

УДК 519.863:303.725.36

С. А. Цыбульник, канд. техн. наук

(УкрНИИЭП)

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВЕКТОРНОМУ КРИТЕРИЮ

Рассмотрены основные факторы, обуславливающие целесообразность рассмотрения задачи оптимизации водоохраных мероприятий по векторному критерию, сформулированы основные варианты возможных постановок задачи, и предложена процедура достижения компромисса между отдельными критериями.

Ключевые слова: водный объект, предельно допустимый сброс, водоохраные мероприятия, математическая модель, векторная (многокритериальная) оптимизация.

Современная методология разработки предельно допустимых сбросов, как правило, базируется на принципе оптимального распределения затрат на реализацию водоохраных мероприятий по их достижению. Соответствующая математическая модель оптимизации затрат на водоохраные мероприятия включает систему критериев оптимальности и две основные подмодели — модель водного объекта и модель комплекса водоохраных мероприятий. Прежде чем сформулировать постановку задачи в общем виде, уточним смысл понятий «модель водного объекта» и «комплекс водоохраных мероприятий».

Состояние водного объекта может оцениваться различными показателями. К их числу обычно относят физико-химические параметры — температуру, концентрации различных веществ и др., а также биомассы различных групп гидробионтов. Учитывая цель данной работы, под моделью водного объекта далее мы будем понимать систему уравнений, характеризующую связь между показателями качества воды водного объекта и составом сбрасываемых сточных вод. Соответственно, под комплексом водоохраных мероприятий здесь

и далее мы будем понимать совокупность технических мероприятий, направленных на уменьшение или полное прекращение сброса загрязняющих веществ в водные объекты со сточными водами у отдельно взятого водопользователя или по водному бассейну в целом. Вопросы регулирования режима сброса сточных вод через накопители, а также технические мероприятия, проводимые непосредственно в водных объектах, — попуски из водохранилищ, аэрация и др. — в рамках данной работы не рассматриваются.

С учетом введенных определений, постановка задачи оптимизации затрат на водоохранные мероприятия, связанные с отведением сточных вод, может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти минимальный по затратам комплекс водоохранных мероприятий, обеспечивающий нормативное качество вод в заданной системе контрольных створов водного бассейна.

В соответствии с разделом 1.2.5 «Інструкції про порядок розробки та затвердження гранично-допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами» (далее — «Інструкція...») модель оптимизации затрат на водоохранные мероприятия может быть записана в виде скалярной задачи математического программирования с критерием вида

$$\{F(x) = e_1 f(x)\} \rightarrow \min_x \quad (1)$$

и системой ограничений вида

$$c_k = \Psi_k(\dots c_i^{cm} \dots), k \in K, i \in I, \quad (2)$$

$$c_i^{cm} = \Theta_i(c_i^{\bar{c}}, x_i), i \in I, \quad (3)$$

$$x_i \in X_i, i \in I, \quad (4)$$

$$A_k c_k \leq e_2, k \in K, \quad (5)$$

где $f(x) = (f_1(x_1), \dots, f_n(x_n))^T$; $x = (x_1, \dots, x_n)$; n — число водопользователей; $f_i(x_i)$ — затраты водопользователя i на реализацию водоохранных мероприятий; $e_1 = (1, \dots, 1)$ — вектор-строка размерности n ; c_k — вектор-столбец значений показателей (концентраций примесей) качества воды в створе k ; c_i^{cm} — вектор-столбец концентраций примесей в сточных водах выпуска i после применения водоохранных ме-

роприятий; $\Psi_k(\bullet)$ — вектор-функция, определяющая концентрации примесей в створе k через концентрации примесей в сточных водах связанных с ним выпусков сточных вод; I — множество номеров выпусков сточных вод, поступающих в водный объект; K — множество номеров контрольных створов; c_i^{cm} — вектор-столбец концентраций примесей в сточных водах выпуска i до применения водоохраных мероприятий; x_i — вектор с областью допустимых значений X_i , характеризующий эффективность водоохраных мероприятий для водопользователя i (например, степень очистки сточных вод или доля расхода сточных вод, проходящая ту или иную ступень очистки); $\Theta_i(\bullet)$ — вектор-функция, определяющая концентрации примесей в сточных водах выпуска i через концентрации примесей до применения водоохраных мероприятий; A_k — матрица ограничений на концентрации примесей в створе k ; $e_2 = (1, \dots, 1)^T$ — вектор размерности m ; m — число нормируемых показателей качества вод.

Число строк в A_k равно сумме числа нормируемых показателей качества вод, не имеющих лимитирующих признаков вредности (ЛПВ), и числа учитываемых ЛПВ. Число столбцов равно числу показателей качества вод. Для каждого показателя качества вод в соответствующей строке стоит величина, обратная предельно допустимой концентрации (ПДК). Если ограничения на ЛПВ не учитываются, матрица A_k является диагональной. Заметим, что для некоторых показателей могут ограничиваться не максимальные, а минимальные значения, или интервал изменения, поэтому без потери общности можно для простоты рассматривать ограничения на качество воды в виде (5).

Поскольку затраты на водоохраные мероприятия являются только частью общих вложений в хозяйственную деятельность, они не должны рассматриваться изолированно без учета соответствующего изменения других показателей экономической эффективности хозяйственной деятельности водопользователей. Например, минимальным суммарным затратам на водоохраные мероприятия может соответствовать высокая себестоимость выпускаемой продукции и, следовательно, нерентабельность производства у отдельных водопользователей. Поэтому в процессе принятия решения по распределению затрат на водоохраные мероприятия необходимо учитывать

помимо основного критерия — приведенных затрат — другие критерии и показатели, характеризующие хозяйственную деятельность водопользователей.

Обычно для улучшения значений локальных критериев просто корректируют оптимальное по суммарным затратам решение. Как правило, это приводит к существенному увеличению суммарных затрат, принятых в качестве основного критерия оптимальности. Поэтому для получения компромиссных решений, согласовывающих требования отдельных критериев и требующих минимальной корректировки, целесообразно использовать модели и методы многокритериальной (векторной) оптимизации, позволяющие получать более равномерное распределение суммарных затрат между отдельными водопользователями, чтобы ухудшение их экономических показателей было менее существенным [1-3].

Следует отметить, что на практике в большинстве случаев неявно решаются именно задачи векторной оптимизации. Типичным примером являются многовариантные проработки различных водоохраных мероприятий, когда окончательное решение выбирается на некотором множестве альтернативных решений, имеющих различные характеристики, то есть фактически производится их векторное сравнение. Рекомендуемый в «Инструкции...» критерий сравнительной экономической эффективности капитальных вложений на водоохраные мероприятия в виде минимума приведенных затрат также является скалярной сверткой векторного критерия, включающего два различных критерия — критерий минимума эксплуатационных затрат и критерий минимума капитальных затрат. Поэтому любая задача оптимизации водоохраных мероприятий по скалярному критерию по сути является частным случаем задачи векторной оптимизации, где одни критерии учтены в целевой функции, а другие — в системе ограничений. Такой способ скаляризации задач векторной оптимизации является наиболее распространенным.

Целью настоящей работы является анализ методологических аспектов, связанных с постановкой задачи оптимизации водоохраных мероприятий по векторному критерию.

Целесообразность рассмотрения задачи оптимизации водоохраных мероприятий по векторному критерию обуславливается различ-

ными факторами. Не претендуя на полноту, их можно разделить на две группы: факторы, связанные с распределением затрат на водоохраные мероприятия между отдельными водопользователями, и факторы, связанные с распределением эффекта от водоохраных мероприятий между отдельными створами водного бассейна.

Рассмотрим первую группу факторов. К ней относятся, прежде всего, факторы, связанные с ухудшением показателей экономической эффективности хозяйственной деятельности водопользователей (например, рост себестоимости выпускаемой продукции из-за увеличения затрат на очистку используемой или отводимой воды). Сюда же отнесем факторы, связанные с учетом зональной распределенности предприятий, и с различиями в инфраструктуре рассматриваемых водных регионов. Например, достижение глубокой очистки или использование в обороте сточных вод предпочтительнее предусматривать для вновь строящихся или реконструируемых предприятий. Перечисленные выше факторы могут быть учтены в рамках модели компромиссного распределения суммарных затрат на водоохраные мероприятия между отдельными водопользователями при стремлении каждого из них минимизировать собственные затраты на водоохраные мероприятия.

Вторая группа факторов, обуславливающих целесообразность постановки задачи оптимизации водоохраных мероприятий по векторному критерию, связана, прежде всего, с необходимостью определения первоочередных водоохраных мероприятий при невозможности достижения нормативного качества вод в течение расчетного периода. Указанные факторы могут быть учтены в рамках модели компромиссного распределения суммарных затрат на водоохраные мероприятия между отдельными водопользователями при стремлении максимизировать качество вод или минимизировать нарушения их нормативного качества в каждом контрольном створе.

Для построения модели оптимизации водоохраных мероприятий по векторному критерию необходимо выделить группы лиц, имеющих собственные интересы при планировании водоохраных мероприятий, и определить их иерархию. Последнюю можно представить в следующем виде:

- глобальная управляющая система первого уровня — центральный планирующий орган, определяющий вложения на водоохранные мероприятия;
- локальные управляющие системы второго уровня — контролирующие органы по регулированию использования и охране вод, отвечающие за соблюдение правил охраны вод и выдачу разрешений на специальное водопользование, включая разрешения на сброс сточных вод;
- локальные управляющие системы третьего (нижнего) уровня — водопользователи, использующие водный объект с изъятием или без изъятия воды.

В зависимости от степени детализации разрабатываемых водоохраных программ под водопользователями могут пониматься, например, как отдельные предприятия, так и совокупность предприятий города или промышленного региона в целом. При этом, в зависимости от условий задачи, глобальная управляющая система первого уровня может отсутствовать.

Определим основные цели элементов системы управления. Очевидно, что цель органов, планирующих водоохранные мероприятия, заключается в достижении нормативного качества вод с минимальными затратами. Цель органов по регулированию использования и охране вод состоит в соблюдении правил охраны вод, рациональном использовании водных объектов и неухудшении существующего качества вод. Аналогичные цели имеют водопользователи, использующие водные объекты без изъятия воды. Интересы водопользователей, забирающих воду из водных объектов или отводящих туда сточные воды, состоят в получении воды требуемого качества с минимальными затратами на водоподготовку и в отведении сточных вод с минимальными затратами на водоохранные мероприятия.

С учетом вышеизложенного, группы лиц, имеющих собственные интересы (цели) при планировании водоохраных мероприятий, можно представить в виде, изображенном на рис. 1. Как видно из рисунка, на каждом уровне управления преследуется одна из целей вышестоящей управляющей системы, но при этом отдельные цели конфликтуют между собой. Тем не менее, логично не противопоставлять интересы отдельных водопользователей интересам орга-

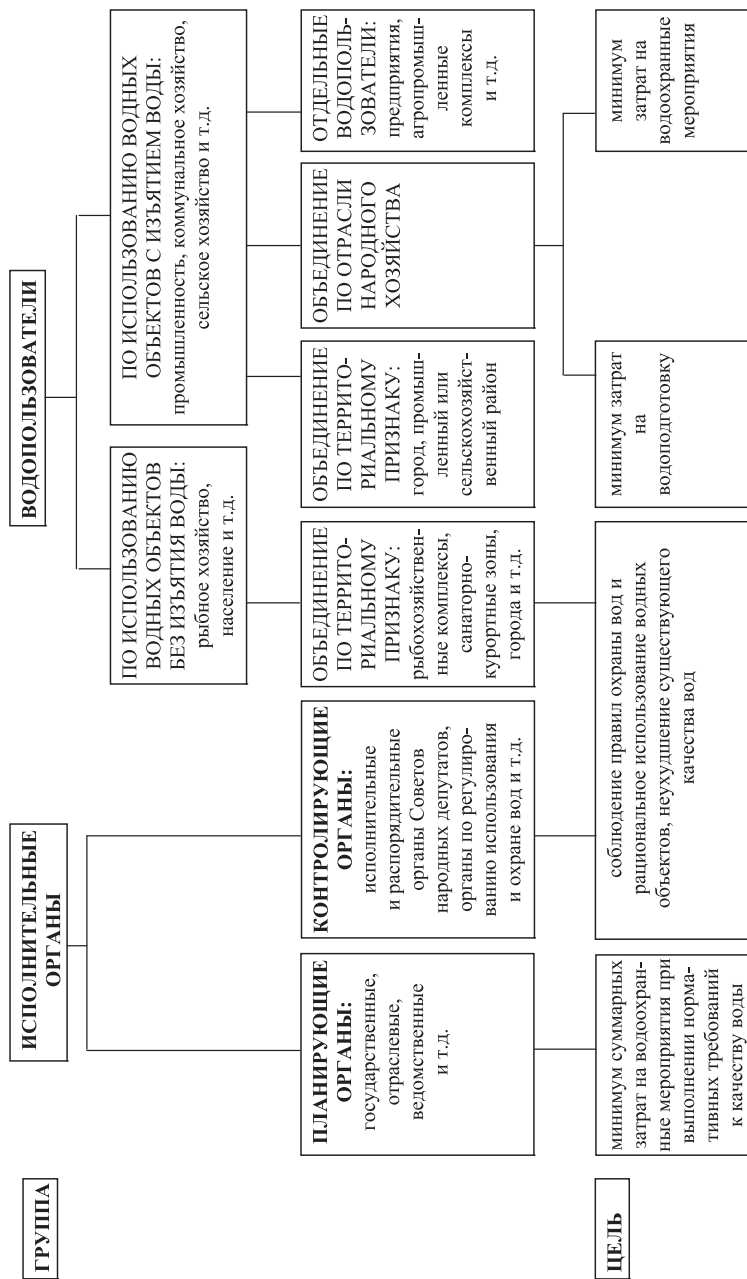


Рис. 1. Группы лиц, имеющих собственные интересы при планировании водоохраных мероприятий.

нов планирования и контроля, а рассматривать совокупность всех интересов как единую систему целей, включающую как стремление к достижению нормативного качества вод с минимальными затратами, так и стремление к равному удовлетворению требований всех водопользователей.

Основные факторы, обуславливающие целесообразность рассмотрения задачи оптимизации водоохранных мероприятий по векторному критерию, могут быть учтены в рамках моделей компромиссного распределения суммарных затрат на водоохранные мероприятия между отдельными водопользователями при стремлении минимизировать затраты каждого из них и достичь возможно лучшего качества воды в каждом контрольном створе. Соответственно, в зависимости от возможности достижения нормативного качества воды водных объектов к концу расчетного периода, можно выделить два основных варианта постановки задачи оптимизации водоохранных мероприятий по векторному критерию при ограничениях (2)-(5).

Вариант I. *Определение компромиссного распределения суммарных затрат между водопользователями, позволяющего достичь нормативного качества вод к концу расчетного периода.* Векторный критерий задачи включает критерий верхнего уровня — суммарные затраты $F(x)$ вида (1) — и критерии нижнего уровня (уровня водопользователей)

$$w_i (f_i (x_i)) \rightarrow \min_{x_i}, i \in I, \quad (6)$$

где $w_i(\bullet)$ и $f_i(\bullet)$ — соответственно, удельные и абсолютные затраты водопользователя i на реализацию водоохранных мероприятий.

Вариант II. *Определение компромиссного распределения суммарных затрат между водопользователями с учетом компромисса в нарушении нормативного качества вод при невозможности достижения последнего в течение расчетного периода из-за ограниченности выделяемых капитальных вложений.* Векторный критерий задачи включает выделенные выше критерии верхнего и нижнего уровней системы управления и характеризующие качество вод критерии промежуточного уровня (регулирования использования и охраны вод) вида

$$\Phi_k (c_k) \rightarrow \min_{c_k}, k \in K. \quad (7)$$

Так как качество вод оценивается по многим показателям, то критерии $\Phi_k(c_k)$ также могут быть векторными.

Для практического применения сформулированных выше постановок задач векторной оптимизации водоохранных мероприятий предлагается параметризовать множество эффективных решений по параметрам, характеризующим, соответственно, максимальные удельные затраты отдельных водопользователей (ω) и максимальную относительную степень нарушения нормативного качества вод по отдельным показателям (γ). Такой подход дает возможность представить множество эффективных решений в наглядном виде, позволяющем лицу, принимающему решение (ЛПР), на основе сравнительного анализа выбрать решение наилучшим образом согласовывающее требования отдельных критериев. При этом параметризация множества эффективных решений позволяет построить процедуру решения задачи в следующем виде:

Этап 1. Выбор ЛПР вида критерия планирующего органа $F(x)$ — суммарных затрат на водоохранные мероприятия и системы критериев $w_i(f_i(x_i))$, характеризующих удельные затраты водопользователей.

Этап 2. Параметризация множества допустимых эффективных решений задачи векторной оптимизации с критериями $F(x)$, $w_i(x_i)$, $i \in I$ и системой ограничений (2)-(5). Графическое отображение полученного множества в виде функции $F^*(\omega)$ с выделением точек, удовлетворяющих различным условиям компромисса.

Этап 3. Оценка ЛПР возможности достижения нормативного качества воды к концу расчетного периода. Если нормативное качество воды достижимо, этапы 4 и 5 пропускаются.

Этап 4. Выбор ЛПР системы критериев $\Phi_k(c_k)$, $k \in K$, характеризующих качество воды в контрольных створах.

Этап 5. Параметризация множества допустимых эффективных решений задачи векторной оптимизации с критериями $F(x)$, $w_i(x_i)$, $\Phi_k(c_k)$, $i \in I$, $k \in K$ и системой ограничений (2)-(4). Графическое отображение функции $F^*(\omega, \gamma)$ в виде семейства кривых $F^*(\gamma)$ для дискретных значений ω . Построение изолиний, определяющих точки, удовлетворяющие различным условиям компромисса.

Этап 6. Выбор ЛПР компромиссного решения, определяющего водоохранные мероприятия x_i на конец расчетного периода и соот-

ветствующее им качество вод, отвечающее нормативным или промежуточным требованиям.

Этап 7. Выдача рекомендаций по установлению ПДС водопользователей с технико-экономическим обоснованием возможных водоохраных мероприятий.

Сравнивая предложенную процедуру с известными итерационными диалоговыми человеко-машинными процедурами векторной оптимизации [4-9], следует подчеркнуть, что в последних диалог «человек — компьютер» направлен прежде всего на изучение системы оценок или предпочтений самого ЛПР, которое собственно и является объектом изучения. Достоинством такого подхода является простота действий ЛПР на каждом шаге процедуры, определяющей либо приемлемое с точки зрения ЛПР компромиссное решение, либо соответствующую ему функцию полезности на множестве допустимых решений. Недостатком является необходимость анализа большого числа эффективных решений, то есть процедура достижения компромисса может носить очень длительный характер и, более того, может вообще не сходиться. Кроме этого, в процессе выбора компромиссного решения анализируется лишь небольшая произвольная часть множества эффективных решений.

В предложенной процедуре диалог «человек — компьютер» на этапах 2 и 5 направлен на изучение общих характеристик самого множества эффективных решений и получение дополнительной информации, например, графиков изменения всех критериев задачи в окрестностях интересующих ЛПР точек. Достоинством метода является представление множества допустимых эффективных решений в наглядном параметризованном виде, что позволяет ЛПР одновременно анализировать все множество значений критериев задачи. Существенным является и то, что графическое построение множества допустимых эффективных решений требует относительно небольшого числа точек и, следовательно, является существенно менее трудоемким с точки зрения вычислительной реализации процедуры.

Направлением дальнейших исследований в данной области является разработка теоретических основ параметризации, перечисления и наглядного представления множества эффективных решений.

1. Сухоруков Г. А. Прогноз и оптимизация интенсивности водоохраных мероприятий с учетом нескольких критериев оптимальности. В кн.: Проблемы охраны вод / Г. А. Сухоруков, С. А. Цыбульник. — Харьков, 1977. — Вып. 8. — С. 137-145.
2. Сухоруков Г. А. Принятие компромиссных решений при оптимизации водоохранной деятельности. В кн.: Сложные системы управления / Г. А. Сухоруков, С. А. Цыбульник. — Киев, 1978. — С. 3-11.
3. Сухоруков Г. А. Математические модели и алгоритмы поэтапной оптимизации водоохраных мероприятий по векторному критерию оптимальности. В кн.: Управление качеством природных вод / Г. А. Сухоруков, С. А. Цыбульник. — Харьков, 1980. — С. 50-61.
4. Линейное программирование при многих критериях: Метод ограничений / Бенайюн Р., Ларичев О., Монгольфье де Ж., Терни Ж. // Автоматика и телемеханика, 1971. — № 8. — С. 108-115.
5. Буянов Б. Б. Об одном методе принятия решений при векторном критерии. / Буянов Б. Б., Озерной В. М. // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1974. — № 3. — С. 80-84.
6. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций / Ю. Б. Гермейер. — М.: Наука, 1971. — 384 с.
7. Краснекер А. С. Задачи и методы векторной оптимизации / А. С. Краснекер // Измерения, контроль, автоматизация (ИКА), 1975. — Вып. 1(3). — С. 51-56.
8. Mukai H. Algorithms for multicriterion optimization / H. Mukai — IEEE Trans. Autom. Confr., 1980, v. AC-25, N 2, p. 177-186.
9. Nakayama H., Tanino T., Sawaragi Y. An interactive optimization method in multicriteria decisionmaking / Nakayama H., Tanino T., Sawaragi Y. — IEEE Trans. Syst., Man. and Cybern., 1980, v. SMC-10, N 3, p. 163-169.

Цыбульник С. А. МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ВОДООХОРОННИХ ЗАХОДІВ ЗА ВЕКТОРНИМ КРИТЕРІЄМ

Розглянуто основні фактори, що обумовлюють доцільність розгляду задачі оптимізації водоохоронних заходів за векторним критерієм, сформульовані основні варіанти можливих постановок задачі та запропонована процедура досягнення компромісу між окремими критеріями.

Ключові слова: водний об'єкт, гранично допустимий скид, водоохоронні заходи, математична модель, векторна (багатокритеріальна) оптимізація.

Tsybulnik S. A. METHODOLOGICAL ASPECTS OF STAGING THE OPTIMIZATION PROBLEM OF WATER CONSERVATION MEASURES FOR VECTOR CRITERION

The main factors contributing to appropriate to consider the optimization problem of water conservation measures for vector criterion, formulated the basic variants of possible formulations of the problem and propose a procedure to reach a compromise between the individual criterions.

Key words: *waterbody, maximum permissible discharge, protection measures, mathematical model, vector (multicriteria) optimization.*