ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ГТС С УЧЕТОМ РИСКА АВАРИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

ЗАО «Научно-технологический и проктный экспертный центр №Помтехэкстперт», г.Белгород

Аксенов С.Г.
Доктор технических наук, профессор

Стефанишин Д.В.
Доктор технических наук

Финагенов О.М.
Доктор технических наук

Хомов А.Н.
Инженер

Существующая проблема эффективного вложения финансовых средств в превентивные мероприятия для предотвращения ущерба, связанного с разрушением гидротехнических сооружений, может быть решена при принятии оптимальных решений о проведении мероприятий по обеспечению безопасности ГТС, рациональных с точки зрения эффективности и надежности на основе теории риска, включая экономическую составляющую.

Принимать решения о выполнении необходимых мероприятий на ГТС обязательно на начальном этапе, изучив всю имеющуюся информацию о гидросооружении, другими словами, имея его комплексную оценку.

Принимать обоснованные экономические решения поможет **методика принятия решений о проведении мероприятий по обеспечению безопасности ГТС, рациональных с точки зрения эффективности и надежности**, разработанная ОАО «ГИДРОУЗЕЛ» в рамках проведения научно-исследовательские работы в области водных ресурсов для федеральных государственных нужд по теме НИР-15: «Разработка системы мониторинга и прогнозирования типовых и редко повторяющихся сценариев развития аварийных и катастрофических явлений на гидротехнических сооружениях».

Под принятием решения далее будет пониматься формализованная определенным образом процедура выбора решения или алгоритм осуществления выбора из множества альтернатив (вариантов решений), осуществляемая лицом, принимающим решение. Под альтернативой понимается как вариант решения, так и результат его реализации.

В основу методики принятия решений о проведении мероприятий по обеспечению безопасности ГТС положен принцип разумно достижимых низких уровней риска, рекомендуемый к использованию Международной комиссией по большим плотинам. Согласно этому принципу, уменьшение риска следует увязывать с экономическими возможностями.

Такой подход позволяет при принятии решений о проведении мероприятий по обеспечению безопасности гидросооружений целенаправленно реализовывать концепции пригодности, оптимизации и адаптивности.

В соответствии с концепцией **пригодности** сравниваемые варианты мероприятий по повышению безопасности гидросооружения (альтернативы) должны быть экономически выгодными для инвестирования, таким образом, чтобы понесенные дополнительные затраты на мероприятия по безопасности компенсировались снижением вероятных потерь (рисков ущербов) в результате гипотетической аварии, т. е. чтобы для каждой из i-х альтернатив проведения мероприятий по обеспечению безопасности гидросооружения соблюдалось условие:

$$\sum_{t=1}^{T} \Delta c_{i,t} < \sum_{t=1}^{T} \Delta l_{i,t} \ .$$

В соответствии с концепцией **оптимизации** в качестве оптимального (лучшего, приемлемого) варианта обеспечения безопасности гидросооружения, рационального с точки зрения эффективности вложений, может выбираться альтернатива, обеспечивающая на интервале времени $t \in \{1;T\}$ максимум функционала:

$$\sum_{t=1}^{T} \Delta l_{i,t} - \sum_{t=1}^{T} \Delta c_{i,t} \to \max \ .$$

С точки зрения экономической выгоды для инвестирования величину $\sum_{t=1}^{T} \Delta l_{i,t}$ в условиях можно трактовать как дополнительный суммарный выигрыш (эффект) на интервале времени $t \in \{1;T\}$, получаемый от i-го варианта проведения мероприятий, направленных на повышение безопасности гидросооружения, по сравнению с исходным (базовым, «нулевым») вариантом его эксплуатации.

Суть концепции **адаптивности** состоит в поиске варианта системы безопасности, наилучшим образом учитывающего различные факторы риска в сравнении с другими возможными вариантами.

Следует заметить, что не только вероятные потери, но и затраты при инвестировании представляют собой фактор риска.

С другой стороны, отказ от некоторого более затратного j-го решения ($j \neq i$), сулящего больший дополнительный выигрыш в виде снижения вероятных потерь в результате аварии (риска ущербов) на гидросооружении по сравнению с i-м решением, т. е. от решения, при котором $\sum_{t=1}^{T} \Delta l_{j,t} > \sum_{t=1}^{T} \Delta l_{i,t}$, где $\Delta l_{j,t} = l_{0,t} - l_{j,t}$, в пользу i-го решения,

можно рассматривать как упущенную возможность, а величину $\sum_{t=1}^{T} \Delta l_{j,t}$ – как риск упущенных возможностей.

Концепция адаптивности, по своей сути, направлена не столько на выбор оптимального решения, сколько на поиск «лучшего» решения путем последовательного сопоставления в соответствии с установленным алгоритмом, всех рассматриваемых альтернатив по риску обеспечивающему баланс между дополнительными затратами как рисками, так и дополнительными выгодами как рисками упущенных возможностей.

Вероятные потери l (риск ущербов) в результате аварии на гидросооружении определяются в виде произведения безусловной вероятности p аварии на гидросооружении на величину вызванного этой аварией ущерба Y : $l = p \cdot Y$.

Вариант мероприятий по обеспечению безопасности на гидросооружении считается эффективным, если в результате его реализации вероятные потери l снижаются. Допускается снижение риска ущербов (вероятных потерь) за счет уменьшения вероятности аварии p на гидросооружении, снижения величины ущерба Y в результате аварии, одновременного уменьшения величин p и Y.

Альтернативы a_i, a_j считаются допустимыми и сравниваемыми между собой, если для каждой из них выполняются условия:

$$\Delta c_i < \Delta l_i \text{ , } \Delta c_j < \Delta l_j \text{ , и, если, } \Delta c_i < \Delta c_j, \textit{ то и } \Delta l_i < \Delta l_j .$$

Полным риском i-й альтернативы по сравнению с j-й альтернативой является величина $r_{i,j}$, представленная суммой дополнительной стоимости Δc_i (суммарных дополнительных затрат) этой альтернативы и упущенной выгоды, определенной величиной снижения вероятных потерь (риска ущербов) Δl_j в результате гипотетической аварии на гидросооружении при i-м варианте проведения мероприятий по обеспечению его безопасности по сравнению с исходным (базовым, «нулевым») вариантом:

$$r_{i,j} = \Delta c_i + \Delta l_j .$$

Соответственно, полным риском j-й альтернативы по сравнению с i-й альтернативой является величина $r_{j,i} = \Delta c_j + \Delta l_i$.

Здесь компоненты Δc_i, Δc_j считаются собственными рисками, а компоненты Δl_i, Δl_j – рисками упущенных возможностей i-й и j-й альтернатив, соответственно. Δl_i, Δl_j

Под собственным (или же системным) риском альтернативы понимается функция проигрыша, формируемая затратами на ее реализацию, ущербами, потерями, штрафами, связанными с ее реализацией, независимо от любой другой альтернативы.

Под риском упущенных возможностей (несистемным риском) i-й альтернативы при ее сравнении с j-й альтернативой понимается функция выигрыша (выгоды, дохода, приобретения) j-й альтернативы.

Для исходного (базового) варианта, при котором не предусматривается дополнительное финансирование мероприятий по безопасности, т.е. $\Delta c_0 = 0$, полный риск в сопоставлении с любым другим (i-м) вариантом определяется величиной снижения вероятных годовых потерь (годового риска ущербов) в результате гипотетической аварии на гидросооружении при этом варианте: $r_{0,i} = \Delta l_i$.

Альтернатива a_i считается лучшей в сравнении с альтернативой a_j, если $r_{i,j} < r_{j,i}$. Соответственно альтернатива a_j будет лучше альтернативы a_i, если $r_{j,i} < r_{i,j}$.

Выбор решения на основе парного сравнения вариантов с учетом риска. Таблица решений

Полный риск альтернативы в виде $r_{i,j}$ можно трактовать как риск альтернативы a_i при условии, что лицо, принимающее решение, отказывается от варианта a_j.

В зависимости от количества допустимых вариантов n для каждого i-го варианта может задаваться $m=n-1$ значений полного риска $r_{i,j}$. При этом таблица решений (табл.1) сводится к n строк, где каждому из вариантов a_i приписывается $n-1$ результатов $r_{i,j}$, характеризующих в целом последствия решения с учетом как дополнительных затрат, так и упущенных возможностей.

Таблица 1

Общий вид таблицы решений

$a_i \backslash a_j$	a_0	…	a_i	…	a_j	…	a_n
a_0	–	…	$r_{0,i}$	…	$r_{0,j}$	…	$r_{0,n}$
…	…	–	…	…	…	…	…
a_i	$r_{i,0}$	…	–	…	$r_{i,j}$	…	$r_{i,n}$
…	…	…	…	–	…	…	…
a_j	$r_{j,0}$	…	$r_{j,i}$	…	–	…	$r_{j,n}$
…	…	…	…	…	…	–	…
a_n	$r_{n,0}$	…	$r_{n,i}$	…	$r_{n,j}$	…	–

Если $\Delta c_0 = 0$ (когда при базовом, «нулевом», варианте действий дополнительные затраты на мероприятия по безопасности гидросооружения не предусматриваются), то таблица решений приобретает следующий вид (табл.2).

Демонстрационный пример формирования таблицы решений показан ниже в табл.3 и 4

Альтернатива a_4 является лучшей при парном ее сравнении со всеми остальными альтернативами и ее полные риски $r_{4,0} = 0{,}15$, $r_{4,1} = 0{,}24$, $r_{4,2} = 0{,}31$, $r_{4,3} = 0{,}38$, $r_{4,5} = 0{,}49$, $r_{4,6} = 0{,}54$, $r_{4,7} = 0{,}58$ при сравнении с другими альтернативами меньше соответствующих полных рисков $r_{0,4} = 0{,}29$, $r_{1,4} = 0{,}32$, $r_{2,4} = 0{,}35$, $r_{3,4} = 0{,}39$, $r_{5,4} = 0{,}51$, $r_{6,4} = 0{,}59$, $r_{7,4} = 0{,}69$ альтернатив a_0, a_1, a_2, a_3, a_5, a_6, a_7 по сравнению с a_4.

Таблица 2

Общий вид таблицы решений
при $\Delta c_0 = 0$ ($\Delta c_i = c_0 - c_i, \Delta l_i = l_0 - l_i$)

$a_i \backslash a_j$	a_0	…	a_i	…	a_j	…	a_n
a_0	–	…	Δl_i	…	Δl_j	…	Δl_n
…	…	–	…	…	…	…	…
a_i	Δc_i	…	–	…	$\Delta c_i + \Delta l_j$	…	$\Delta c_i + \Delta l_n$
…	…	…	…	–	…	…	…
a_j	Δc_j	…	$\Delta c_j + \Delta l_i$	…	–	…	$\Delta c_j + \Delta l_n$
…	…	…	…	…	…	–	…
a_n	Δc_n	…	$\Delta c_n + \Delta l_i$	…	$\Delta c_n + \Delta l_j$	…	–

Таблица 3

Численные характеристики альтернатив
(демонстрационный пример)

Компонента риска альтернативы a_i	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Δc_i	0	0,03	0,06	0,10	0,15	0,22	0,30	0,40
Δl_i	0	0,09	0,16	0,23	0,29	0,34	0,39	0,43

Таблица 4

Таблица решений для демонстрационного примера

$a_i \backslash a_j$	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
a_0		0,09	0,16	0,23	0,29	0,34	0,39	0,43
a_1	0,03		0,19	0,26	0,32	0,37	0,42	0,46
a_2	0,06	0,15		0,29	0,35	0,4	0,45	0,49
a_3	0,10	0,19	0,26		0,39	0,44	0,49	0,53
a_4	0,15	0,24	0,31	0,38		0,49	0,54	0,58
a_5	0,22	0,31	0,38	0,45	0,51		0,61	0,65
a_6	0,30	0,39	0,46	0,53	0,59	0,64		0,73
a_7	0,40	0,49	0,56	0,63	0,69	0,74	0,79	

Алгоритм выбора решения на основе парного сравнения вариантов с учетом риска

На первом этапе для каждого из рассматриваемых i-х вариантов мероприятий по обеспечению безопасности гидросооружения (альтернатив), включая исходный, базовый («нулевой») вариант, определяются суммарные затраты c_i (с учетом капитальных вложений в систему безопасности и операционных расходов на ее эксплуатацию), оцениваются вероятности аварий на гидросооружении p_i, ущербы Y_i и риски ущербов $l_i = p_i \cdot Y_i$ от аварий при рассматриваемых вариантах.

Вероятности аварий, затраты и ущербы устанавливаются на прогнозный период эксплуатации гидросооружения T.

При определении годовых вероятностей аварии $p_{i,t}$, $t = 1$ год, полные вероятности аварии на гидросооружении за прогнозный период эксплуатации T:

$$p_{i,T} = \left(1 - p_{i,t}\right)^T .$$

Затраты и ущербы путем дисконтирования приводятся на момент оценки эффективности вариантов. Дисконтирование выполняется путём умножения будущих денежных потоков (потоков платежей) на коэффициент дисконтирования k_d:

$$k_d = \frac{1}{(1+i)^t},$$

где i – годовая процентная ставка;

$t \in \{1; T\}$ – интервал времени оценки, в годах.

Определяются дополнительные затраты для каждого из i-х вариантов мероприятий по обеспечению безопасности гидросооружения (с уче-

том дополнительных капитальных вложений в систему безопасности и дополнительных операционных расходов на ее эксплуатацию) и соответствующие этим вариантам величины снижения вероятных потерь (рисков ущербов) по сравнению с базовым (исходным, «нулевым») вариантом эксплуатации гидросооружения.

В соответствии с критерием, чтобы понесенные дополнительные затраты на мероприятия по безопасности компенсировались снижением вероятных потерь (рисков ущербов) в результате гипотетической аварии, отбираются эффективные альтернативы. Формируется упорядоченное по возрастанию дополнительных затрат множество допустимых и сравниваемых альтернатив так, чтобы

$$\Delta c_0 < \Delta c_1 < \ldots < \Delta c_i < \ldots < \Delta c_{n-1} < \Delta c_n ,$$

где $\Delta c_i = c_0 - c_i$; c_0, c_i – обобщенные приведенные стоимости «нулевого» и i-го вариантов обеспечения безопасности гидросооружения.

Определяются полные риски $r_{i,j}$ альтернатив a_i, связанные с выбором систем безопасности гидросооружения при условии существования альтернатив a_j.

Формируется таблица решений, в которую заносятся значения $r_{i,j}$. Диагональ таблицы решений с индексами $i=j$ при этом не заполняется.

Устанавливается альтернатива a_k, полные риски которой $r_{k,i}$, $r_{k,j}$ при ее сравнении с ближайшими соседними альтернативами a_i, a_j, где $i = k-1$, $j = k+1$, будут меньше полных рисков $r_{i,k}$, $r_{j,k}$ альтернатив a_i, a_j при их сравнении с a_k. Выбранная таким образом альтернатива a_k признается лучшей из рассматриваемых вариантов обеспечения безопасности гидросооружения.

Случай внеэкономического представления компонент полного риска

В случае, если компоненты полного риска имеют различные единицы измерения либо не допускают экономического представления, используется балльный подход.

Формирование балльных оценок риска для факторов и параметров, выраженных в различных единицах измерения, осуществляется на основе единой логарифмической шкалы. В общем случае балльная оценка $I(y_i)$ для некоторого параметра y_i, в баллах, будет

$$I(y_i) = \mu_i \cdot lg\, y_i + y_{i,0},$$

где μ_i – модуль;

$y_{i,0}$ – ноль-пункт на универсальной (единой, интегральной) логарифмической шкале измерения длиной L.

Для параметра y_i:

$$\mu_i = \frac{L}{lg\, y_{i,max} - lg\, y_{i,min}}; \qquad y_{i,0} = -\mu_i \cdot lg\, y_{i,min},$$

где $y_{i,max}$, $y_{i,min}$ – максимальное и минимальное значения y_i.

При $y_{i,min}$ =0 («нулевой» риск) $y_{i,0}$ =0:

$$\mu_i = \frac{L}{lg\, y_{i,max}}.$$

Длина шкалы L принимается равной 10 баллам со следующими уровнями оценок: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Для факторов, задаваемых качественно, оценки y_i, $y_{i,max}$, $y_{i,min}$ параметров устанавливаются непосредственно в баллах в зависимости от вербального описания, указывающего на «вес» последствий реализации анализируемого фактора, степени его влияния на безопасность гидросооружения. При формировании экспертных оценок для таких факторов можно применить девятибалльную шкалу Т.Саати (табл.5), используемую в методе парных сравнений, либо десятибалльную шкалу (табл.6).

Таблица 5

Балльные оценки девятибалльной шкалы Т. Саати

Числовая оценка y_i	Качественная оценка (сравнение альтернатив a_i и a_j)
1	Отсутствие преимущества a_i над a_j
3	Слабое преимущество a_i над a_j
5	Существенное преимущество a_i над a_j
7	Явное преимущество a_i над a_j
9	Абсолютное преимущество a_i над a_j
2, 4, 6, 8	Промежуточные сравнительные оценки

Таблица 6

Балльные оценки десятибалльной шкалы

Числовая оценка y_i	Качественная оценка влияния фактора
0	Отсутствует
1	Незначительное
2	Малое
3	Умеренное
4	Ниже среднего
5	Среднее
6	Выше среднего
7	Высокое
8	Очень высокое
9	Чрезвычайно высокое

При использовании девятибалльной шкалы Т.Саати $y_{i,max} = 9$, $y_{i,min} = 1$; при использовании десятибалльной шкалы $y_{i,max} = 9$, $y_{i,min} = 0$.

Данная методика принятия решений апробирована на примере гидротехнических сооружений Белгородского водохранилища и Костромской низины. Представлены примеры принятия решений о проведении мероприятий по обеспечению безопасности ГТС, рациональных с точки зрения эффективности и надежности, с применением метода анализа иерархий Т. Саати.

Автоматизация процесса принятия решений заключается в применении стандартного комплекта программного обеспечения Microsoft Office Excel.

Применение данного программного обеспечения упрощает процесс расчета, позволяя при этом обрабатывать значительные объемы информации и получать обоснованные результаты.

Внедрение данной методики позволит предприятиям повысить надежность ГТС при оптимальных затратах на их ремонт и реконструкцию.