

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАЩИТЫ ОТ ПАВОДКОВ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ

В. И. Петроченко¹, кандидат технических наук

А. В. Петроченко², кандидат технических наук

¹Институт водных проблем и мелиорации НААН Украины, г. Киев, Украина

²Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина

Аннотация

В статье приведены результаты анализа паводковых ситуаций в Украине. Выделено два основных типа мер защиты от паводков: ситуационные и превентивные. Предложен основной критерий оценки их эффективности. Выделено две основные, функционально противоположные по характеру выполнения, альтернативы превентивных мер защиты от паводков с использованием гидротехнических сооружений. Путем их комбинации доказана возможность снижения стоимости строительства защитных гидротехнических сооружений. Для оптимального распределения паводковых потоков с применением комбинированной альтернативы мер защиты от паводков предложен новый метод и два алгоритма его практического применения.

Ключевые слова: бассейн реки, паводок, зона риска паводков, ущерб от паводков, предотвращенный ущерб, альтернативы превентивной защиты, водохранилище, берегоукрепление, защитная дамба, строительные затраты.

Abstract

V. I. Petrochenko, A. V. Petrochenko OPTIMIZATION OF DESIGN SOLUTIONS FOR FLOOD PROTECTION IN RIVER BASINS

The article presents the results of the analysis of flood situations in Ukraine. Two main types of flood protection measures are identified: situational and preventive. The main criterion for evaluating their effectiveness is proposed. Two main alternatives of preventive flood protection measures using hydraulic structures have been identified, functionally opposite in nature of implementation. By combining them, the possibility of reducing the cost of constructing protective hydraulic structures has been proved. For optimal distribution of flood flows using a combined alternative of flood protection measures, a new method and two algorithms for its practical application have been proposed.

Keywords: river basin, flood, flood risk zone, flood damage, prevented damage, preventive protection options, reservoir, bank protection, protective dam, construction costs.

Введение

Паводки – природные явления, которые, периодически проявляя мощную разрушительную силу, приносят огромные социальные, экологические и экономические убытки [1, 2]. Влияние вредного воздействия паводковых вод наблюдается на 165 тыс. км² территории Украины, что составляет 27 % ее площади. В зонах риска затопления и подтопления проживает почти треть населения Украины [3]. Наиболее разрушительные последствия вызывают паводки в Карпатском регионе, где они могут повторяться 3–5 раз в году.

В связи с изменением климата на планете интенсивность паводков и размеры нанесенного ими ущерба приобретают нарастающий характер. Так, исторический максимум подъема воды в р. Турья (приток р. Уж), который в период прохождения катастрофического паводка 1998 г. был зафиксирован вблизи села Турья Пасека на отметке 348 см водомерного поста, в мае 2019 г. был превышен и достиг отметки 349,8 см.

В мае 2019 г. в Карпатском регионе вследствие прохождения катастрофического паводка погибло два человека. На территории Закарпатской, Ивано-Франковской, Львовской, Ровенской, Тернопольской, Хмельницкой и Черновицкой областей по оперативным данным Государственной службы чрезвычайных ситуаций Украины было размыто около 100 км автомобильных дорог, подтоплено 8800 га сельхозугодий. В 162 населенных пунктах было подтоплено около 2 тыс. домов и свыше 7300 дворохозяйств (рис. 1, 2).

Статистические данные учета последствий паводков в Украине свидетельствуют о необходимости выполнения соответствующих мер защиты [4]. Однако ввиду того, что меры (мероприятия) защиты от паводков в речных бассейнах весьма дорогостоящие и требуют значительных инвестиций из государственного бюджета, возникает необходимость их систематизации, более глубокого исследования



Рисунок 1 – Разлив реки Латорица в г. Мукачево Закарпатской области в мае 2019 г.



Рисунок 2 – Затопление теплиц в с. Боржавское Виноградовского района Закарпатской области

и оптимизации. Целью данной работы является разработка методических принципов определения наиболее перспективных мер защиты от паводков в речных бассейнах и оптимизация их функциональных параметров.

Основная часть

Меры защиты от паводков предложено разделить на два типа: ситуационные и превентивные [5].

Ситуационные меры – комплекс последовательно выполняемых в течение конкретной паводковой

ситуации предупредительных, аварийно-спасательных и аварийно-восстановительных работ.

Предупредительные работы выполняют до наступления паводка на основе предварительно полученных краткосрочных (не более 15 суток) прогнозов возникновения паводков.

Аварийно-спасательные работы выполняют в течение всего периода прохождения паводка.

Аварийно-восстановительные работы выполняют по окончании паводка.

Основным исполнителем ситуационных мер защиты от паводков является Государственная служба Украины по чрезвычайным ситуациям.

Превентивные меры выполняют путем долгосрочного (до 50–100 лет) прогнозирования паводков с последующим строительством защитных гидротехнических сооружений, использование которых обеспечивает надежный защитный эффект в зонах риска паводков на протяжении 30–50 лет и более, что соответствует расчетному сроку эксплуатации защитных гидротехнических сооружений. Основным исполнителем превентивных мер защиты от паводков является Государственное агентство водных ресурсов Украины.

Оценку эффективности и выбор вариантов ситуационных и превентивных мер защиты предложено осуществлять по функционально-стоимостному критерию, пользуясь целевой функцией:

$$I_3 = \frac{ПУ_1}{Z_1} = \frac{ПУ_1^{сц} + ПУ_1^{экл} + ПУ_1^{эки} + ПУ_1^{эки}}{Z_1} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где I_3 – индекс эффективности варианта защиты;

$ПУ_1$ – общий предотвращенный ущерб, определенный в денежных единицах как положительный эффект от применения на протяжении одного года варианта защиты от паводков;

$ПУ_1^{сц}$, $ПУ_1^{экл}$ и $ПУ_1^{эки}$ – предотвращенный социальный, экологический и экономический ущерб, определенный в денежных единицах на протяжении одного года применения варианта защиты;

Z_1 – общие (приведенные) затраты в денежных единицах, необходимые на выполнение варианта защиты на протяжении одного года.

Исследования показали, что для интенсивных часто повторяющихся паводков, которые в зоне риска наносят значительный ущерб, наиболее надежными и эффективными являются меры превентивной защиты.

Это несложно доказать, если представить предотвращенный ущерб $ПУ_1$ функцией (2), а приведенные затраты Z_1 на выполнение превентивных мер защиты – функцией (3):

$$ПУ_1 = Y_1 - НПУ_1; \quad (2)$$

$$Z_1 = \frac{K}{T} + B_1, \quad (3)$$

где Y_1 – ущерб от паводков в зоне риска на протяжении одного года в случае неприменения мер защиты;

$НПУ_1$ – не предотвращенный ущерб, определяемый в виде части ущерба Y_1 в случае неполного или недостаточно эффективного применения мер защиты от паводков;

K – строительные затраты (капиталовложения), необходимые для строительства защитных сооружений;

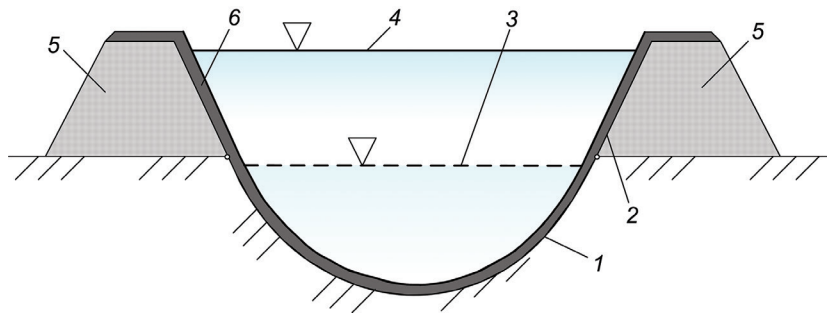
T – расчетный срок эксплуатации защитных сооружений;

B_1 – ежегодные эксплуатационные затраты по обслуживанию защитных сооружений.

Совместный анализ параметров функций (1), (2) и (3) показывает, что в зонах риска паводков большой интенсивности превентивные меры защиты имеют более высокий индекс эффективности I_3 по сравнению с ситуационными мерами. Это объясняется тем, что для превентивных мер защиты числитель функции (1) всегда имеет большую величину, по сравнению с ситуационными мерами, поскольку с применением превентивных мер $НПУ_1 \rightarrow 0$, чего нельзя достичь ситуационными мерами. Кроме того, при оценке эффективности превентивных мер знаменатель Z_1 функции (1) является сравнительно небольшой величиной по отношению к величине строительных затрат K , поскольку затраты Z_1 находятся в обратной зависимости (3) от расчетного срока T эксплуатации защитных гидротехнических сооружений, который составляет не менее 30 лет.

Выделено две основные, функционально противоположные по характеру выполнения, альтернативы превентивной защиты территорий от паводков с использованием гидротехнических сооружений.

По первой альтернативе выполняют превентивные меры по недопущению переполнения русла реки паводковыми водами и предотвращению затопления территории в зоне риска паводков путем создания условий ускоренного прохождения паводкового потока руслом реки. Для этого расширяют площадь поперечного сечения русла, наращивая дамбами 5 ее берега, а также увеличивают, неразмывающую скорость течения воды в реке, укрепляя русло защитным покрытием 6 (рис. 3).



1 и 2 – русло реки до и после применения мер превентивной защиты от паводков;
3 и 4 – нормальный подпорный уровень воды в реке до и после применения мер защиты;
5 – береговая защитная дамба; 6 – защитное покрытие русла реки

Рисунок 3 – Поперечный разрез русла реки в результате выполнения превентивных мер защиты территории от паводков по первой альтернативе

В результате применения превентивных мер защиты от паводков по первой альтернативе увеличивают предельно допустимый расход воды в реке $[Q_p]$, который является основным критериальным параметром условия прохождения паводковых вод руслом реки без затопления территории в зоне риска паводков:

$$Q_n \leq [Q_p] \geq Q_p, \quad (4)$$

где Q_n – расчетный максимальный расход паводкового потока в реке согласно гидрологическим прогнозам;

$[Q_p]$ – предельно допустимый расход паводкового потока в реке согласно гидротехническим расчетам;

Q_p – регулируемый гидротехническими сооружениями расход паводкового потока в русле реки.

По второй альтернативе превентивной защиты работы по регулированию русла реки, проходящего через зону риска паводков, не проводят, а в верхнем створе реки сооружают аккумуляционное водохранилище, использование которого обеспечивают безопасный расход воды Q_p согласно условию:

$$Q_n \geq Q_p \leq [Q_p]. \quad (5)$$

Аккумуляционное противопаводковое водохранилище сооружают или в русле горной реки (водохранилище горного типа), или долине равнинной реки (водохранилище равнинного типа, рис. 4). Емкость водохранилища 5 соединена с руслом реки водораспределительным сооружением 6, с помощью которого в период прохождения паводка наполняют водохранилище, направляя в него часть паводкового потока из русла реки, а после прохождения паводка сбрасывают воду из водохранилища в реку.

Защитный эффект достигается путем бифуркации паводкового потока в точке 7 водораспреде-

лительного сооружения 6. Бифуркация паводкового потока описывается уравнением:

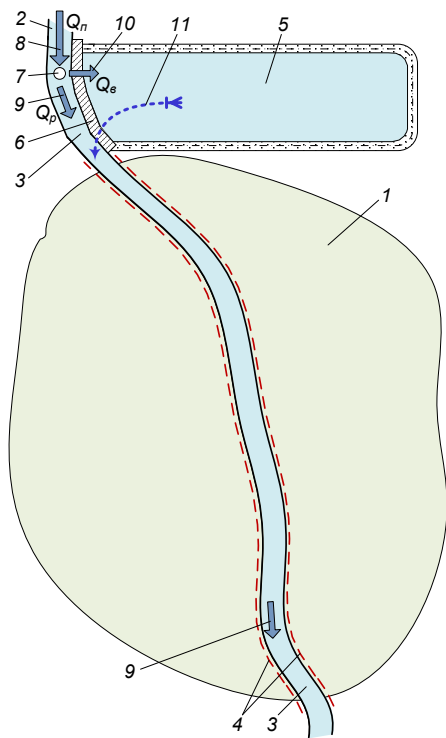
$$Q_n = Q_p + Q_b, \quad (6)$$

где Q_b – расчетный максимальный расход потока воды, направляемого в водохранилище.

В период наполнения водохранилища распределение потоков воды в точке бифуркации 7 водораспределительного сооружения 6 осуществляют, регулируя автоматически или вручную расходы воды Q_p и Q_b , с соблюдением условия (5), что обеспечивает защиту от затопления территории в зоне риска паводков 1.

Таким образом, превентивными мерами с использованием защитных гидротехнических сооружений по первой или второй альтернативе достигается необходимый эффект защиты территорий в зонах риска паводков, что практически исключает необходимость применения ситуационных мер.

Учитывая то, что строительство гидротехнических сооружений, предназначенных для превентивной защиты от паводков, требует значительных капиталовложений, возникает вопрос снижения их стоимости защитных сооружений при условии обеспечения ими необходимого уровня превентивной защиты территорий от паводков. Этого можно достичь двумя вариантами: оптимизацией конструктивно-технологических или функциональных параметров защитных гидротехнических сооружений. Данные варианты не исключают друг друга, но с позиций системного анализа приоритетным является второй вариант, поскольку функциональные параметры защитных сооружений, а именно показатели регулирования паводковых вод, занимают более высокий иерархический уровень по отношению к конструктивным и технологическим решениям.



- 1 – зона риска паводков,
- 2 и 3 – незащищенный и защищенный участок русла реки,
- 4 – защитные сооружения русла и берега реки,
- 5 – аккумуляционное водохранилище,
- 6 – водораспределительное сооружение,
- 7 – точка бифуркации паводкового потока,
- 8 и 9 – не регулированный и регулированный паводковый поток в реке,
- 10 – поток паводковых вод водохранилища,
- 11 – сброс воды из водохранилища в реку после прохождения паводка

Рисунок 4 – Схема комбинированной защиты территории в зоне риска паводков с использованием защитных гидротехнических сооружений

Для снижения стоимости строительства защитных сооружений путем оптимизации их функциональных параметров предложено использовать на стадии проектирования метод бифуркации базиса [6]. Он разработан на основе гипотезы снижения общих затрат на строительство защитных гидротехнических сооружений путем комбинированного применения превентивных мер защиты от паводков по первой (регулирование русла реки) и второй (строительство аккумуляционного водохранилища) альтернативе.

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. За базис принимают основной функциональный параметр паводка – установленный по гидрологическим прогнозам расчетный максимальный расход паводкового потока Q_n . При этом уравнение (6) бифуркации расхода Q_n паводкового потока принимают за уравнение бифуркации базиса. В случае комбинированного применения превентивных мер защиты от паводков (рис. 4), в соответствии с уравнением (6) бифуркации расхода Q_n , составляют уравнение бифуркации общих затрат на строительство системы комбинированной защиты от паводков:

$$Z(Q_n) = Z_p(Q_p) + Z_b(V_b), \quad (7)$$

где $Z(Q_n)$ – общие затраты на строительство системы комбинированной защиты от паводков;

$Z_p(Q_p)$ – затраты на выполнение мер защиты по первой альтернативе (регулирование русла реки защитными сооружениями 4);

$Z_b(V_b)$ – затраты на выполнение мер защиты по второй альтернативе (строительство водохранилища 5 и водораспределительного устройства 6), зависящие от объема водохранилища V_b .

Используя коэффициент бифуркации λ ($0 \leq \lambda \leq 1$), уравнения бифуркации базиса (6) и бифуркации строительных затрат (7) представляют в таком виде:

$$Q_n = Q_{p\lambda} + Q_{b(1-\lambda)}; \quad (8)$$

$$Z_\lambda = Z_{p\lambda} + Z_{b(1-\lambda)}, \quad (9)$$

где $Q_{p\lambda}$ – расход паводкового потока в реке, зависящий от Q_n и λ ;

$Q_{b(1-\lambda)}$ – расход части паводкового потока Q_n , направляемого в водохранилище, который зависит от $(1-\lambda)$;

Z_λ – общие затраты на выполнение комбинированной превентивной защиты от паводков, зависящие от λ ;

$Z_{p\lambda}$ – затраты на выполнение гидротехнических работ по регулированию русла реки, рассчитанные на пропуск руслом реки паводкового потока расходом $Q_{p\lambda}$;

$Z_{b(1-\lambda)}$ – затраты на строительство аккумуляционного водохранилища, зависящие от параметров расчетного гидрографа паводка и коэффициента $(1-\lambda)$.

Анализ строительных затрат в условиях неполного ($\lambda < 1$) выполнения защитных мер по первой и второй альтернативе показывает, что функции затрат $Z_{p\lambda}$ и $Z_{b(1-\lambda)}$ по аргументу λ являются вогнутыми.

Это значит, что в случае использования варианта комбинированной защиты от паводков вместо одной (первой или второй) альтернативы следует ожидать такого соотношения строительных затрат:

$$Z_\lambda < Z_p(Q_n); Z_\lambda < Z_b(V_b). \quad (10)$$

Пояснение в графическом виде гипотезы снижения стоимости строительства защитных сооружений с использованием метода бифуркации базиса приведено на рис. 5, на котором изображено два выполненных в одинаковом масштабе графика 1 и 2 функций $Z_{p\lambda}$ и $Z_{b(1-\lambda)}$. Оси аргументов 0λ и $0(1-\lambda)$ функций $Z_{p\lambda}$ и $Z_{b(1-\lambda)}$ направлены во взаимно противоположных направлениях и, ввиду их одинаковых масштабов, совмещены. В граничной точке $\lambda=0$ имеем: $Z_{p\lambda}=0$; $Z_{b(1-\lambda)}=Z_b(V_b)$, в граничной точке $\lambda=1$: $Z_{p\lambda}=Z_p(Q_n)$; $Z_{b(1-\lambda)}=0$.

Просуммировав графики 1 и 2 согласно уравнению (9), получим график 3 общих строительных затрат Z_λ для варианта комбинированной защиты от паводков. Очевидно, что при любом λ в диапазоне его значений ($0 \leq \lambda \leq 1$) для комбинированного варианта полностью достигается эффект защиты в зоне риска паводков, причем расход не превышает расчетный максимальный расход Q_n , принятый за базис.

Поскольку функции затрат $Z_{p\lambda}$ и $Z_{b(1-\lambda)}$ по первой и второй альтернативе вогнутые, то и функция Z_λ общих строительных затрат является вогнутой.

Далее предстоит задача определения для системы комплексной защиты от паводка расходом Q_n оптимальной величины коэффициента бифуркации λ_{opt} паводкового потока, при котором достигается минимум общих строительных затрат $Z_{\lambda min}$. Эта задача решается методом бифуркации базиса с использованием двух возможных алгоритмов.

С использованием первого алгоритма метода бифуркации базиса оптимальный коэффициент би-

фуркации λ_{opt} и минимум общих строительных затрат $Z_{\lambda min}$ находят путем пробных расчетов параметров сооружений и затрат на их строительство с применением метода наименьших квадратов. Для этого функциональную зависимость затрат Z_λ по аргументу λ аппроксимируют параболой:

$$Z_\lambda = a\lambda^2 + b\lambda + c. \quad (11)$$

Диапазон значений коэффициента бифуркации $0 \leq \lambda \leq 1$ произвольно делят на m расчетных точек, $i=1, m$.

Для каждого произвольно выбранного расчетного значения коэффициента бифуркации λ_i определяют распределение расхода Q_n паводкового потока:

$$Q_n = Q_{pi} + Q_{bi} = Q_n \lambda_i + Q_n (1-\lambda_i). \quad (12)$$

В соответствии с рассчитанными по формуле (12) расходами воды Q_{pi} и Q_{bi} определяют принципиальные проектные решения защитных сооружений по первой и второй альтернативе, конструктивные параметры сооружений и затраты на их строительство Z_{pi} и Z_{bi} . Затем определяют общие затраты Z_i на строительство гидротехнических сооружений по комбинированной альтернативе меры защиты:

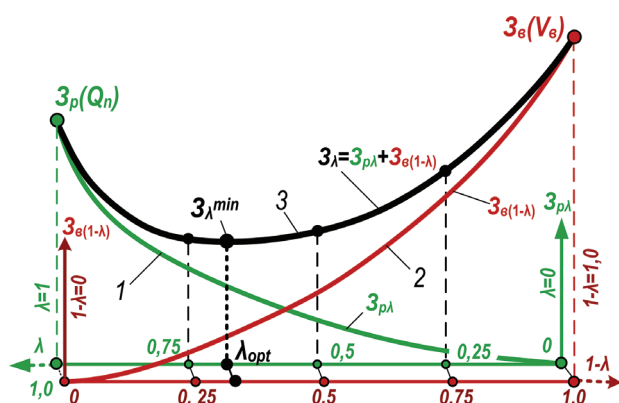
$$Z_i = Z_{pi} + Z_{bi}. \quad (13)$$

Используя набор m расчетных точек (Z_i, λ_i) , составляют функцию неувязки $F(a, b, c)$:

$$F(a, b, c) = \sum_{i=1}^m (a\lambda_i^2 + b\lambda_i + c - Z_i)^2 \rightarrow 0. \quad (14)$$

В результате преобразований функции (14) получают систему уравнений для определения по методу наименьших квадратов коэффициентов a, b, c функции (11):

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^m \lambda_i^4 + b \sum_{i=1}^m \lambda_i^3 + c \sum_{i=1}^m \lambda_i^2 = \sum_{i=1}^m \lambda_i^2 Z_i; \\ a \sum_{i=1}^m \lambda_i^3 + b \sum_{i=1}^m \lambda_i^2 + c \sum_{i=1}^m \lambda_i = \sum_{i=1}^m \lambda_i Z_i; \\ a \sum_{i=1}^m \lambda_i^2 + b \sum_{i=1}^m \lambda_i + c m = \sum_{i=1}^m Z_i. \end{cases} \quad (15)$$



- 1 – график функции затрат $Z_{p\lambda}$ по первой альтернативе защиты от паводков;
- 2 – график функции затрат $Z_{b(1-\lambda)}$ по второй альтернативе;
- 3 – график функции затрат Z_λ по комбинированной альтернативе защиты от паводков

Рисунок 5 – Графическая интерпретация гипотезы снижения общих затрат на строительство защитных гидротехнических сооружений путем комбинации первой и второй альтернативы выполнения превентивных мер защиты от паводков в речных бассейнах

Для определения λ_{opt} находят частную производную по λ функции (11) и приравнивают ее к нулю:

$$\frac{\partial Z_{\lambda}}{\partial \lambda} = 2a\lambda + b = 0, \quad (16)$$

откуда

$$\lambda_{opt} = -\frac{b}{2a}. \quad (17)$$

Подставив значение λ_{opt} из (17) в (11), получают минимальную величину затрат Z_{λ}^{min} на строительство гидротехнических сооружений по комбинированной альтернативе превентивной защиты от паводков:

$$Z_{\lambda}^{min} = c - \frac{b^2}{4a}. \quad (18)$$

К недостаткам первого алгоритма определения оптимального коэффициента бифуркации λ_{opt} и минимальной величины затрат Z_{λ}^{min} по комбинированной альтернативе превентивной защиты от паводков относится: необходимость выполнения большого количества пробных расчетов параметров сооружений и стоимости их строительства; необходимость получения высокой точности результатов пробных расчетов; сложность применения метода наименьших квадратов в реальных условиях проектирования.

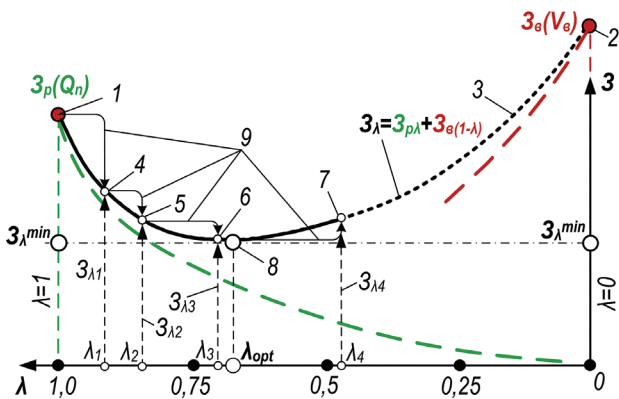
С использованием второго алгоритма метода бифуркации базиса оптимальный коэффициент бифуркации λ_{opt} и минимум общих строительных затрат Z_{λ}^{min} находят также путем пробных расчетов, но с применением вместо метода наименьших квадратов метода последовательного приближения (метода итераций).

Для этого строят систему координат λOZ (рис. 6). На координатной плоскости в точке $\lambda=1$ отображают

величину строительных затрат $Z_p(Q_p)$, необходимых для превентивной защиты от паводков только по первой альтернативе. В точке $\lambda=0$ отображают величину затрат $Z_b(V_b)$, необходимых для превентивной защиты от паводков только по второй альтернативе. Поиск λ_{opt} и Z_{λ}^{min} по комбинированной альтернативе превентивной защиты от паводков выполняют итерационными циклами 9 начиная с точки 1 ($\lambda=1$; $Z=Z_p(Q_p)$) или 2 ($\lambda=0$; $Z=Z_b(V_b)$). Для повышения эффективности поисковой стратегии поиск λ_{opt} и Z_{λ}^{min} методом последовательного приближения следует начинать с граничной точки графика затрат Z_{λ} , имеющей меньшую ординату (на рис. 6 точка 1).

На оси $O\lambda$, начиная с точки 1 ($\lambda=1$), выделяют ряд точек $1 > \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_4 > \dots$, в которых последовательно, пользуясь формулой (13), определяют затраты Z_i по комбинированной альтернативе защиты от паводков. При этом затраты Z_i до некоторой критической точки (точка 6 с ординатой Z_{λ_3}) образуют убывающий ряд $Z_p(Q_p) > Z_{\lambda_1} > Z_{\lambda_2} > Z_{\lambda_3}$. Затем, обнаружив тенденцию возрастания затрат в следующей за критической точкой (точка 7, $Z_{\lambda_3} < Z_{\lambda_4}$), координаты критической точки (λ_3 ; Z_{λ_3}) предварительно принимают за оптимальные. Далее, проводя дополнительные более точные расчеты параметров системы в окрестности критической точки, методом последовательного приближения находят точку экстремума (точка 8).

Второй алгоритм определения оптимальных параметров комбинированной альтернативы защиты от паводков отличается от первого более удобной и доступной в условиях проектирования поисковой стратегией. Кроме того, он менее трудоемкий, поскольку при его применении необходимо выполнять глубокие исследования и точные расчеты параметров системы только вблизи критической точки.



- 1 – величина затрат $Z_p(Q_p)$ на выполнение мер защиты от паводков по первой альтернативе;
- 2 – величина затрат $Z_b(V_b)$ на выполнение мер защиты от паводков по второй альтернативе;
- 3 – график функции затрат Z_{λ} по комбинированной альтернативе выполнения мер защиты от паводков;
- 4–7 – результаты пробных расчетов затрат Z_{λ_i} ;
- 8 – точка экстремума функции Z_{λ} ;
- 9 – итерационные циклы

Рисунок 6 – Схема определения оптимального коэффициента бифуркации паводкового потока и минимальных строительных затрат по комбинированной альтернативе защиты от паводков путем пробных расчетов с использованием метода последовательного приближения

Заключение

Статистические данные последствий прохождения паводков в Украине свидетельствуют о необходимости выполнения соответствующих мер защиты. Ввиду того, что они не имеют коммерческой привлекательности для частных инвесторов, их финансируют за счет средств из государственного бюджета. В связи с этим научное обоснование технически надежных и экономически эффективных мер защиты является важной общегосударственной задачей.

Выделено два основных типа мер защиты от паводков: ситуационные и превентивные. Согласно предложенному функционально-стоимостному принципу оценки этих мер, в зонах риска интенсивных часто повторяющихся паводков превентивные меры являются более эффективными, по сравнению с ситуационными.

Выделено две основные, функционально противоположные по характеру выполнения, альтернативы превентивных мер защиты от паводков с использованием гидротехнических сооружений, первая из которых – увеличение пропускной способности русел рек в зонах риска паводков, а вторая – уменьшение максимальных расходов паводковых

потоков в зонах риска с помощью аккумуляционных водохранилищ. Выдвинута гипотеза и доказана возможность снижения общих затрат на строительство защитных гидротехнических сооружений путем комбинации первой и второй альтернативы.

Оптимальное распределение паводковых потоков с применением комбинированной альтернативы предложено осуществлять новым способом – методом бифуркации базиса.

Для его практического применения на стадии проектирования систем превентивной защиты от паводков в речных бассейнах предложено два алгоритма, предусматривающих выполнение пробных расчетов стоимости строительства защитных гидротехнических сооружений в зависимости от коэффициента распределения расходов регулируемых ими паводковых потоков. По первому алгоритму обработке результатов пробных расчетов предложено выполнять методом наименьших квадратов, а по второму – методом последовательного приближения. Второй алгоритм отличается от первого более удобной и доступной для проектировщиков поисковой стратегией.

Библиографический список

1. Авакян, А. Б. Наводнения / А. Б. Авакян, А. А. Полюшкин // Природа. – 1990. – № 8. – С. 12-20.
2. Козьменко, С. Н. Экономика катастроф (инвестиционные аспекты) / С. Н. Козьменко. – Киев: Наукова думка, 1997. – 204 с.
3. Протипаводковий захист. Інформаційно-аналітична довідка щодо проблем комплексного протипаводкового захисту територій регіонів України від катастрофічних паводків та мінімізації збитків від шкідливої дії вод [Електронний ресурс] : Протипаводковий захист / Державне агентство водних ресурсів України. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.scwm.gov.ua/index.php>.
4. Швец, Г. И. Выдающиеся гидрологические явления на юго-западе СССР / Г. И. Швец. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 512 с.
5. Петроченко, В. И. Научно-методическое обоснование систем превентивной противопаводковой защиты территорий в бассейнах рек / В. И. Петроченко, А. В. Петроченко // Вестник Брестского государственного технического университета – 2018. – № 2 (110): Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика – С. 44-48.
6. Петроченко, В. І. Метод біфуркації базису та його застосування при розробці проектів захисту від шкідливої дії вод / В. І. Петроченко // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «Водні ресурси України та меліорація земель» / Держводагентство України, ІВПіМ НААН. – К., 2013. – С. 12-14.

Поступила 10.06.2019