

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА В БАССЕЙНАХ МАЛЫХ РЕК

Фам Нгок Киен, аспирант

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

Аннотация

В статье наряду с общим алгоритмом оптимизации водохозяйственного комплекса малых рек приводятся основные критерии методики оптимизации, состав необходимых исходных данных и анализируется влияние основных факторов на выбор оптимального решения, т.е. на определение оптимальной емкости водохранилища и площади орошаемых земель.

Ключевые слова: водохранилище, водохозяйственный комплекс, критерий оптимизации, орошение, борьба с наводнением, водопользователь

Abstract

Fam Ngok Kien

METHOD FOR OPTIMIZING BASIC PARAMETERS OF WATER RESOURCES SYSTEM IN BASINS OF SMALL RIVERS

In this article along with overall optimization algorithm of water utilization system in small rivers, the conditions for application of the proposed criterion, the composition of the required input data are included and the impact of the major factors in the selection of optimal solutions is analyzed, i.e. to determine the optimal capacity of the reservoir and the area of irrigated land.

Keywords: reservoir, water management complex, optimization criterion, irrigation, controlling floods, water user

Введение

В настоящее время перед Вьетнамом и рядом других государств стоит актуальная задача по оптимизации параметров водохозяйственного комплекса (ВХК) в бассейнах больших, средних и малых рек. В регионах с интенсивным развитием орошения в условиях ограниченных водных ресурсов для бассейнов малых рек основными параметрами ВХК являются емкость водохранилища комплексного назначения и площадь земель, орошаемых за счет регулирования речного стока. Для обоснования оптимальных значений этих параметров на протяжении многих десятилетий, как правило, используется (в последние годы – в модифицированном виде) один из двух критериев оптимизации: минимум дисконтированных затрат или максимум чистого дохода [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Однако эти критерии требуют наличия достоверной информации о зависимостях единовременных и ежегодных экономических затрат на водохозяйственные мероприятия (или экономической выгоды от их реализации) от параметров водохозяйственных сооружений и устройств, например, от емкости водохранилищ. В последние годы сбор и обобщение исходных данных связан с большими трудностями, так как экономическая информация, часто становится коммерческой тайной. В этих условиях для принятия приемлемого решения целесообразно использовать «технические» критерии оптимизации. Один из таких критериев,

разработанный автором настоящей статьи [7], послужил основой предлагаемой методики оптимизации параметров ВХК применительно к бассейнам малых рек с преобладающим использованием их водных ресурсов на нужды орошения. Особое внимание уделено учету особенностей малых рек (прежде всего зависимости потребностей в воде на орошение от выпадающих осадков, а тем самым и от величины речного стока).

Основные положения методики:

Учет особенностей малых рек при обосновании состава и параметров ВХК

В водосборах малых рек предгорных районов Вьетнама формирование речного стока происходит быстро и существенно зависит от выпадающих осадков. Величина речного стока четырех многоводных месяцев сезона дождей (август-ноябрь) составляет 50-60% общего годового стока, а четырех маловодных месяцев сухого сезона (февраль-май) – лишь 12-14%. Но даже в маловодные периоды выпадающие осадки активно используются на сельскохозяйственные нужды, что должно учитываться при определении потребностей в воде на нужды орошения.

На малых реках воздействие хозяйственной деятельности, как правило, проявляется четко и в сравнительно короткие сроки. Обычно оно зависит от деятельности лимитирующего водопользователя, которым в рассматриваемом регионе в большинстве

случаев является орошение. Кроме орошения на величину речного стока оказывают существенное влияние объемы воды, забираемой в бассейнах малых рек для водоснабжения промышленности, городского и сельского хозяйства (не только из русел, но и подземных источников, гидравлически связанных с реками).

Как и в юго-западных районах Беларуси, в бассейнах малых рек Вьетнама достаточно высока вероятность затоплений ценных пойменных земель и прилегающих к ним территорий. Но борьба с наводнениями не является главным участником ВХК. Наоборот, создание водохранилищ для срезки пика катастрофических расходов воды даёт возможность увеличить подачу воды из верхнего бьефа и попуск воды в нижний бьеф водохранилища в интересах других водопользователей.

Малые реки, как правило, используются для рекреации, любительского рыболовства, водного спорта. Судходство и лесосплав на малых реках как в Беларуси, так и во Вьетнаме не практикуется. Создание ГЭС на малых реках Беларуси практически невозможно (по морфометрическим характеристикам), а во Вьетнаме гидроэнергетика может быть ведущим участником ВХК, но только в бассейнах горных районов, а в предгорных районах ГЭС в наиболее благоприятных створах уже построены.

Требования рыбного прудового хозяйства не противоречат требованиям других участников ВХК, так как наполнение рыбоводных прудов производится в многоводные периоды. Во Вьетнаме этот вид водопользования менее актуален в связи с тем, что основной улов рыбы производится в море и в устьях больших рек, а пресноводная рыба выращивается в наливных прудах и в рисовых чеках.

Водопользование в бассейнах малых рек предгорных районов Вьетнама практически невозможно без регулирования речного стока, поскольку суммарные потребности в воде (в основном на нужды орошения) не покрываются выпадающими в вегетационные периоды осадками, а речной сток в эти периоды недостаточен.

Для бассейнов малых рек Вьетнама и Беларуси, в которых лимитирующим водопользователем является орошение, большинство параметров ВХК (объемы забора воды на другие нужды; гарантированные расходы воды в руслах рек по экологическим и другим требованиям) должно определяться согласно действующим национальным стандартам, а вели-

чина этих параметров служить ограничительными условиями для оптимизации важнейших параметров: емкости водохранилища комплексного назначения и площади орошаемых земель. В математических моделях оптимизации этих параметров ВХК дополнительно следует учитывать используемые в проектной практике зависимости потребностей в воде на орошение от осадков, выпадающих в течение вегетационного периода.

Взаимосвязь потребностей в воде на орошение и речного стока

Потребности в воде на нужды орошения зависят не только от культур, климата, но и от выпадающих осадков [8, 9, 10, 11, 12]. Но осадками практически невозможно управлять. Однако выпадающие осадки в свою очередь формируют речной сток, а стоком рек управлять можно с помощью его регулирования (создание водохранилищ). Поэтому важно знать, каким образом величина речного стока связана с потребностями в воде на орошение, что особенно актуально для бассейнов рек предгорных районов Вьетнама, где в течение года собирают два-три урожая, а сток рек в различные вегетационные периоды может существенно (до 10 и более раз) отличаться. В результате исследований по этому вопросу автором получена [12] следующая расчетная формула:

$$X_{IRR}^i = A^i - \bar{k} \cdot R^i \geq 0 \quad (1)$$

где: X_{IRR}^i – количество воды, которое необходимо подать на орошаемое поле в течение расчетного интервала времени (i - го месяца или i - ой декады); A^i – количество воды, требуемой растениям; R^i – слой речного стока; \bar{k} – виртуальный коэффициент, характеризующий соотношение между количеством воды, потребляемой культурами за счет эффективных осадков на рассматриваемой площади орошения, и речным стоком, который мог бы сформироваться от всех осадков, выпадающих на этой площади. В малых речных бассейнах горных районов саморегулирующая способность рек невелика и существенных различий между режимами речного стока и осадков не имеется (рисунок 1), так как отклонение во времени, необходимым на их формирование небольшое.

По формуле (1) при одной и той же независимой величине A , при минимальном речном стоке необходимый объем воды на нужды орошения будет достигать максимума, и наоборот, при большой величине речного стока потребность в воде на оро-

шение X_{IRR} стремится к нулю. Следовательно, в период сезона дождей, когда необходимость полива сельскохозяйственных культур отсутствует, эта связь может и не учитываться. Но в сухой сезон учитывать данную связь обязательно.

Таким образом, в математической модели оптимизации объема воды на нужды орошения це-

лесообразно определять не только с учетом их внутригодового распределения, но и с учетом распределения речного стока, зависящего от выпадающих осадков. Типичный график соотношения между потребностями в воде на орошение и речным стоком представлен на рисунок 2.

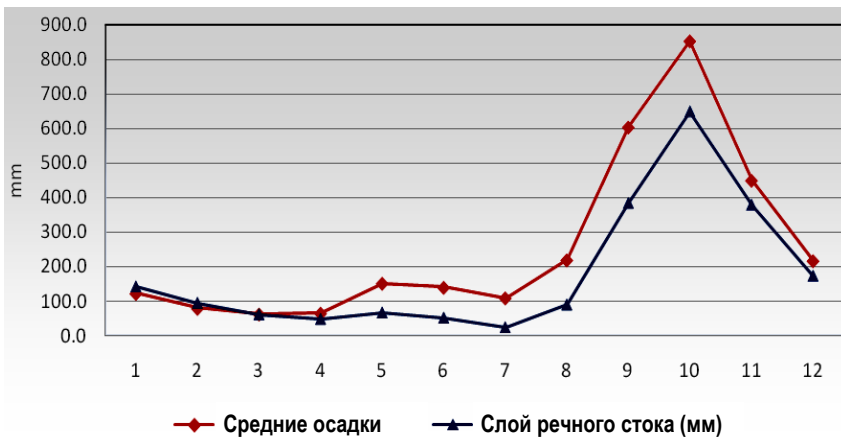
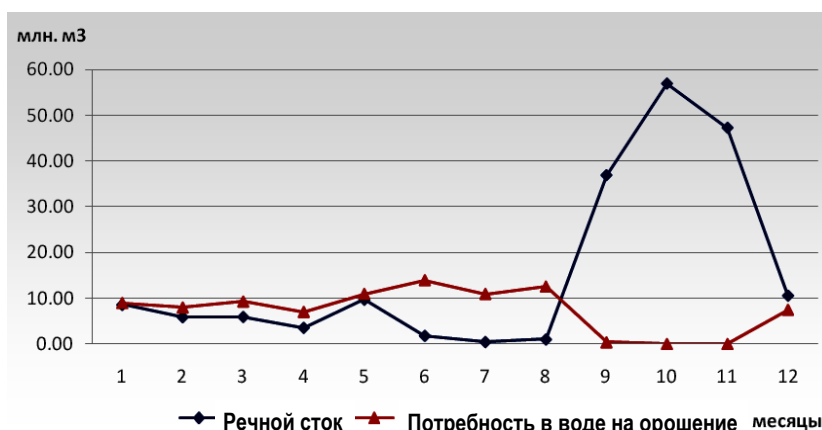


Рисунок 1 - График режимов осадков и речного стока бассейна Шонграк

Рисунок 2 – Графики потребностей в воде на орошение и речного стока Шонграк



Критерий оптимизации параметров ВХК:
 С середины прошлого столетия [4] наиболее распространенным критерием оптимальности параметров ВХК являлся минимум приведенных затрат, который в последние годы [5, 6] модифицирован в минимум дисконтированных затрат при заданных объемах водопользования или максимум дохода за расчетный период времени. Однако применение этих «классических» критериев оптимальности связано с большими трудностями (особенно в последние годы), что связано как с повышением погрешности экономических показателей (вследствие инфляции, изменения ставок по кредитам, дефолтов и т.д.), так и с преднамеренным сокрытием экономических данных. Поэтому построить необходимые для оптимизации функции экономических затрат от водохозяйственных параметров в большинстве случаев не представляется возможным. В условиях ограниченности или

большой погрешности исходных данных о зависимостях экономических показателей от водохозяйственных параметров предлагается критерий оптимизации (K) [7], зависящий от степени регулирования речного стока и площади орошения, который определяется в виде следующей целевой функции:

$$K(F_{op}) = \frac{W_{e.op} + W_{ex}^{Hny}}{F_{op}} \rightarrow \min \quad (2)$$

при $F_{max} \geq F_{op} \geq F_{e.op}$,
 где $W_{e.op}$ – свободный остаточный естественный речной сток (м³), предназначенный для орошения (с учетом удовлетворения обязательных потребностей других участников ВХК);
 W_{ex}^{Hny} – полный объем водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ, м³), который определяется в результате расчета регулирования речно-

го стока маловодного года;

F_{op} – общая площадь, поливаемая в течение года (га),

$F_{e.op}$ – площадь орошения, гарантированная за счет естественного речного стока (га);

$F_{мак}$ – максимальная орошаемая площадь, которая определяется или исходя из максимума располагаемых водных ресурсов, т.е. площади земель, полив которых может быть обеспечен за счет всего (естественного и регулируемого) речного стока при выполнении требований других участников ВХК, или максимальной площадью пригодных для орошения земель.

Принципиальное отличие предлагаемого критерия оптимальности состоит в том, что он реализуем при отсутствии достоверной исходной экономической информации и ориентирован на оптимизацию не полезного, а полного объема водохранилища, от величины которого зависят потери воды на фильтрацию и дополнительное испарение с водной поверхности, степень заиления водохранилища, а также экономические затраты на создание и эксплуатацию водохранилища.

При отсутствии водохранилища выражение (2), т. е. критерий K , фактически является средне-взвешенной нормой орошения. С увеличением полной емкости водохранилища критерий K вначале возрастает, поскольку полезная емкость близка к нулю и площадь орошения практически не изменяется, а затем (после достижения УМО) постепенно снижается и достигает своего минимума (но не превышая норму орошения) в районе НПУ, которым тоже можно варьировать. Критерий начинает снова возрастать, когда с увеличением полной емкости водохранилища ее полезная емкость увеличивается в гораздо меньшей степени вследствие значительной площади затоплений и роста дополнительного испарения с водной поверхности.

В большинстве речных бассейнов выращивается несколько (например – k) разных культур. Если на одной посевной площади собирается 2 или 3 урожая, то расчетная площадь культуры соответственно увеличивается. Тогда общая орошаемая в течение года площадь F_{op} ($F_{e.op}$ или $F_{мак}$) определяется по формуле

$$F_{op} = \sum_{i=1}^n F_i,$$

где n – количество культур; F_i – площадь каждой орошаемой культуры.

Фактически экономическая эффективность и норма орошения на единицу площади разных культур отличаются. В этом случае для рационализации расчета общей площади (F_{op}) целесообразно преобразовать площадь каждой культуры на основную (доминирующую) культуру (F_1) с учетом её экономической эффективности и нормы орошения на единицу площади, тогда общую поливаемую в течение года площадь можно вычислить по следующей формуле:

$$F_{op} = \sum_{i=1}^n (\beta_i \cdot F_i), \text{ и } \beta_i = \frac{E_i}{E_1} \cdot \frac{Q_1}{Q_i}$$

где β_i – эквивалентные коэффициенты площадей, приведенных к основной культуре; E_1 и E_i – показатель экономической эффективности (например, чистый доход) на единицу площади основной (E_1) и каждой (E_i) культур; Q_1 и Q_i – их норма орошения в течение выращивания урожая. При отсутствии исходной информации для определения эквивалентности культур $\beta_i = 1 \text{ const}$.

При реализации целевой функции (2) необходимо соблюдать следующие ограничения:

1. Полезный объем водохранилища, необходимый для покрытия дефицита воды в маловодный год расчетной обеспеченности, должен определяться из уравнения водохозяйственного баланса:

$$W_{ex(t+1)} = W_{ex(t)} + W_{реч.(t)} - W_{op(t)} - W_{ном(t)} - W_{б.н.(t)} - W_{н.н.(t)} - W_{сбp.(t)} \quad (3)$$

при $W_{ex.}^{УМО} \leq W_{ex.(t)} \leq W_{ex.}^{НПУ}$,

где t – порядковый номер расчетного интервала времени (по месяцам, $t=1, 12$);

$W_{ex(t+1)}$; $W_{ex(t)}$ – объемы водохранилища в конце и начале расчетного интервала.

$W_{реч.(t)}$ – объем речного стока в t -ый месяц;

$W_{ном(t)}$ – объем воды, теряемой в водохранилище (дополнительное испарение с водной поверхности и потери на фильтрацию);

$$W_{ном.(t)} = F_{ex-сред.t} \cdot \Delta Z_t + \alpha \cdot W_{ex-ср.t},$$

где $F_{ex-сред.t}$ – средняя в расчетном интервале времени площадь зеркала водохранилища; ΔZ_t – дополнительное испарение на единицу площади зеркала; α – коэффициент потерь на фильтрацию, зависящий от гидрогеологических условий водохранилищ; $W_{ex-ср.t}$ – средний в расчетном интервале объем водохранилища;

$W_{б.н.(t)}$ – безвозвратное водопотребление других (кроме орошения) участников ВХК, осуществляющих изъятие воды из водного источника (водоснабжение городского и сельского населения, промышленное водоснабжение, заполнение рыбных прудов);

$W_{н.н.(t)}$ – попуск воды в русло нижнего бьефа по требованиям других водопользователей (без изъятия воды из источника), который принимается равным максимуму объема воды для охраны природы, рекреации, рыбного хозяйства, гидроэнергетики и обеспечения водопользования на нижерасположенной территории или территории другого государства за каждый расчетный интервал времени.

$W_{оп(t)}$ – потребность в воде на нужды орошения, которая определяется на основе данных о планируемых площадях орошаемых земель, составе сельскохозяйственных культур и нормах орошения

$$W_{обр.(t)} = \text{максимум} \left[\begin{array}{l} (W_{ex.(t)} + W_{реч.(t)} - W_{оп.(t)} - W_{ном.(t)} - W_{б.н.(t)} - W_{н.н.(t)}) - W_{ex.}^{нпу}; \\ 0 \end{array} \right] \quad (4)$$

$W_{ex.}^{умо}$ – минимальный объем водохранилища, принимаемый равным мертвому объему,

$W_{ex.}^{нпу}$ – объем водохранилища при нормальном подпорном уровне, и тогда $W_{ex.}^{нп} = W_{ex.}^{нпу} - W_{ex.}^{умо}$

2. Емкость водохранилища должна быть достаточной для срезки пика катастрофических расходов (для предотвращения ущербов от наводнений и затоплений).

$$W_{ex.}^{нав.} \geq W_{ex.}^{ак} \quad (5)$$

где $W_{ex.}^{нав.}$ – необходимый для борьбы с наводнениями полезный объем водохранилища при нормальном подпорном уровне;

$W_{ex.}^{ак}$ – объем воды, аккумулируемой водохранилищем при нормальном подпорном уровне (без учета форсированного объема) в период паводка расчетной обеспеченности, при котором гарантируется не превышение уровней воды (или допустимого расхода $q_{мак}$) в нижнем бьефе для предотвращения недопустимых затоплений пойм и прилегающих территорий. Величины аккумулируемого объема воды и допустимого расхода $q_{мак}$ в нижнем бьефе опреде-

по каждой культуре, с учетом асинхронности речного стока и засушливости на территории орошаемого поля [12].

$$W_{оп.(t)} = \sum_{i=1}^n (q_{i(t)} \cdot F_i),$$

где n – количество типа культур года; i – порядковый номер расчетной культуры ($i=1-k$); $q_{i(t)}$ – нормативный объем воды на единицу орошаемой площади i -ой культуры и t -ого интервала времени ($t=1-12$, в вегетационный период $q_i \geq 0$, а в другие месяцы $q_i = 0$); F_i – площадь каждой орошаемой культуры.

$W_{сбр.(t)}$ – вынужденный («холостой») сброс воды через сбросные сооружения при полном заполнении водохранилища, включая форсированный объем, который временно учитывается в коротком интервале времени паводка, а потом сразу направляется в нижний бьеф.

ляются расчетом трансформации паводка водохранилищами [5].

В оптимизационных расчетах значение $W_{ex.}^{нп}$ принимается как наибольшее из определенных, согласно ограничениям (3) или (4).

3. Нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища не должен превышать отметок, при которых возможны затопления особо ценных угодий, площадей промышленных и социальных объектов, культурных и исторических памятников, а уровни и расходы воды в нижнем бьефе должны быть не ниже значений, регламентированных международными обязательствами, общественными, этическими, эстетическими и другими принципами и правилами [13].

Для выполнения расчетов по критерию (2) необходимы сведения о потребностях в воде на нужды орошения (по месячным или декадным интервалам времени) в зависимости от осадков, выпадающих в вегетационный период [9, 11, 12, 14, 15]; потребностях в воде других водопользователей (населения, промышленности, рыбного прудового хозяйства); ресурсах речного стока по месячным или декадным интервалам времени в расчетный маловодный год; морфометрическим характеристикам водохранилищ и затопляемых пойм рек; взаимосвязи полного и

полезного объема водохранилища (учитывающие процессы заиления и требования охраны природы); зависимостям потерь на фильтрацию и дополнительное испарение с поверхности водохранилищ от их объема.

При проведении оптимизационных расчетов по предлагаемому критерию с учетом вышеприведенных ограничений приняты следующие допущения и упрощения:

1. Рассматривается бассейн малой реки, в которой лимитирующими водопользователями являются орошение и борьба с наводнениями.

2. Сопоставление планируемых потребностей в воде и располагаемых водных ресурсов производится для расчетного маловодного года (во Вьетнаме – года 80%-ой обеспеченности).

3. Суммарное количество воды, которое может дать источник за декаду, месяц, вегетационный период и год в целом, превышает суммарные потребности в воде других (кроме орошения) водопользователей, а орошение производится за счет естественного или регулируемого речного стока при избытке воды для удовлетворения обязательных требований других водопользователей.

4. Требования обеспечения надлежащего качества воды в источнике учитываются только в размере минимального расхода воды для разбавления сточных вод, очищенных по прогрессивным технологиям, экономическое обоснование которых выходит за рамки данной статьи.

5. Оптимизируемыми параметрами являются: емкость водохранилища и площадь орошения за счет регулирования стока этим водохранилищем. Редкие случаи создания каскада водохранилищ на малой реке не рассматриваются.

6. Величина подачи воды на орошение зависит только от площади орошения, т. е. предполагается, что кроме влагообеспеченности все другие факторы оптимальны или не лимитируют рост и развитие растений.

7. При небольшой площади водосбора осадки распределяют равномерно.

8. Регулирование водопользования за пределами нормативной расчетной обеспеченности (в катастрофически маловодном году в условиях острого дефицита водных ресурсов) не рассматривается.

С учетом принятых допущений и упрощений

алгоритм оптимизации параметров ВХК сводится к выполнению следующих шагов:

Шаг 1. Сбор, анализ и переработка вышеперечисленных исходных данных.

Шаг 2. Определение конкретных значений ограничительных условий: расчета объема водохра-

нилища для борьбы с наводнениями $W_{вх}^{ак}$, исходя из особенностей формирования паводков и возможностей создания водосбросных устройств; определение максимальной возможной орошаемой площади $F_{мак}$, определенной из максимума используемого речного стока и потенциала мелиоративных земель; определение минимальной орошаемой площади $F_{мин}$, гарантированной за счет естественного речного стока, а также площади орошения $F_{е.ор}$ при минимальных требованиях производства продовольствия. Соответственно значениям $F_{мин}$ и $F_{мак}$ определяются (формула 3) экстремальные значения полезного объема водохранилища.

Шаг 3. Вычисление критерия оптимальности K_i по целевой функции (1) в следующем порядке: *Во-первых*, принятие интервалов изменения и диапазона рассматриваемых орошаемых площадей F_i от $F_{мин}$ до $F_{мак}$. *Во-вторых*, для каждой площади F_i рассчи-

тывается соответственно полезная емкость $W_{вх-i}^{пл}$ при регулировании стока маловодного года (формула 2). В процессе расчета регулирования стока определяются потери на дополнительное испарение и фильтрацию с учетом принятого значения мертвого объема. *В-третьих*, при каждом значении площади орошения F_i рассчитывается показатель K_i по формуле (2) [7].

Шаг 4. Уточнение K_i согласно главным ограничительным условиям: в этом шаге определяются

оптимальные параметры полезного объема $W_{вх-оп}^{пл}$ и площади орошения $F_{ор-оп}$. При этом могут быть следующие случаи:

$$\text{если } W_{вх}^{нав.} \geq W_{вх-мак}^{пл}, \text{ то } W_{вх-оп}^{пл} = W_{вх}^{нав.} \\ \text{и } F_{ор-оп} = F_{мак};$$

если $W_{вх-мин}^{пл} < W_{вх}^{нав.} < W_{вх-мак}^{пл}$, то $W_{вх-оп}^{пл}$ и $F_{ор-оп}$ определяются по точке $K_{мин}$, находящийся меж-

ду точками соответственно $W_{вх}^{ак}$ и $W_{вх-мак}^{пл}$;

если $W_{вх}^{наб.} < W_{вх-мин}^{пл}$, то $W_{вх-оп}^{пл}$ и $F_{ор-оп}$ определяются по точке $K_{мин}$, как находящийся между точками соответственно $W_{вх-мин}^{пл}$ и $W_{вх-мак}^{пл}$.

Шаг 5. Оценка результатов и принятие окончательного решения.

Апробация методики на конкретных объектах

В настоящее время во Вьетнаме имеется около 600 водохранилищ (водоемов емкостью больше 1 млн. м³), предназначенных для орошения. Ряд объектов строится, а другие находятся в стадии проектирования. Для апробации предложенного критерия оптимальности выбраны два объекта, которые являются наиболее типичными по естественным условиям и особенностям водопользования в водосборах малых рек: Шонграк и Банмонг в предгорных районах Вьетнама.

Первый объект – это существующее водохранилище Шонграк, построенное в 1986 году для орошения земель в провинции Хатинь (центральный район) Вьетнама. В настоящее время спрос на воду увеличивается, задачи и роль водохранилища изменяются. Поэтому разрабатывается проект реконструкции водохранилища Шонграк. Площадь водосбора бассейна – 115 км², среднегодовое количество осадков – 3066 мм, среднегодовой расход – 7,92 м³/с. Задачами объекта являются: орошение со сбором двух урожаев (8150х2 га); водоснабжение населения и промышленности (12000 м³/сут.), а также рыбного прудового хозяйства (0,78 млн. м³/год), уменьшение ущерба от наводнений [16].

При учете только первого ограничения (обязательности покрытия дефицита воды) рекомен-

дуемого критерия значения полной емкости водохранилища рассматриваются в диапазоне от 12,23 до 150,68 млн.м³. В этом диапазоне получена экстремальная точка при $K_{мин} = 5,052$ и $W_{пол} = 31,94$ млн.м³, $W_{пл} = 16,33$ млн.м³, $F_{ор} = 6590$ га. Однако в реальном проекте Шонграк имеется дополнительное ограничение по минимально необходимой для производства продовольствия площади орошения – 13040 га, а ограничение по требованиям борьбы с наводнениями не является безусловным (соблюдается лишь принцип «чем больше объем аккумулируемой воды для предотвращения паводков, тем лучше». Тогда оптимальное значение емкости водохранилища изменяется. Для это случая оптимальные значения параметров следующие: $K_{мин} = 6,565$ 10³м³/га; $W_{пол} = 84,61$ 10⁶м³; $W_{пл} = 52,20$ 10⁶м³; $F_{ор} = 13040$ га (таблица 1, рисунок 3).

Второй объект – Банмонг расположен на 7 км выше города Шонла в северной области Вьетнама. Площадь водосбора бассейна – 161 км², среднегодовое количество осадков – 1272 мм, среднегодовой расход – 2,68 м³/с. Задачами ВХК этого объекта являются: борьба с наводнениями при речном стоке 5%-ой обеспеченности с обеспечением уровней воды в центре города не более 595,4 м; орошение сельскохозяйственной культуры (1210 га); водоснабжение населения и промышленности (27500 м³/сут.); минимальный расход в нижнем бьефе для охраны природы в размере 0,40 м³/с; а также малая ГЭС до 1000 кВт [17].

Для объекта Банмонг при рассмотрении только главных ограничений критерия: полного покрытия дефицита (первого ограничения) и борьбы с навод-

Таблица 1 – Результаты расчета по целевой функции. Проект Шонграк

ПАРАМЕТРЫ	Разные уровни параметров									
	12,23	19,14	25,63	31,94	44,35	64,25	84,61	114,91	129,87	150,68
$W_{пол.}$ (10 ⁶ м ³)	12,23	19,14	25,63	31,94	44,35	64,25	84,61	114,91	129,87	150,68
$W_{пл.}$ (10 ⁶ м ³)	1,76	4,74	10,57	16,33	22,05	33,50	52,20	71,57	100,07	114,18
$W_{умо}$ (10 ⁶ м ³)	7,49	8,56	9,30	9,89	10,85	12,05	13,04	14,85	15,69	16,78
$F_{ор}$ (га)	1630	3260	4890	6520	8150	10595	13040	16300	17930	20212
K (10 ³ м ³ /га)	14,67	6,177	5,446	5,052	5,565	6,158	6,565	7,111	7,299	7,504

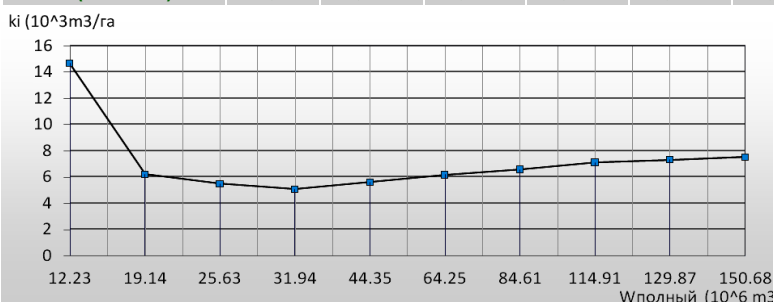


Рисунок 3 – Кривая изменения критерия K объекта Шонграк

нениями (второго ограничения), оптимальное значение находится в конце кривой ($K_{мин} = 9,99$). Однако при рассмотрении дополнительного ограничения (максимальная возможная площадь орошаемых земель – 1815 га) оптимальное значение емкости водохранилища изменяется. Таким образом, с учетом вышеупомянутых ограничений получены оптимальные значения параметров:

$$K_{мин} = 12,61 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{га}; W_{пол} = 14,0 \cdot 10^6 \text{ м}^3;$$

$$W_{пл} = 6,1 \cdot 10^6 \text{ м}^3; F_{ор} = 1815 \text{ га (таблица 2, рисунок 4).}$$

Для подтверждения корректности предлагаемого критерия необходимо сравнить результат расчета по данному критерию с результатом расчета традиционными методами по экономическим критериям, (минимуму дисконтированных затрат или максимуму дисконтированного дохода). В данной работе использован критерий максимума индекса рентабельности (PI) применительно к двум объектам, по которым имелась относительно достоверная экономическая информация. Для вычисления индекса рентабельности использована следующая формула:

$$PI = \frac{PV}{I} = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{(C - I_k) \cdot F_{ор} - PV_0}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{(I_c + I_{р,t} + I_{эк,t})}{(1+i)^t}}, \quad (6)$$

где **PI** – индекс рентабельности инвестиций; **PV** – сумма дисконтированных денежных потоков (дисконтированная прибыль - долл.); **I** – сумма дисконтированных затрат на строительство и эксплуатацию объекта (долл.); **N** – расчетная продолжительность годового проекта ($N = 30$ лет); **t** – коэффициент – $t=1-30$, обозначающий интересующий инвестора период (момент расчетного года); **i** – ставка обесценивания капитала за данное время (показатель инфляции), $i=10\%$; **C** – выручка на единицу орошаемой площади (долл./га), зависящая от средней урожайности и стоимости продукции (в настоящее время соответственно 7-7.5 тонн риса на 1 га и ~300 долл. за 1 тонн); **I_k** – сумма сельскохозяйственных затрат для выращивания урожая на единицу орошаемой площади, долл./га, (затраты на семена, удобрения, оплату труда, машины и т.д.; $I_k = (45-50\%)$); **F_{ор}** – площадь орошаемых земель (га); **PV₀** – прибыль каждого года при отсутствии водохранилища (орошении за счет естественного речного стока, долл.); **I_c** – единовременные инвестиции (долл.), которые зависят от оптимизируемых параметров ВХК: площади орошения (линейная зависимость) и емкости водохранилища (зависимость вида $I_c = f(w, n)$, где n – коэффициент, учитывающий снижение удельных затрат; **I_{р,t}** – затраты на капитальный ремонт (долл.); **I_{эк,t}** – остальные эксплуатационные затраты каждого года (долл.).

Таблица 2 – Результаты расчета по целевой функции. Проект Банмонг

ПАРАМЕТРЫ	Разные уровни параметров											
	5,6	6,2	8,1	10,4	14,0	17,6	22,3	26,8	31,1	35,4	39,8	
W_{пол}, (10⁶м³)	5,6	6,2	8,1	10,4	14,0	17,6	22,3	26,8	31,1	35,4	39,8	
W_{пл}, (10⁶м³)	0,3	0,6	1,7	3,3	6,1	8,9	12,5	16,0	19,5	23,1	26,7	
W_{умо} (10⁶м³)	5,3	5,6	6,4	7,1	7,9	8,7	9,8	10,8	11,6	12,3	13,0	
F_{ор} (га)	242	484	847	1210	1815	2420	3025	3630	4235	4840	5386	
K (10³м³/га)	49,46	26,53	18,29	15,30	12,61	11,27	10,93	10,61	10,32	10,07	9,99	

Проведен расчет по экономическому критерию применительно к 2 проектам. Результаты по проекту Шонграк показаны в таблице 3 и на рисунке 5.

Сравнение результатов по предлагаемому (таблица 1, рисунок 3) и экономическому (таблица 3, рисунок 5) критериям проектов Шонграк и Банмонг показывает, что полученные оптимальные значения практически совпадают, и эта тенденция сохраняется при изменении анализируемых параметров в больших диапазонах. На границах доверительного интервала статистической связи между стоимостны-

ми показателями и водохозяйственными параметрами также получено такое совпадение, хотя размер отклонений немножко увеличивается.

Таким образом, подтверждена корректность предлагаемого критерия, который является новым с методологической точки зрения и рекомендуется при большой погрешности, недостаточности или отсутствии необходимых для оптимизации исходных данных о взаимосвязи экономических показателей и водохозяйственных параметров.

ki (10³м³/га)

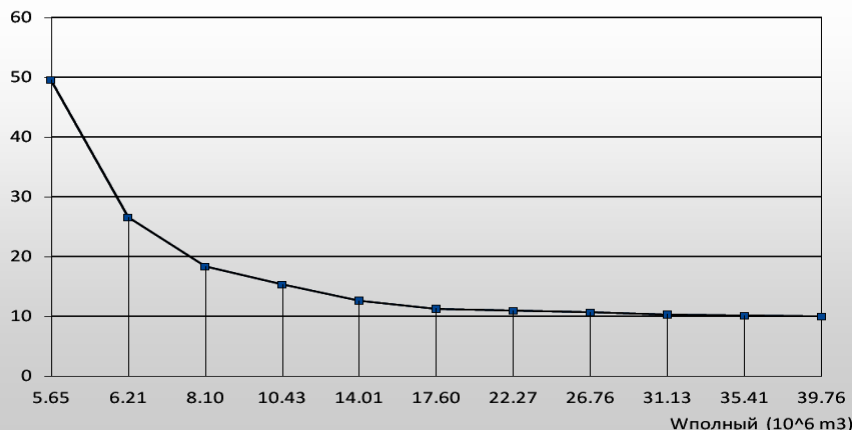


Рисунок 4 – Кривая изменения критерия K объекта Банмонг

Таблица 3 – Результаты расчета по экономическому критерию. Проект Шонграк

ПОКАЗАТЕЛИ	РАЗНЫЕ УРОВНИ ПАРАМЕТРОВ									
Полный объем водохранилища(млн.м ³)	12,2	19,1	25,6	31,9	44,4	64,3	84,6	114,9	129,9	150,7
Стоимость строительства (тыс. долл.)	15266	22846	29712	36221	48670	67942	87043	114650	128000	146320
Капремонт каждые 6 лет (тыс. долл.)	129	180	225	265	339	447	550	692	758	848
Затраты эксплуатации (тыс. долл.)	376	526	655	773	989	1306	1605	2019	2213	2474
Площадь орошения (га)	1630	3260	4890	6520	8150	10595	13040	16300	17930	20212
Общий доход (тыс. долл.)	1708	3415	5123	6830	8538	11099	13660	17076	18783	21174
Индекс рентабельности – PI	0,81	1,10	1,28	1,40	1,31	1,23	1,19	1,14	1,12	1,11

индекс PI (%)

— Индекс рентабельности - PI (%)

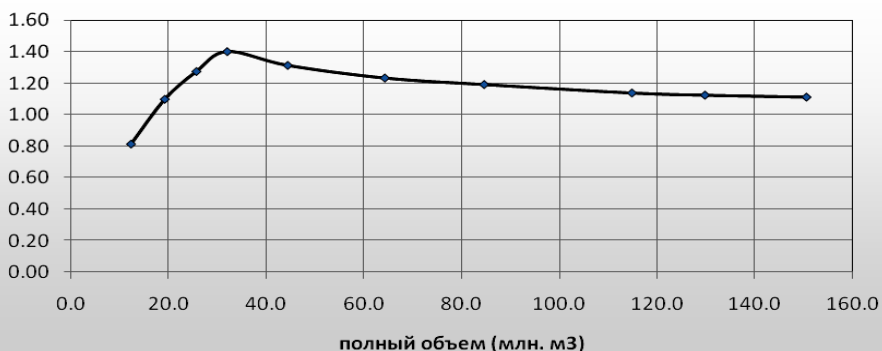


Рисунок 5 - Кривая рентабельности в зависимости от полного объема водохранилища Шонграк

Выводы

1. Разработана методика оптимизации емкости водохранилищ и площадей орошения за счет регулирования речного стока малых рек при условии выполнения обязательных требований других (кроме орошения) водопользователей, которая апробирована на реальных объектах малых рек Вьетнама. По результатам проведенных расчетов оценено влияние основных факторов на выбор оптимального решения, т.е. на определение опти-

мальной емкости водохранилища и площади орошаемых земель.

2. Проведенные расчеты подтвердили корректность предложенного критерия оптимальности в виде минимума суммы свободного естественного и регулируемого объема речного стока на единицу орошаемой площади.

3. В большинстве случаев оптимальное значение емкости водохранилища находится между его нулевым значением и максимально допустимым (рисунок 3).

Однако в отдельных случаях оптимальное значение может совпадать с максимальным (рисунок 4).

4. Наибольшее влияние на величину критерия оптимизации оказывают мертвый объем водохранилища, зависящий от заиления и требований охраны природы, потери на дополнительное испарение и фильтрацию, а также режим речного стока;

5. Расчеты показывают, что при прочих равных условиях оптимальный полезный объем водохранилищ в бассейнах рек Беларуси меньше, чем во Вьетнаме из-за особенностей режима речного стока и морфометрических характеристик пойм.

6. Критерий может быть использован и при установлении оптимальной очередности строительства оросительных систем в водосборах малых рек того или иного региона, а также для сравнения разных створов плотин водохранилищ.

7. В случае наличия достаточно полной и надежной информации о взаимосвязи экономических показателей и водохозяйственных параметров целесообразно использовать и традиционные экономические критерии оптимальности как для дополнительного подтверждения обоснованности принимаемого решения, так и для его стоимостной оценки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воропаев, Г.В. Моделирование водохозяйственных систем аридной зоны СССР / Г.В. Воропаев, Г.Х. Исмаилов, В.М. Федоров // Наука, 1984. – 313с.
2. Нгуен, Т.Б. Оптимизация ирригационной гидроэнергетической системы в многоцелевом водопользовании: дис. канд. наук / Т. Б. Нгуен: – М., 2002. – 140 с.
3. Нгуен, Ч. Ш. Выбор режимов и параметров водохранилищ комплексного использования для выработки энергии и борьбы с наводнением: дис. канд. Наук / Ч.Ш. Нгуен. – М., 1971. – 152 с.
4. Проектирование схем комплексного использования водных ресурсов: [перевод с англ.]. – М.: Энергия, 1966. – 334 с.
5. Пряжинская, В.Г. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В.Г. Пряжинская, Д.М. Ярошевский, Л.К. Левит-Гуревич. – М.: Физматлит, 2002. – 496 с.
6. Косолапов, А.Е. Совершенствование процесса управления водными ресурсами бассейна реки на основе автоматизированных информационно – советующих систем: втореферат дис. ... док. техн. наук.– Екатеринбург: РосНИИВХ, 1996. – 34 с.
7. Киен, Ф.Н. . Критерии оптимизации параметров водохозяйственного комплекса в бассейнах малых рек предгорных районов Вьетнама/ Ф.Н. Киен // Наука и техника.– 2016. – №2.– С.124-128.
8. Мухавец: энциклопедия малой реки / А.А. Волчек [и др]. – Брест: Академия, 2006. – 344 с.
9. Лихацевич, А.П. Сельскохозяйственные мелиорации /А.П.Лихацевич, М.Г. Голченко, Г.И. Михайлов; под ред. А.П. Лихацевича, – Минск: ИВЦ Минфина, 2010. – 464 с.
10. Лихацевич, А.П. Выбор способа орошения сельскохозяйственных культур / А.П. Лихацевич, Г.В. Латушкина, А.А. Левкевич // Мелиорация. – 2015. – №2(74) – С. 34-47.
11. Голченко, М.Г. Научно практические основы орошения сельскохозяйственных угодий на минеральных почвах Республики Беларусь: автореферат дис. ... док. техн. наук / М.Г. Голченко. – Минск, 2006. – 38 с.
12. Киен, Ф. Н. Обоснование объемов и режимов подачи воды на орошение в зависимости от стока рек предгорных районов Вьетнама / Ф.Н. Киен // Наука и техника. – 2015 – №2. – С. 61-66.
13. Колобаев, А.Н. Рациональное использование и охрана водных ресурсов / А.Н. Колобаев. – Минск: БНТУ, 2005. – 172 с.
14. Методика определения режима орошения культур – Продовольственная Сельскохозяйственная Организация Объединенных Наций - Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations FAO, Rome, Italy. 1998. – 280с.
15. Стандарт TCVN 8641:2011 – Техника орошения и осушения для сельскохозяйственных и продовольственных культур, утвержденная Министерством сельского хозяйства и развития сельской местности Вьетнама. Ханой, 2011. – 41с.
16. Паспорт создания режима работы водохранилища Шонграк – Ханойский ирригационный университет, 2014. – 43 с.
17. Общий паспорт проекта водохранилища Банмонг – Вьетнамская консультативная компания о ирригационном строительстве (HEC), 2006. – 127с.