

Петроченко В. И., Петроченко А. В.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМ ПРЕВЕНТИВНОЙ ПРОТИВОПАВОДКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИЙ В БАССЕЙНАХ РЕК

Введение. Паводковые ситуации происходят на 27 процентах территории Украины или на 165 тыс. км² ее площади, где проживает почти треть населения страны. Вредное воздействие паводков периодически проявляется в виде затопления территорий в бассейнах рек и повреждения паводковым потоком жилых домов и прочих объектов. Особенно опасны паводки в Карпатском регионе, где они могут повторяться 3–5 раз в год. Паводки на освоенных горных склонах провоцируют еще и оползневые процессы [1–3].

Причины возникновения паводков можно разделить на две большие группы: естественные и антропогенные. Естественными причинами возникновения паводков являются атмосферные осадки, таяние снегов. К антропогенным причинам следует отнести: разрушение природных источников и стоков, распашка склонов, вырубка лесов, добыча песка и гравия в руслах рек, искусственное осушение территорий и пр.

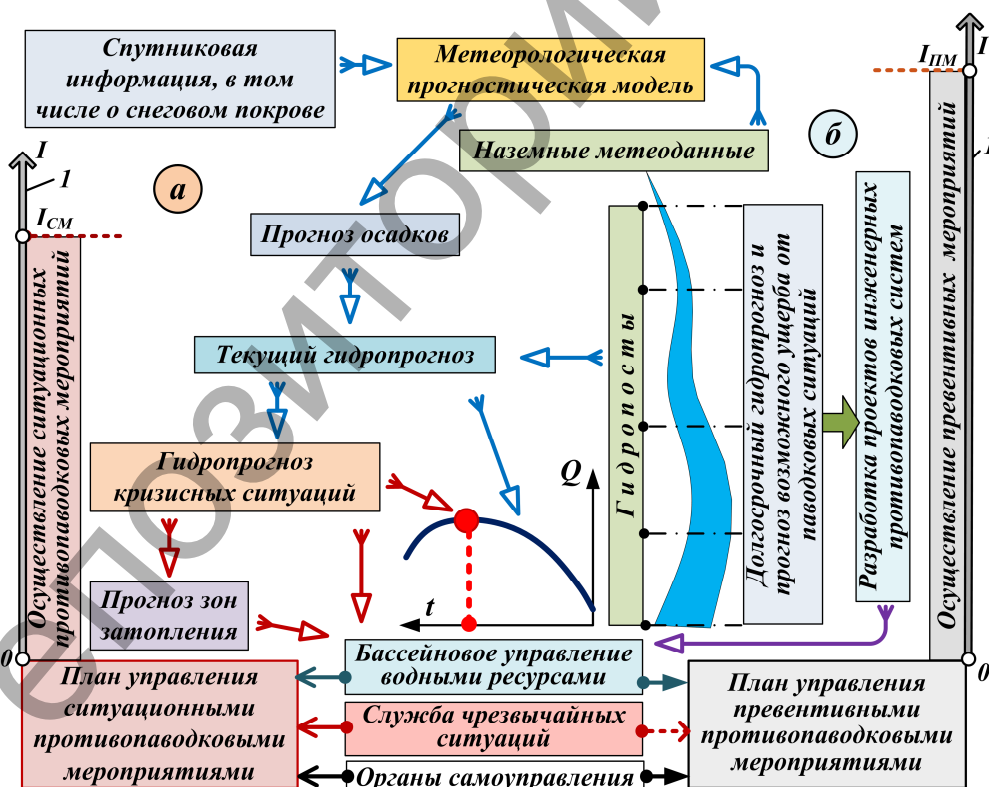
Для защиты от вредного воздействия паводков необходимо выполнить определенные мероприятия. Однако, из-за отсутствия научно-методического обеспечения, проектные и управленческие решения выполнения этих мероприятий в настоящее время принимают на основе опыта и интуиции проектировщиков, служб управлений водного хозяйства, чрезвычайных ситуаций, органов государственной власти и местного самоуправления. Такой подход не позволяет эффективно вкладывать инвестиции в противопаводковые мероприятия.

Учитывая высокую стоимость противопаводковых мероприятий, а также то, что они из-за отсутствия коммерческой привлекательности для частных инвесторов финансируются преимущественно за счет средств государственного бюджета, представляется весьма актуальной задача повышения эффективности противопаводковых мероприятий и вложения в них инвестиций.

Цель представленной работы – разработка научно-методического инструментария обоснования эффективных проектных и управленческих решений превентивной противопаводковой защиты территорий в бассейнах рек.

Изучение рисков возникновения паводков и последствий их вредного воздействия позволяет разделить различные варианты противопаводковых мероприятий на два основных типа: ситуационные и превентивные. К первому относят мероприятия, которые выполняют незадолго до начала, в период прохождения и по завершении паводкового процесса. Превентивные противопаводковые мероприятия выполняют путем увеличения пропускной способности рек, укрепления русел рек, строительства дамб, противопаводковых водохранилищ и прочих сооружений. Они предназначены для длительной (от 30 до 100 лет) защиты территорий в бассейнах паводкоопасных рек.

На рис. 1 приведена общая схема управления противопаводковыми мероприятиями: ситуационными (левая часть схемы) и превентивными (правая часть схемы).



а – управление ситуационными противопаводковыми мероприятиями; б – управление превентивными противопаводковыми мероприятиями; 1 – ось индекса доходности инвестиций в противопаводковые мероприятия

Рисунок 1 – Варианты управления паводковыми рисками

Петроченко Вячеслав Ильич, к.т.н., ведущий научный сотрудник Института водных проблем и мелиорации Национальной академии аграрных наук Украины.

Петроченко Алексей Вячеславович, к.т.н., научный сотрудник Института водных проблем и мелиорации Национальной академии аграрных наук Украины.

Украина, ИВПиМ НААН Украины, 03022, г. Киев, ул. Васильковская 37.

Управление ситуационными мероприятиями предусматривает краткосрочное (до 12–15 дней) прогнозирование паводков по гидрологическим показателям и возможному ущербу с последующим выполнением преимущественно службами чрезвычайных ситуаций предупредительных, аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ: оповещение населения; вывоз людей, животных, драгоценностей и готовой продукции с территории, к которой приближается паводок; срочное укрепление берегов рек и наращивание дамб; временное крепление и восстановление дорог, мостов, электросети и средств связи; спасательные, медицинские и санитарно-эпидемиологические работы; снабжение населения продовольствием, одеждой и средствами, необходимыми для выживания в экстремальных ситуациях; работы по локализации и остановке оползней.

Управление превентивными мероприятиями предусматривает долгосрочное прогнозирование паводковых ситуаций на период, соответствующий расчетному сроку службы противопаводковых сооружений, строительство сооружений и их эксплуатация.

Принятие управленческих решений относительно осуществления в бассейне реки определенного типа противопаводковых мероприятий (ситуационных или превентивных) предложено по величине индекса доходности инвестиций I , рассчитанной по формуле:

$$I = \frac{\bar{U}\Pi}{B + \bar{U}\Pi} \quad (1)$$

где $\bar{U}\Pi$ и $\bar{U}\Pi\Pi$ – среднегодовая сумма предотвращенного и не предотвращенного противопаводковыми мероприятиями убытка, тыс. грн./год; B – средняя сумма затрат на выполнение противопаводковых мероприятий на протяжении одного года, тыс. грн./год.

Если рассчитанный по формуле (1) индекс I_{CM} доходности инвестиций, вкладываемых в ситуационные мероприятия, выше индекса I_{PM} доходности инвестиций в превентивные мероприятия ($I_{CM} > I_{PM}$), то для защиты от паводков конкретной территории в бассейне реки целесообразно применять ситуационные мероприятия. Если же наоборот ($I_{PM} > I_{CM}$), то для данной территории более эффективными будут превентивные мероприятия.

В бассейнах паводкоопасных рек более эффективными по показателю индекса доходности инвестиций являются превентивные противопаводковые мероприятия, управление которыми предложено осуществлять согласно предлагаемой методике.

Этап 1 «*Определение расчетного гидрометрического створа реки*»

Расчетным считают верхний створ реки 3 (рис. 2), который находится на границе или вблизи границы территории 2, которая защищается от паводков. При долгосрочном прогнозировании паводковых ситуаций эмпирические данные определяют в расчетном створе 3 только для одного наиболее интенсивного паводка в каждом прошедшем m -м году. Первой эмпирической точкой считают максимальный расход воды Q_m , зафиксированный в m -м году. Второй эмпирической точкой считают величину убытка от паводка U_m в m -м году на территории 2. При этом убыток U_m определяют как сумму экономического, социального и экологического убытка, рассчитанного в денежных единицах по методикам [3–5].

Этап 2 «*Обработка гидрометрических данных в расчетном створе реки*»

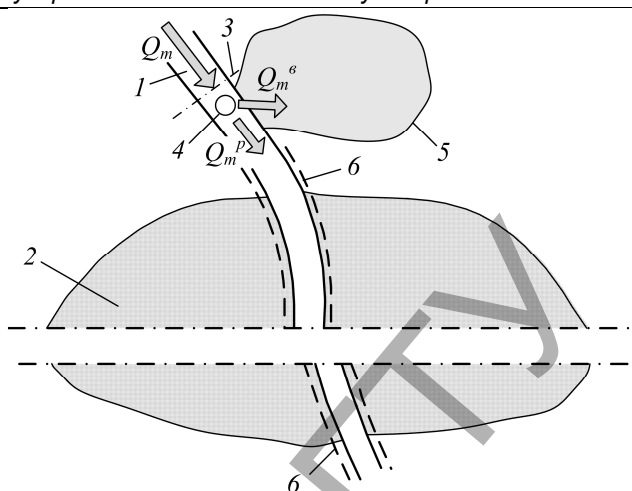
Результаты измерений в расчетном створе реки максимальных в каждом m -м году расходов воды Q_m , размещают в ряд (2) в порядке их последовательного уменьшения:

$$Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3 \geq \dots \geq Q_m \geq \dots \geq Q_{n-1} \geq Q_n \quad (2)$$

где m – порядковый номер года в ряду; n – количество лет наблюдений в ряду.

Для каждого m -го члена ряда (2) в соответствии с [6] определяют обеспеченность паводка p_m как вероятность (в процентах) превышения расхода воды Q в створе 3 значения Q_m по формуле:

$$p_m = \frac{m}{n+1} \cdot 100\% \quad (3)$$



1 – русло реки; 2 – территория, защищаемая от паводков; 3 – расчетный створ реки; 4 – точка бифуркации паводкового потока; 5 – противопаводковое водохранилище; 6 – дуноглубительные и берегозащитные мероприятия

Рисунок 2 – Схема превентивной противопаводковой защиты территории

После расчетов p_m по формуле (3) получают соответствующий ряду (2) ряд (4):

$$p_1 \leq p_2 \leq p_3 \leq \dots \leq p_m \leq \dots \leq p_{n-1} \leq p_n \quad (4)$$

Сгруппировав попарно эмпирические точки рядов (2) и (4), получают ряд пар точек:

$$(Q_1, p_1), (Q_2, p_2), \dots, (Q_m, p_m), \dots, (Q_{n-1}, p_{n-1}), (Q_n, p_n) \quad (5)$$

По эмпирическим точкам ряда (5) в виде ломаной линии первоначально отображают эмпирическую зависимость 1 (рис. 3) расхода воды Q_m от обеспеченности паводков p_m .

Учитывая недостаточное количество эмпирических точек ряда (5) и возможные ошибки их определения, результаты гидрологических измерений и расчетов сглаживают путем замены эмпирической зависимости 1 теоретической зависимостью 2 (рис. 3).

Теоретическая зависимость 2 расхода воды в расчетном створе реки от обеспеченности паводков является убывающей функцией $Q=f_1(p)$. Ее представляют гиперболой вида:

$$Q = \frac{k_1}{p} + k_2 \quad (6)$$

Используя ряд эмпирических точек (5), неизвестные коэффициенты k_1 и k_2 функции (6) находят методом наименьших квадратов.

Этап 3 «*Анализ убытков от паводков за прошедший период*»

На территории 2 (рис. 2), которая защищается от паводков, для каждого паводка, зафиксированного в m -м прошедшем году, определяют размер ущерба по формуле:

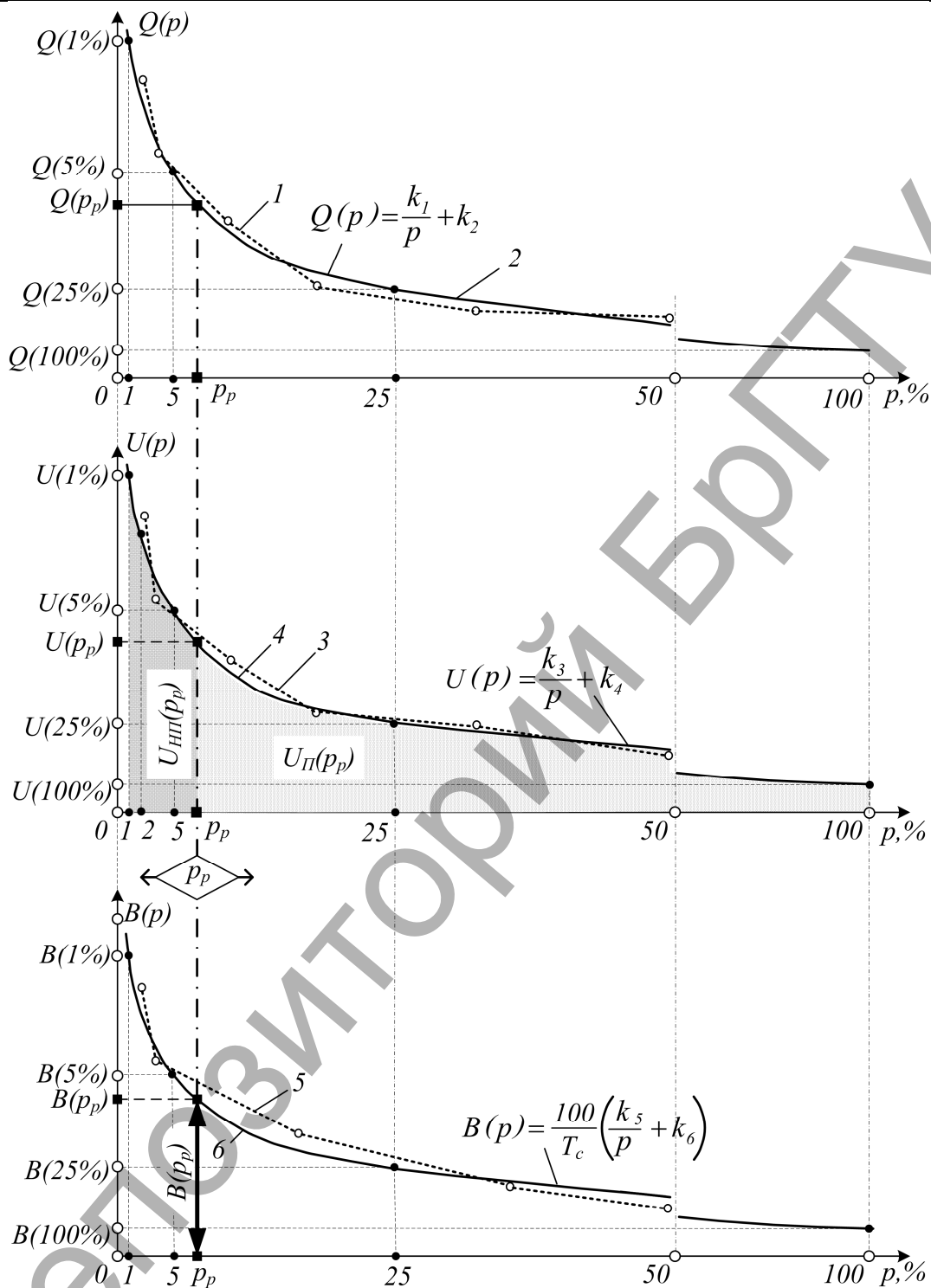
$$U_m = U_m^{э\kappa\lambda} + U_m^{с\iota} + U_m^{э\kappa\lambda} \quad (7)$$

где U_m – убыток от паводка общий, тыс. грн./год; $U_m^{э\kappa\lambda}$, $U_m^{с\iota}$ и $U_m^{э\kappa\lambda}$ – убыток от паводка экономический, социальный и экологический, тыс. грн./год.

В формуле (7) учитывают размер убытков, определенных в ценах текущего периода (расчетного года). Поэтому каждый, определенный в предыдущие годы, отдельный стоимостный показатель убытков (прямых и непрямых экономических убытков, социальных и экологических убытков), подлежит дисконтированию по формуле:

$$U_{\eta}^{\tau} = U_{\eta}^m (1 + \varepsilon)^{(\tau - m)} \quad (8)$$

где τ – индекс расчетного года (года разработки проекта противопаводковой системы); U_{η}^m – стоимостный показатель убытка по η -му объекту, определенный в прошедшем m -м году, тыс. грн./год; U_{η}^{τ} – стоимостный показатель убытка по η -го объекту, который определяют в расчетном τ -м году, тыс. грн./год; ε – коэффициент дисконтирования.



1 и 2 – эмпирическая и теоретическая зависимости расхода воды в расчетном створе реки; 3 и 4 – эмпирическая и теоретическая зависимости убытков от паводков в бассейне реки; 5 и 6 – эмпирическая (по расчетным точкам) и теоретическая зависимости строительных и эксплуатационных затрат на осуществление превентивных мер защиты от одного паводка

Рисунок 3 – Совместный анализ зависимостей расхода воды $Q(p)$ в расчетном створе реки, убытков от паводков $U(p)$ и затрат $B(p)$ на осуществление превентивных противопаводковых мероприятий в бассейне реки от обеспеченности паводков p

После расчета убытков от паводковых ситуаций за каждый m -й прошедший год наблюдений в соответствии с рядами (2) и (4) эмпирических точек Q_m и p_m формируют ряд (9) эмпирических точек U_m убытков за прошедший период:

$$U_1 \geq U_2 \geq U_3 \geq \dots \geq U_m \geq \dots \geq U_{n-1} \geq U_n \quad (9)$$

Сгруппировав попарно эмпирические точки рядов (9) и (4), получают ряд пар точек:

$$(U_1, p_1), (U_2, p_2), \dots, (U_m, p_m), \dots, (U_{n-1}, p_{n-1}), (U_n, p_n) \quad (10)$$

По эмпирическим точкам ряда (10) строят эмпирическую зависимость 3 (рис. 3) убытков U от обеспеченности паводков p в виде ломаной линии. Характер эмпирической зависимости 3 свидетельствует о возможности аппроксимации функции $U=f_2(p)$ (теоретической зависимости 4) убытка U от обеспеченности паводка p гиперболой вида:

$$U = \frac{k_3}{p} + k_4. \quad (11)$$

Применяя метод наименьших квадратов и пользуясь рядом эмпирических точек (10), находят неизвестные коэффициенты k_3 и k_4 функции (11).

В дальнейшем целесообразно принять условный расчетный период превентивной противопаводковой защиты территории в бассейне реки $T=100$ лет. При этом на протяжении расчетных $T=100$ лет общее количество паводков составляет $n=100$, а общий убыток U_T от паводков на протяжении 100 расчетных лет определяют интегрированием:

$$U_T = \int_{p=[p]}^{p=100} \left(\frac{k_3}{p} + k_4 \right) dp = (k_3 \ln p + k_4 p) \Big|_{[p]}^{100} = k_3 \ln \frac{100}{[p]} + k_4 (100 - [p]), \quad (12)$$

где $[p]$ – предельное минимальное значение обеспеченности паводка, которое не наблюдалось в данном расчетном створе реки на протяжении более 100 лет.

Величину $[p]$ устанавливают экспертным путем в зависимости от степени ответственности объектов на защищаемой территории.

Среднегодовую сумму убытка от паводков \bar{U} рассчитывают по формуле:

$$\bar{U} = U_T / 100. \quad (13)$$

Этап 4 «*Определение функциональной зависимости капитальных и эксплуатационных затрат на осуществление инженерной защиты от паводков различной обеспеченности*»

Зависимость $B=f_3(p)$ капитальных и эксплуатационных затрат B от обеспеченности паводков p устанавливают также по эмпирическим точкам путем пробных расчетов затрат B_m , необходимых для строительства и эксплуатации сооружений, способных обеспечить защиту территории при прохождении в расчетном створе реки в m -м году паводкового потока воды расходом Q_m . При этом, используя методы оптимального проектирования, находят наилучшие варианты противопаводковой защиты, рассчитанной на расход воды Q_m . Одним из наиболее эффективных методов обоснования проектных решений противопаводковой защиты территорий в бассейнах рек является метод бифуркации базиса [7]. Суть этого метода заключается в определении оптимальной комбинации двух основных вариантов противопаводковой защиты: строительства противопаводкового водохранилища 5 и выполнения дноуглубительных и берегозащитных мероприятий 6 (рис. 1). При этом общий пиковый поток воды расходом Q_m в точке бифуркации 4 разделяют на два потока. Один из них расходом Q_m^e направляют в водохранилище польдерного типа, или задерживают в водохранилище горного типа. Второй поток расходом Q_m^p пропускают руслом реки после выполнения дноуглубительных и берегоукрепительных работ. При использовании метода бифуркации базиса достигаются такие соотношения расходов воды и затрат на выполнение инженерных мероприятий:

$$Q_m = Q_m^e + Q_m^p; \quad (14)$$

$$B_m(Q_m^e) > B_m^6(Q_m^e, Q_m^p) < B_m(Q_m^p); \quad (15)$$

$$B_m^6(Q_m^e, Q_m^p) \rightarrow \min,$$

где $B_m(Q_m^e)$ – затраты на строительство и эксплуатацию водохранилища в случае исключения дноуглубительных и берегоукрепительных работ в русле реки, тыс. грн.; $B_m(Q_m^p)$ – затраты на выполнение дноуглубительных и берегоукрепительных работ в русле реки в случае отказа от строительства водохранилища, тыс. грн.; $B_m^6(Q_m^e, Q_m^p)$ – общие затраты на строительство водохранилища и выполнение работ по углублению и укреплению русла реки при использовании метода бифуркации базиса, тыс. грн.

С учетом использования метода бифуркации базиса [7] ($Q_m = Q_m^e + Q_m^p$) для каждого расхода воды Q_m ряда (2) выпол-

няют пробные расчеты конструктивных параметров защитных сооружений, способных пропустить расходы воды Q_m^e и Q_m^p . Затем выполняют пробные расчеты затрат $B_m = B_m^6(Q_m^e, Q_m^p)$. Получают ряд (16) эмпирических точек B_m :

$$B_1 \geq B_2 \geq B_3 \geq \dots \geq B_m \geq \dots \geq B_{n-1} \geq B_n. \quad (16)$$

Группируя попарно соответствующие эмпирические точки рядов (16) и (4), имеют:

$$(B_1, p_1), (B_2, p_2), \dots, (B_m, p_m), \dots, (B_{n-1}, p_{n-1}), (B_n, p_n). \quad (17)$$

По эмпирическим точкам ряда (17) строят эмпирическую зависимость 5 (рис. 3) затрат B от обеспеченности паводков p в виде ломаной линии. Убывающий характер эмпирической зависимости 5 дает возможность аппроксимировать функцию $B=f_3(p)$ (теоретическую зависимость 6 затрат B от обеспеченности паводка p) гиперболой:

$$B = \frac{100}{T_c} \left(\frac{k_5}{p} + k_6 \right), \quad (18)$$

где T_c – расчетный предельный срок эксплуатации противопаводковой системы, год.

Используя ряд эмпирических точек (17), находят неизвестные коэффициенты k_5 и k_6 .

Этап 5 «*Определение оптимальных расчетных величин обеспеченности паводков*»

Эффективность вложения инвестиций в превентивные противопаводковые мероприятия согласно (1) оценивается индексом доходности инвестиций I . Очевидно, что индекс доходности инвестиций зависит от расчетной величины обеспеченности паводков p_p , которую проектировщики закладывают в основу проектов. На основе (1) и результатов выполненных исследований определяют функциональную зависимость индекса I от p_p :

$$I(p_p) = \frac{U_{\Gamma}(p_p)}{B(p_p) + U_{H\Gamma}(p_p)}, \quad (19)$$

где $U_{\Gamma}(p_p)$ и $U_{H\Gamma}(p_p)$ – убыток предотвращенный и убыток не предотвращенный превентивными противопаводковыми мероприятиями на протяжении расчетного периода $T=100$ лет, тыс. грн.; $B(p_p)$ – затраты, необходимые на строительство комплекса противопаводковых сооружений и их эксплуатацию на протяжении периода $T=100$ лет.

Убыток $U_{\Gamma}(p_p)$ на рис. 3 представлен площадью фигуры под теоретической кривой 4 на интервале $p_p < p \leq 100$. Его определяют путем интегрирования:

$$U_{\Gamma}(p_p) = \int_{p=p_p}^{p=100} \left(\frac{k_3}{p} + k_4 \right) dp = (k_3 \ln p + k_4 p) \Big|_{p_p}^{100} = k_3 \ln \frac{100}{p_p} + k_4 (100 - p_p). \quad (20)$$

Убыток $U_{H\Gamma}(p_p)$ на рис. 3 представлен площадью фигуры под теоретической кривой 4, которую определяют путем интегрирования на интервале $[p] < p \leq p_p$:

$$U_{H\Gamma}(p_p) = \int_{p=[p]}^{p=p_p} \left(\frac{k_3}{p} + k_4 \right) dp = (k_3 \ln p + k_4 p) \Big|_{[p]}^{p_p} = k_3 \ln \frac{p_p}{[p]} + k_4 (p_p - [p]). \quad (21)$$

Затраты $B(p_p)$ определяют по формуле (18). На рис. 3 они представлены ординатой графика 6, соответствующей аргументу $p=p_p$. Очевидно, что $U_{\Gamma}(p_p)$ и $B(p_p)$ уменьшаются с увели-

чением расчетной величины обеспеченности паводков p_p , а $U_{НП}(p_p)$ увеличивается. С уменьшением p_p $U_{П}(p_p)$ и $B(p_p)$ увеличиваются, а $U_{НП}(p_p)$ уменьшается.

Для определения оптимальной расчетной величины обеспеченности паводков p_p^{opt} , при которой достигается максимальный индекс доходности инвестиций $I(p_p)^{max}$, в формулу (19) подставляют значения $B(p_p)$, $U_{П}(p_p)$ и $U_{НП}(p_p)$, взятые из формул (18), (20) и (21):

$$I(p_p) = \frac{k_3 \ln \frac{100}{p_p} + k_4(100 - p_p)}{\frac{100}{T_c} \left(\frac{k_5}{p_p} + k_6 \right) + k_3 \ln \frac{p_p}{[p]} + k_4(p_p - [p])} \rightarrow \max. \quad (22)$$

Максимальное значение $I(p_p)^{max}$ достигается при условии:

$$\frac{\partial(I(p_p))}{\partial(p_p)} = 0. \quad (23)$$

Однако, в результате определения частной производной функции (22) по аргументу p_p согласно условию (23), имеем сложное неприемлемое для практического применения трансцендентное уравнение. Поэтому для проектировщиков более рациональным и относительно нетрудоемким является вариант определения $I(p_p)^{max}$ методом последовательной подстановки значений p_p в формулу (22).

Заключение. В зависимости от характера и периода выполнения, выделено два основных типа противопаводковых мероприятий: ситуационные и превентивные.

Наиболее перспективными являются рассчитанные на длительный период защиты превентивные противопаводковые мероприятия, в качестве критерия эффективности которых предложено использовать индекс доходности инвестиций.

Повышение эффективности превентивных противопаводковых мероприятий достигается путем разработки и практического применения более совершенного научно-методического инструментария долгосрочного прогнозирования паводковых ситуаций и обоснования проектных решений систем противопаводковой защиты в бассейнах рек.

Долгосрочное прогнозирование паводковых ситуаций осуществляют комплексно: по гидрологическим показателям, размеру возможных убытков от паводков и по величине затрат на строительство и эксплуатацию противопаводковых систем в бассейнах рек.

Для повышения эффективности проектных решений систем превентивной защиты предложена процедура оптимизации расчетной величины обеспеченности паводков.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Козьменко, С.Н. Экономика катастроф (инвестиционные аспекты) / С.Н. Козьменко. – Киев: Наукова думка, 1997. – 2004 с.
2. Заміховський, Л.М. Аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод / Л.М. Заміховський, О.І. Клапоуцак // Нафтогазова енергетика. – 2011. – № 2(15). – С. 99–105.
3. Петроченко, В.І. Еколого-економічна ефективність протипаводкових заходів / В.І. Петроченко, В.А. Сташук. – К.: ДІУЕВР, 2009. – 62 с.
4. Алексеев, Н.А. Ущерб от паводков и методика его определения // Труды В/О «Союзводпроект». – 1977. – Вып. 2(47).
5. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 15 лютого 2002 р. – № 175.
6. Самохин, А.А. Практикум по гидрологии / А.А. Самохин, Н.Н. Соловьева, А.М. Догановский. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 296 с.
7. Петроченко, В.І. Метод біфуркації базису та його застосування при розробці проектів захисту від шкідливої дії вод / В.І. Петроченко // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Водні ресурси України та меліорація земель» (22 березня 2013). – К.: Держводагентство, ІВПІМ НААН, 2013. – С. 12–14.

Материал поступил в редакцию 24.04.2018

PETROCHENKO V.I., PETROCHENKO A.V. Scientifically-methodical substantiation of systems of preventive flood protection of territories in river basins

The article considers the problem of increasing the effectiveness of preventive protection systems from floods in river basins. A methodology for long-term forecasting of flood situations by hydrological indices and indicators of losses from floods has been developed. A procedure is proposed for optimizing the design value of flood security at the design stage of flood protection systems.

УДК 519.216.3: 627.8

Левкевич В. Е.

«ФОНОВЫЙ» ПРОГНОЗ ПЕРЕРАБОТКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ГРОДНЕНСКОЙ, ВИТЕБСКОЙ И ПОЛОЦКОЙ ГЭС

Введение. Проектирование и строительство современных гидротехнических сооружений, в состав которых входят гидроэлектростанция (ГЭС), плотина, судоходный шлюз, земляная плотина, водохранилище и т. д., требуют детального прогнозирования их воздействия на прилегающие территории. Вопросы оценки, как правило, рассматриваются в соответствии с нормативными требованиями и предусматривают изучение влияния водохранилища на развитие различных процессов в береговой зоне. К сожалению, эти расчеты не всегда используют методы прогноза и методики расчета, учитывающие индивидуальные особенности объектов: их гидрологический режим, форму водоема, грунты, образующие берега. Более того, применяются методики, разработанные для условий, отличных от проектируемых. Это сказывается как на точности, так и достоверности прогнозов. Для объективности прогноза автор предлагает его выполнять в два эта-

па: первый – в виде «фоновый» укрупненного прогноза и второй – в виде детального, после ввода объекта в эксплуатацию через 5 лет. Такой подход позволит учесть все тенденции в развитии берегов и береговых процессов и разработать при необходимости предложения по берегозащите.

На водохранилище после ввода в эксплуатацию в береговой зоне происходит активизация береговых процессов под воздействием волнения, колебания уровней и обводнения территорий, что ведет к развитию переработки склонов. Наибольшая интенсивность переработки происходит в приплотинной плессовой, наиболее широкой части водоема руслового типа. Средняя протяженность разрушаемых склонов в условиях русловых водохранилищ Беларуси составляет приблизительно 25–40% всей береговой длины русловых водоемов. В верховьях водохранилищ наблюдается русловая эро-

Левкевич Виктор Евгеньевич, д. т. н., доцент, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Белорусского национального технического университета, e-mail: eso2014@tut.by.

Беларусь, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.