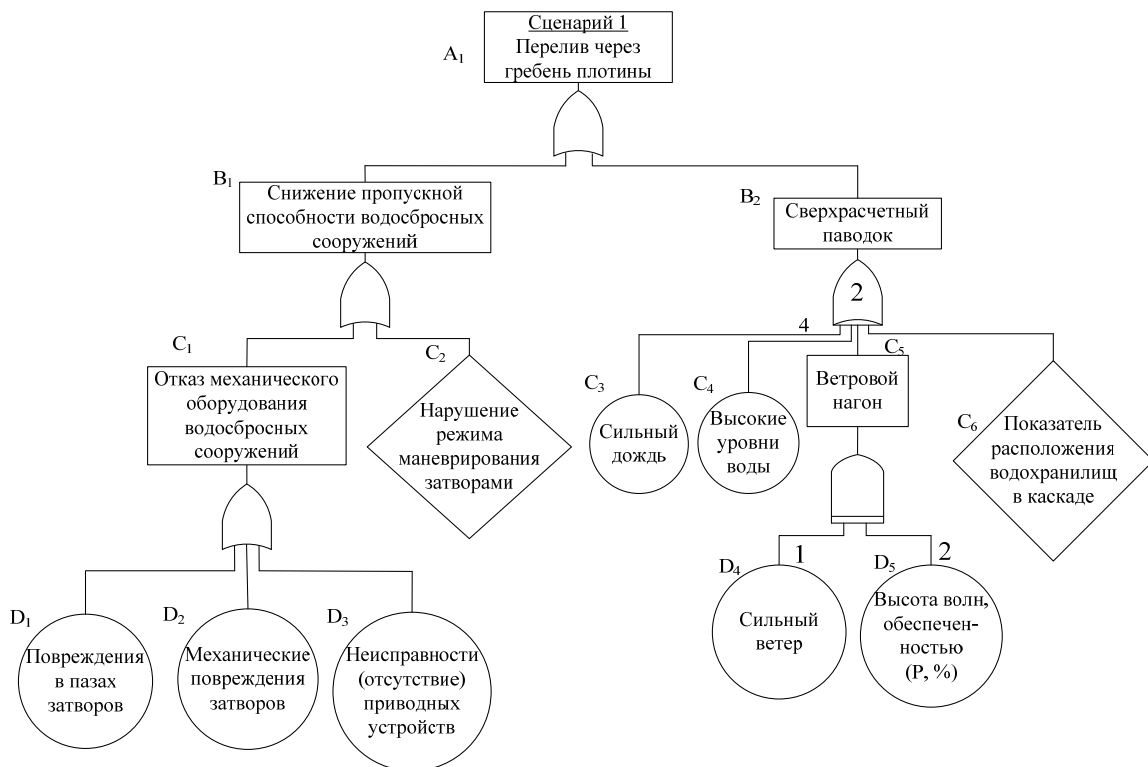


Рисунок 2 – Схема дерева отказов для оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий по сценарию 1

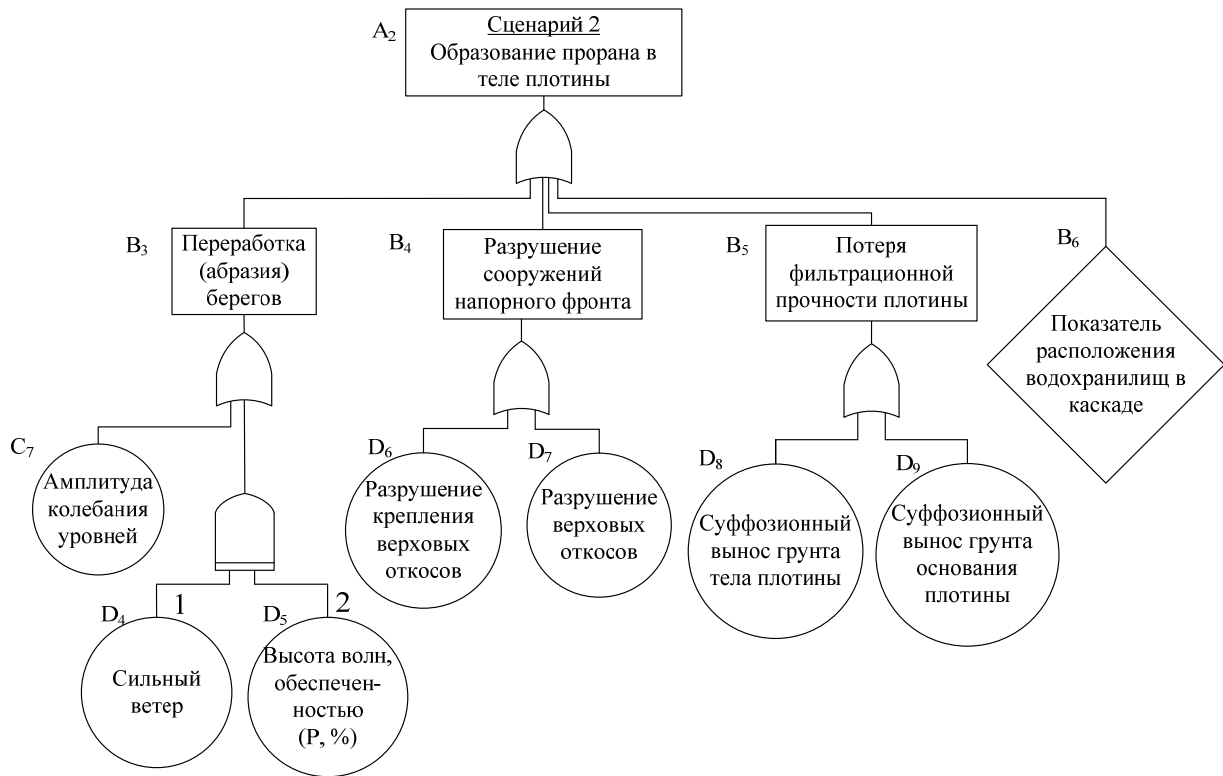


Рисунок 3 – Схема дерева отказов для оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий по сценарию 2

Отказы, связанные с человеческим фактором, детально не разработаны, поэтому данные события были помещены в блоки в виде ромба (рис. 4). Вероятности возникновения данных событий принимались по опубликованным нормативным и литературным источникам [2, 5, 8].

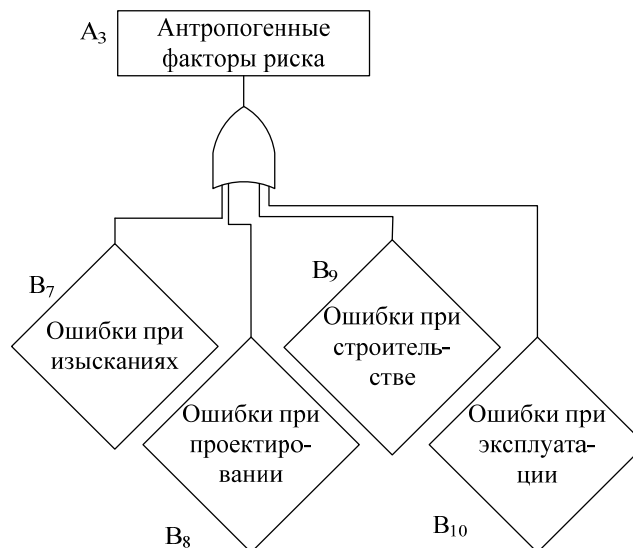


Рисунок 4 – Схема дерева отказов, учитывающая антропогенные факторы риска

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 следующей формуле:

$$P(A_1) = P(B_1) + P(B_2) - P(B_1B_2), \quad (1)$$

где $P(B_1)$ – вероятность снижения пропускной способности водосбросных сооружений;

$P(B_2)$ – вероятность возникновения сверхрасчетного (катастрофического) паводка, определяемая по следующей формуле:

$$P(B_1) = P(C_1) + P(C_2) - P(C_1C_2), \quad (2)$$

где $P(C_1)$ – вероятность отказа механического оборудования водосбросных устройств;

$P(C_2)$ – вероятность нарушения режима маневрирования затворами, определяемая по следующей формуле:

$$P(C_2) = P(D_1) + P(D_2) + P(D_3) - P(D_1D_2) - P(D_1D_3) - P(D_2D_3) + P(D_1D_2D_3), \quad (3)$$

где $P(D_1)$ – вероятность возникновения повреждений в пазах затворов;

$P(D_2)$ – вероятность механического повреждения затворов;

$P(D_3)$ – вероятность неисправности (отсутствия) приводных устройств.

В соответствии с формулой (1) результирующее событие (A_1) имеет логический знак «ИЛИ», т. е. оно наступает, если имеет место одно из исходных событий B_1 или B_2 .

Согласно представленному на рис. 2 дереву отказов, исходные события (C_3 – C_6) связаны с событием (B_2) логическим знаком выборки « m из n » (2 события из 4). Следовательно, для того, чтобы произошло событие (B_2), 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 (B_2) получаем следующий вид дерева отказов, представленный на рис. 5.

На основании приведенного на рис. 5 дерева отказов вероятность возникновения события $P(B_2)$ рассчитывается по следующей формуле:

$$P(B_2) = P(C_3C_4) + P(C_3C_5) + P(C_3C_6) + P(C_4C_5) + P(C_4C_6) + P(C_5C_6), \quad (4)$$

где $P(C_3)$ – вероятность возникновения сильного дождя;

$P(C_4)$ – вероятность возникновения высоких уровней воды;

$P(C_5)$ – вероятность образования ветрового нагона вследствие последовательного возникновения сильного ветра (D_4) и высоты волны обеспеченностью P , % (D_5), определяемая по формуле (7);

$P(C_6)$ – критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов, принимаемый для сценария перелива воды через гребень плотины. Обоснование, подробное описание и расчет данного критерия приведены в работе [9].

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

$$P(B_2) = P(C_3C_6) + P(C_4C_6) + P(C_5C_6) - P(C_3C_6C_4C_6) - P(C_3C_6C_5C_6) + P(C_3C_6C_4C_6C_5C_6). \quad (5)$$

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

$$P(B_2) = P(C_3C_4) + P(C_3C_5) + P(C_4C_5) - P(C_3C_4C_3C_5) - P(C_3C_4C_4C_5) + P(C_3C_4C_3C_5C_4C_5), \quad (6)$$

где $P(C_5)$ – вероятность возникновения ветрового нагона, определяемая по следующей формуле:

$$P(C_5) = P(D_4) \cdot P(D_5|D_4), \quad (7)$$

где $P(D_4)$ – вероятность возникновения сильного ветра;

$P(D_5|D_4)$ – условная вероятность образования волн высокой обеспеченности, при возникновении сильного ветра, т. е. наступление события (D_5) возможно только при наступлении события (D_4).

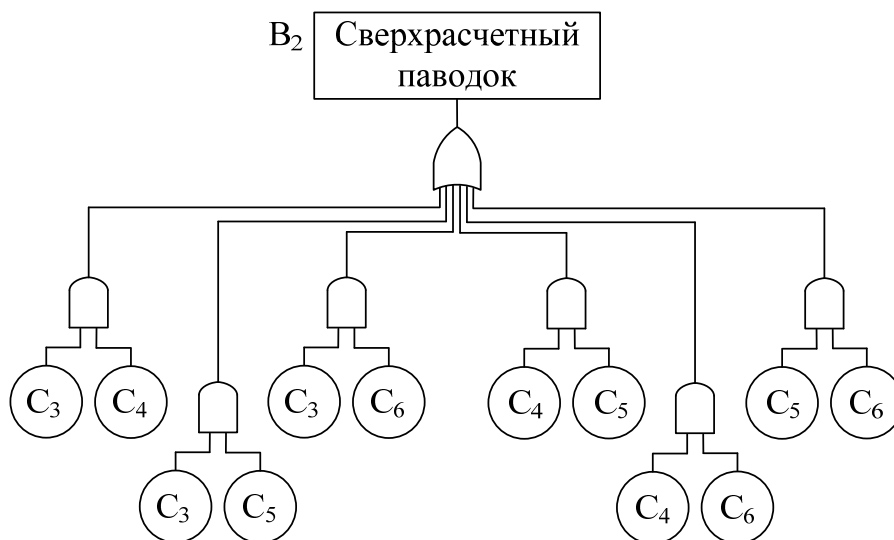


Рисунок 5 – Схема дерева отказов для расчета вероятности возникновения сверхрасчетного паводка $P(B_2)$

Определение вероятности возникновения аварии по сценарию 2 (см. схему на рис. 3) осуществляется по формуле:

$$P(A_2) = P(B_3) + P(B_4) + P(B_5) + P(B_6) - P(B_3B_4) - P(B_3B_5) - P(B_3B_6) - P(B_4B_5) - P(B_4B_6) - P(B_5B_6) + P(B_3B_4B_5) + P(B_3B_4B_6) + P(B_4B_5B_6) + P(B_3B_4B_5B_6), \quad (8)$$

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:

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

где $P(C_7)$ – вероятность (обеспеченность) амплитуды колебания уровней.

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

Потеря фильтрационной прочности плотины возможна вследствие суффозионного выноса грунта основания и тела плотины, следовательно, вероятность возникновения события (B_5) будет определяться по следующей 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.

Вероятность возникновения событий D_8 и D_9 рассчитывалась по методике, изложенной в работах [2, с. 41–53; 8], в соответствии с которой устанавливалась категория грунтовой плотины и определялись коэффициенты риска, характеризующие вероятность отказа грунтовой плотины или дамбы соответственно в результате нарушения устойчивости откосов сооружений (F_{SS}), нарушения фильтрационной прочности грунтов тела сооружения (F_{EE}) и основания (F_{FE}). Вероятность отказа грунтовой плотины за время ее эксплуатации определялась по графикам связи коэффициентов риска с вероятностью отказа (рис. 6).

Учет ошибок вследствие наличия «человеческого фактора» производился по формуле

$$P(A_3) = P(B_7) + P(B_8) + P(B_9) + P(B_{10}) - P(B_7B_8) - P(B_7B_9) - P(B_7B_{10}) - P(B_8B_9) - P(B_8B_{10}) - P(B_9B_{10}) + P(B_7B_8B_9) + P(B_7B_8B_{10}) + P(B_8B_9B_{10}) + P(B_7B_8B_9B_{10}), \quad (12)$$

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:

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

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}), то формулу (13) можно упростить до следующего вида:

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

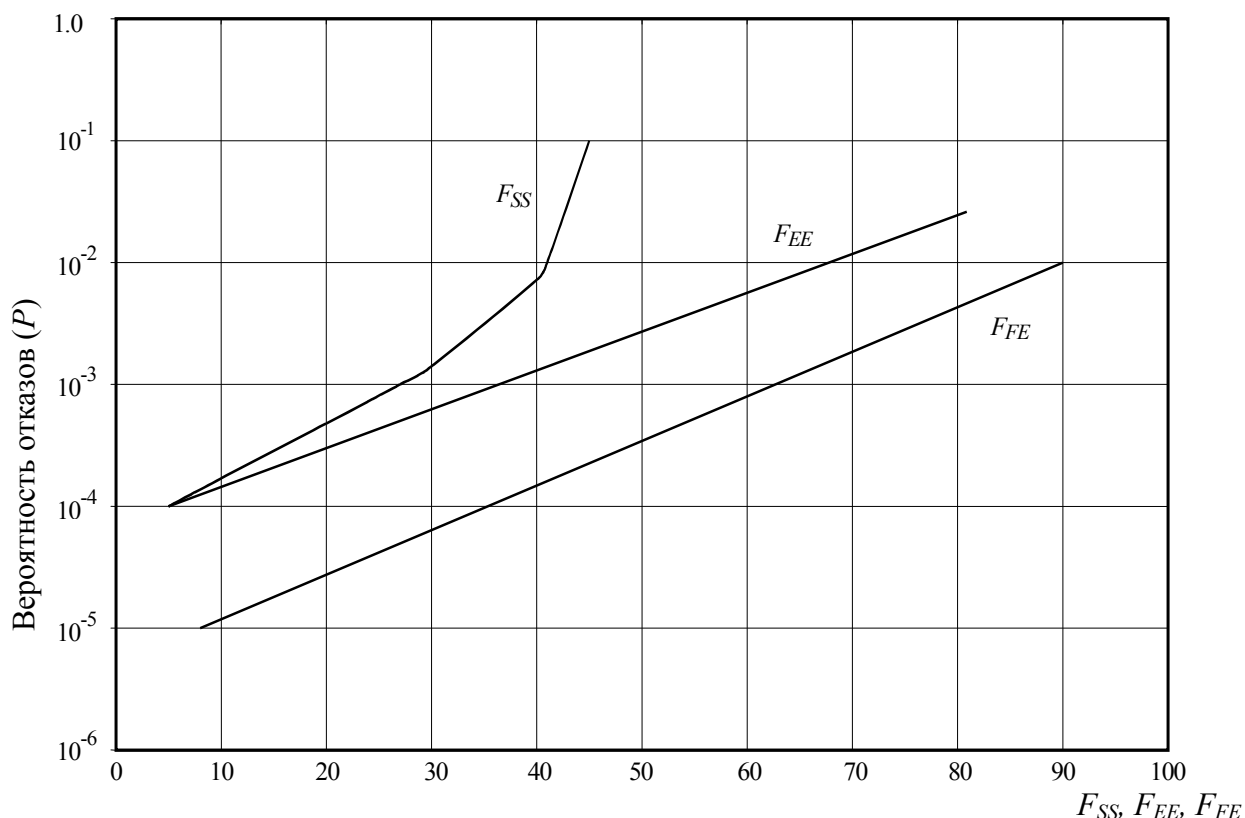


Рисунок 6 – Зависимость вероятности отказов грунтовых плотин и дамб от коэффициентов риска

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*.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчета вероятности возникновения факторов риска для Свислочского каскада водохранилищ, входящего в состав Вилейско-Минской водной системы (ВМВС). В состав данного каскада входят 10 водоемов, общий объем которых составляет 145 млн м³. Все водохранилища (за исключением водохранилища Головное), входящие в каскад, относятся к русловому типу.

Таблица 2 – Расчетные значения вероятности возникновения факторов риска для Свислочского каскада водохранилищ

Наименование элемента дерева отказов	Условное обозначение	Вероятность возникновения факторов риска
1	2	3
Влияние человеческого фактора	A_3	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Снижение пропускной способности водосбросных сооружений	B_1	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Сверхрасчетный (катастрофический) паводок	B_2	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Переработка (абразия) напорных незащищенных верховых откосов	B_3	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Разрушение сооружений напорного фронта	B_4	$4,3 \cdot 10^{-5}$

Окончание табл. 2

1	2	3
Потеря фильтрационной прочности плотины	B_5	$6,0 \cdot 10^{-5}$
Критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов при реализации сценария 1	B_6	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Ошибки при изысканиях	B_7	$9,0 \cdot 10^{-4}$
Ошибки при проектировании	B_8	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Ошибки при строительстве	B_9	$9,0 \cdot 10^{-4}$
Ошибки при эксплуатации	B_{10}	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Отказ механического оборудования водосбросных сооружений	C_1	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Нарушение режима маневрирования затворами	C_2	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Сильный дождь	C_3	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Высокие уровни воды	C_4	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Ветровой нагон	C_5	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов при реализации сценария 2	C_6	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Амплитуда колебания уровней	C_7	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Повреждения в пазах затворов	D_1	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Механические повреждения затворов	D_2	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Неисправности (отсутствие) приводных устройств	D_3	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Сильный ветер	D_4	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Высота волн, обеспеченностью (P, %)	D_5	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Разрушение креплений верховых откосов	D_6	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Разрушение верховых откосов	D_7	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Суффозионный вынос грунта тела плотины	D_8	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Суффозионный вынос грунта основания плотины	D_9	$3,7 \cdot 10^{-5}$

Результаты расчета вероятности возникновения каждого сценария (события A_1 и A_2) и непосредственно гидродинамической аварии (событие A) на Свислочском каскаде ВМВС приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчета вероятности возникновения гидродинамических аварий на Свислочском каскаде водохранилищ ВМВС

Наименование элемента дерева отказов	Условное обозначение	Значение вероятности
Вероятность возникновения гидродинамической аварии	A	$4,0 \cdot 10^{-5}$
<u>Сценарий 1</u> : перелив воды через гребень плотины	A_1	$2,0 \cdot 10^{-3}$
<u>Сценарий 2</u> : образование прорана в теле плотины	A_2	$2,0 \cdot 10^{-3}$

Полученные значения вероятности возникновения гидродинамической аварии для тестового каскада водохранилищ не превышают предельно допустимых в соответствии с данными [10].

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 разработке прогнозов, а также для оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на искусственных водных объектах.

На основании вышеприведенной методики был разработан программный комплекс по оценке вероятности возникновения гидродинамических аварий. Данный программный комплекс позволяет производить расчет не только вероятности возникновения гидродинамических аварий по каждому сценарию, но и основных физических параметров аварийных событий природного и техногенного характера: длину разгона и высоту ветровых волн различной обеспеченности с учетом преобладающего направления ветрового воздействия относительно ориентации напорного фронта искусственных водных объектов; длину кривой подпора при установившемся неравномерном плавно изменяющемся движении водного потока и других.

ЛИТЕРАТУРА

1. Широков, В.М. Водоохранилища Беларуси : справочник / В.М. Широков, В.А. Пидоплечко. – Минск : Университетское, 1992. – 80 с.
2. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений : СТП ВНИИГ 230.2.001–00. – СПб. : Всерос. науч.-иссл. 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 июл. 1998 г. – М., 1998. – С. 134–142.
4. Пастухов, С.М. Методика лабораторных исследований уровня режима водохранилищ, расположенных в каскадах / С.М. Пастухов // Вестник Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – № 12 (2). – С. 4–13.
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 / А.М. Гришин. – Ч. 1 – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003 – 524 с.
8. Fell, R. Methods for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping – piping through the embankment / R. Fell, Ch. Wan, M. Foster. – Univ report R-428, University of New South Wales Sydney 2052, Australia, 2004. – 71 p.
9. Левкевич, В.Е. Анализ экспериментальных данных по моделированию уровня режима каскадов водохранилищ при возникновении аварийных ситуаций / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Вестник Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – № 2 (12). – С.14–25.
10. О безопасности гидротехнических сооружений электрических станций : технический регламент Рос. Федерации 3 июн. 2010 г., № 385728-5 : [Электронный ресурс]. – М., 2010.