

УДК 504.4.054

О.А. ПРОСКУРНИН, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем (УкрНИИЭП), г. Харьков

МИНИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА ОЧИСТКУ СТОЧНЫХ ВОД В РАМКАХ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ НОРМИРОВАНИЯ ВОДООТВЕДЕНИЯ

Рассмотрен оптимизационный подход к нормированию сброса сточных вод в водные объекты. Отмечены проблемы его практического использования, приведен пример расчета оптимального распределения потока сточных вод, содержащих нефтепродукты.

Ключевые слова: нормирование, оптимизация, сброс сточных вод, допустимые концентрации, эксплуатационные затраты, капитальные затраты, нефтепродукты.

Одной из наиболее масштабных экологических проблем экономически развитых стран является загрязнение водных объектов (ВО) сточными водами (СВ), отводимыми от промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных предприятий. В Украине с целью контроля уровня антропогенной нагрузки на ВО для предприятий-водопользователей разрабатываются и утверждаются предельно допустимые сбросы (ПДС) загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами [1].

Методической базой для установления этих норм является Инструкция о порядке разработки и утверждения ПДС веществ, поступающих в водные объекты со сточными водами [2], которая предписывает производить расчет допустимых концентраций веществ исходя из утвержденных расходов СВ, гидрологических и гидрохимических параметров ВО, а также категории водопользования – рыбохозяйственной, коммунально-бытовой или хозяйственно-питьевой. Заложенный в [2, Приложение 1, п. 1.2.4] базовый подход к расчету ПДС основан на равномерном распределении ассимилирующей способности ВО между водопользователями и представляет собой решение задачи, обратной задаче прогнозирования

качества воды. Допустимый состав СВ, не приводящий к нарушению экологических норм ВО, рассчитывается отдельно по каждому загрязняющему веществу с учетом интенсивности процессов самоочищения ВО, а также присущих данному объекту природных (без антропогенного влияния) фоновых концентраций рассматриваемых веществ.

Однако базовый подход пренебрегает возможностью химического превращения (трансформации) в водной среде одного загрязняющего вещества в другое и поэтому не способен обеспечить соблюдение предельно допустимой концентрации (ПДК) для веществ – продуктов трансформации. Кроме того, базовый подход не учитывает взаимозависимость концентраций веществ в СВ на выходе из очистных сооружений (ОС), что приводит к технологически недостижимому результату расчета. По этой причине в [2, Приложение 1, п. 1.2.5] включен оптимизационный подход к расчету ПДС, который не имеет указанных недостатков.

Целью настоящей статьи является анализ возможности практического использования оптимизационного подхода к расчету ПДС.



В основе изложенной в [2] оптимизационной задачи лежит идея регулирования потока СВ по различным технологическим маршрутам их очистки. Критерием оптимальности служит минимум суммарных затрат на очистку с целью достижения ПДС:

$$Z = \sum_{i=1}^M f\left(\{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{R_i}^i\}\right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где i – индекс выпуска СВ (здесь и далее верхние индексы означают источник загрязнения); f – затраты на водоочистку, грн/с; $\{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{R_i}^i\}$ – вектор безразмерных оптимизируемых переменных, определяющих доли расхода СВ, проходящих по различным технологическим маршрутам; R_i – количество технологических маршрутов очистки; M – количество водопользователей.

При этом для каждого выпуска должно соблюдаться условие

$$\sum_{r=1}^{R_i} x_r^i = 1, \quad (2)$$

где r – индекс технологических маршрутов очистки.

Экономическая модель затрат на водоочистку [2]:

$$f(x_i) = \sum_r x_r^i u_r^i q^i, \quad (3)$$

где u – удельная стоимость очистки по маршруту r , грн/с; q – расход СВ, м³/с.

Для каждого выпуска СВ состав воды на выходе из ОС определяется по формуле

$$C^i = \sum_{r=1}^{R_i} C_r^i \cdot x_r^i, \quad (4)$$

где C_r^i – состав СВ i -го выпуска, прошедших очистку по маршруту r , мг/дм³.

Ограничения оптимизационной задачи определяются требованием соблюдения экологических нормативов качества воды в контрольных створах (КС) ниже выпусков СВ:

$$y_{kj} \leq \text{ПДК}_j, \quad (5)$$

где k – индекс КС; j – индекс вещества; y – концентрация вещества в КС, мг/дм³.

В простейшем случае (для одного КС и при отсутствии трансформации веществ) расчетная формула концентрации вещества в створе имеет вид

$$C_{KC} = \frac{\sum_i^M C^i \cdot q^i + \sum_p^P C_{rp}^p \cdot q_{rp}^p + C_\phi \cdot Q_\phi}{Q}, \quad (6)$$

где C_{rp} , C_ϕ – концентрации вещества соответственно в устьевых створах притоков и фоновом створе, мг/дм³; p – индекс притока; q_{rp} – расход воды притоков, м³; Q , Q_ϕ – расходы воды реки соответственно в КС и фоновом створе выше выпусков СВ, м³.

В данной задаче могут рассматриваться как действующие ОС, так и другие варианты очистки. Ее решение, по сути, сводится к оптимальному управлению комплексом очистных сооружений. Поскольку в основе расчета ПДС лежат реальные технологические возможности ОС, результат расчета получается заведомо технологически достижимым. Однако реализации такого подхода в отношении действующих ОС препятствует то обстоятельство, что режим работы ОС диктуется их характеристиками, заложенными на этапе проектирования, и отступление от проектного режима является технологическим нарушением. Отсутствие алгоритма установления более жестких требований к составу СВ означает отсутствие механизма принудительного усовершенствования систем очистки предприятий, ОС которых неоправданно малоэффективны.

При рассмотрении альтернативных вариантов очистки прямое применение изложенного подхода невозможно по той причине, что функция цели (1) включает только эксплуатационные затраты на очистку и не учитывает капитальных вложений, необходимых для строительства альтернативных технологических линий очистки с целью расширения пространства принятия решения при поиске оптимума. Таким образом, для практического использования оптимизационного подхода к расчету ПДС, минимизирующего затраты на очистку СВ, необходимо усложнить функцию цели добавлением слагаемого, выражающего размер капитальных затрат.

Важным моментом в постановке оптимизационной задачи является то, что величины капитальных и эксплуатационных затрат имеют разную размерность: если первые выражаются в денежных единицах, то вторые – в денежных, деленных на единицу времени. Чтобы привести эти показатели к единой размерности, предлагается делить капитальные затраты на проектное время эксплуатации сооружений.

Кроме того, по мнению автора, принятие в качестве оптимизируемых переменных долей потока СВ является неудобным, так как требует дополнительных расчетных операций для определения состава и расхода СВ на выходе из ОС. Поэтому целесообразнее в качестве оптимизируемых переменных принимать непосредственно расходы СВ, проходящих по различным технологическим маршрутам. Исходя из этого функцию цели можно записать следующим образом

$$Z = \sum_{i=1}^m [f_s(q^i) + f_k(q^i)] = \sum_{i=1}^m \left[\sum_r^R u_{sr}^i(q_r^i) \cdot q_r^i + \sum_r^R \frac{u_{kr}^i(q_r^i) \cdot q_r^i}{T_r} \right] \rightarrow \min, \quad (7)$$

где f_s и f_k – эксплуатационные и капитальные затраты на очистку СВ, грн/с; $u_{sr}^i(q_r^i)$, $u_{kr}^i(q_r^i)$ – зависимости соответственно удельных эксплуатационных и удельных капитальных затрат на водоочистку от расхода воды, грн/(с·м³); T – проектное время эксплуатации ОС.

Построение зависимостей $u_{sr}^i(q_r^i)$ и $u_{kr}^i(q_r^i)$ представляет собой хотя и решаемую, но достаточно трудоемкую задачу. Поэтому следует иметь в виду, что в общем случае при расчете ПДС вполне допустимо строить данную зависимость приближенно (по справочным табличным данным).

В [2] в качестве экономической модели предлагается использовать степенную функцию

$$u_s(q) = D \cdot q^\alpha, \quad (8)$$

а в работе [3] – гиперболическую

$$u_s(q) = \frac{a}{b + k \cdot q}, \quad (9)$$

где D , α и a , b , k – параметры моделей (8) и (9) соответственно. Однако в силу существующего разнообразия способов очистки СВ никакую зависимость нельзя считать универсальной, поэтому в каждом конкретном случае рекомендуется проверять адекватность модели исходным данным.

Приведем пример расчета ПДС для одного выпуска СВ и двух возможных маршрутов очистки. Задача заключается в следующем. СВ отводятся через выпуск, имеющий ОС, состоящие из блока коагуляции, градирни десорбции аммиака, блока рекарбонизации, фильтров зернистых и блока хлорирования (маршрут 1). Данная схема очистки соответствует передовой технологии водоохраны (ПТВ) (согласно классификации, приведенной в [4]). В связи с ожидаемым увеличением объема стока планируется строительство дополнительной линии очистки (маршрут 2), аналогичной существующей, но включающей также угольные адсорберы. Такая схема очистки соответствует наилучшей технологии водоохраны (НТВ) [4].

Итак, необходимо оптимально распределить поток СВ между двумя маршрутами с учетом капитальных затрат на строительство новой линии. Поскольку трансформация загрязняющих веществ в настоящей статье не рассматривается, в качестве показателя загрязнения

выбраны нефтепродукты. Их выходная концентрация после очистки определяется по формуле

$$C = (1 - \delta) \cdot C_0, \quad (10)$$

где C_0 – содержание вещества на входе в ОС; δ – степень очистки.

Согласно [4] при ПТВ (маршрут 1) степень очистки СВ от нефтепродуктов $\delta = 0,96$; при НТВ (маршрут 2) $\delta = 0,99$. Исходные данные для расчета: расход речной воды выше сбросов $Q_{\text{р}} = 7 \text{ м}^3/\text{с}$; общий расход сточных вод $q_1 + q_2 = 1 \text{ м}^3/\text{с}$; концентрация нефтепродуктов в фоновом створе $C_{\text{ф}} = 0,01 \text{ мг/дм}^3$; концентрация нефтепродуктов в СВ до очистки $C_0 = 20 \text{ мг/дм}^3$; ПДК = $0,05 \text{ мг/дм}^3$. В качестве времени эксплуатации ОС условно выбран срок $T = 10$ лет.

В табл. 1 приведены данные по эксплуатационным затратам на водоочистку для двух типов ОС [4].

Таблица 1 – Удельные эксплуатационные затраты на очистку СВ

Производительность ОС, тыс. м ³ /сут, $q_{\text{сут}}$	Затраты*, руб./м ³	
	ПТВ (маршрут 1) u_{s1}	НТВ (маршрут 2) u_{s2}
25–32	0,085	0,121
32–40	0,079	0,111
40–50	0,073	0,102
50–64	0,067	0,092
64–80	0,063	0,087
80–100	0,058	0,078
100–130	0,053	0,07
130–150	0,051	0,066
150–160	0,05	0,065
160–220	0,05	0,058

* Перевод цен на современный уровень не производился, поскольку это не является принципиальным для рассматриваемого примера.

Результаты аппроксимации в классе гиперболических функций по данным табл. 1 следующие:

$$u_{s1}(q_{\text{сут}}) = \frac{0,507}{5,329 + 0,03 \cdot q_{\text{сут}}}, \quad (11)$$

$$u_{s2}(q_{\text{сут}}) = \frac{0,775}{5,29 + 0,04 \cdot q_{\text{сут}}}. \quad (12)$$

Адекватность моделей, построенных по выборке $\{q, u\}$, проверяется с помощью критерия Фишера [5] следующим образом:

1) рассчитывается величина



$$F_{расч} = F_{m, n-m-1} = \frac{(n-m-1) \sum_{i=1}^n (u_i - u_{ср})^2}{m \cdot \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u}_i)^2}, \quad (13)$$

где n – объем выборки; m – количество независимых переменных модели; $u_{ср}$ – выборочное среднее величины u ; \bar{u}_i – рассчитанные согласно полученной модели величины $u(q)$;

2) находится табличное значение $F_{крит}$, равное квантилю F -распределения для уровня значимости α и количества степеней свободы m и $n-m-1$;

3) сравниваются величины $F_{крит}$ и $F_{расч}$: если $F_{крит} < F_{расч}$, то полученную аппроксимационную модель можно считать адекватной исходным данным с уровнем надежности $P = 1 - \alpha$.

В рассматриваемом случае ($n=10$ и $m=1$) имеем: $F_{крит} = 5,32$.

Значения расчетных величин $F_{расч}$ и результаты проверки моделей (11) и (12) на адекватность приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты проверки адекватности моделей методом Фишера

Тип очистки СВ, вид затрат	$F_{расч}$	Вывод относительно адекватности модели
ПТВ (маршрут 1)	112,02	адекватна
НТВ (маршрут 2)	375,44	адекватна

Таким образом, гиперболическая функция достаточно хорошо описывает зависимость эксплуатационных затрат от расхода СВ. Графики построенных зависимостей приведены на рис. 1 и 2. Они подтверждают вывод, сделанный на основании критерия Фишера.

Приблизительная стоимость удельных капитальных затрат (табл. 3) на строительство подобных ОС взята из работы [3].

Таблица 3 – Удельные капитальные вложения в строительство ОС в зависимости от их годовой мощности

Мощность ОС, млн м ³ /год	< 0,2	0,2–1,0	1,01–5,0	5,01–50,0	> 50
Стоимость очистки, тыс. руб./м ³	51,2	34,8	29,2	3,8	1,1

Таким образом, функция цели имеет вид

$$F = u_{з1} \cdot q_1 + u_{з2} \cdot q_2 + \frac{f \cdot q_2^{год}}{T}, \quad (14)$$

где $q_2^{год}$ – годовой расход СВ, проходящих по маршруту 2; f – функция, заданная по табл. 3.

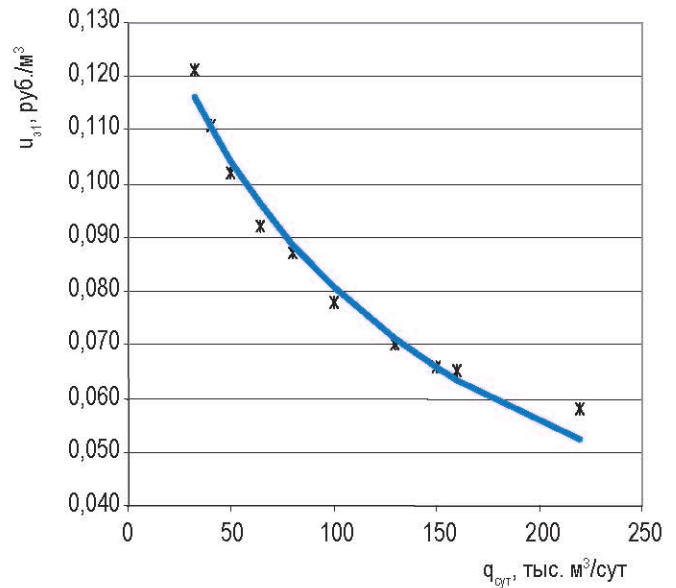


Рисунок 1 – Зависимость удельных эксплуатационных затрат на очистку СВ от расхода воды при использовании ПТВ (маршрут 1)

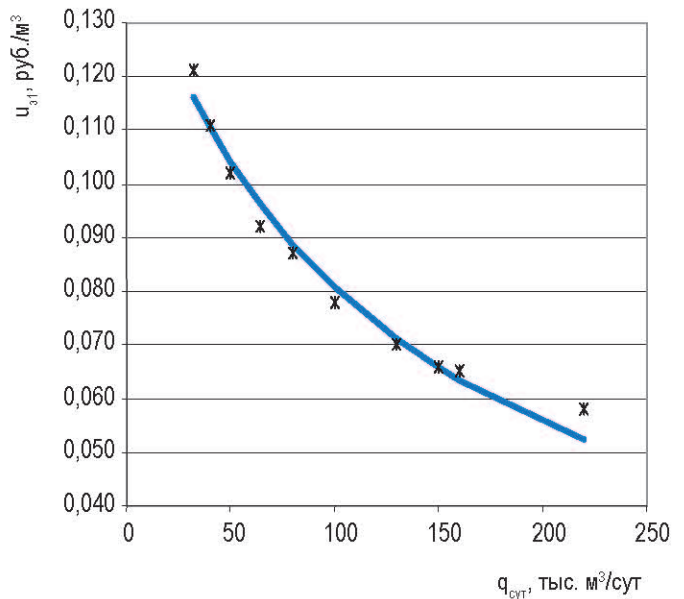


Рисунок 2 – Зависимость удельных эксплуатационных затрат на очистку СВ от расхода воды при использовании НТВ (маршрут 2)

Задача содержит следующие ограничения:

$$\begin{cases} \frac{C_\phi \cdot Q_\phi + C \cdot (1 - \delta_1) \cdot q_1 + C \cdot (1 - \delta_2) \cdot q_2}{Q_\phi + q_1 + q_2} \leq \text{ПДК}; \\ q_1 + q_2 = 1; \\ q_i \geq 0, i = 1, 2. \end{cases} \quad (15)$$

В результате решения оптимизационной задачи (с помощью системы Excel) получим значения $q_1 = 0,55 \text{ м}^3/\text{с}$ и $q_2 = 0,45 \text{ м}^3/\text{с}$. Концентрация нефтепродуктов ($\text{мг}/\text{дм}^3$) в КС при этом будет равна

$$C_{nc} = \frac{C_{\phi} \cdot Q_{\phi} + C \cdot (1 - \delta_1) \cdot q_1 + C \cdot (1 - \delta_2) \cdot q_2}{Q_{\phi} + q_1 + q_2} = \frac{0,12 + 0,8 \cdot 0,55 + 0,2 \cdot 0,45}{13} = 0,05. \quad (16)$$

Таким образом, оптимальным распределением потока СВ будет направление 45 % воды по маршруту 1 и 55 % – по маршруту 2. В этом случае концентрация нефтепродуктов в КС составит $0,05 \text{ мг}/\text{дм}^3$, что соответствует ПДК для ВО рыбохозяйственной категории водопользования.

Следует отметить, что принятый критерий оптимизации не учитывает интересы отдельных собственников, а значит, не отвечает условиям рыночной экономики. Поэтому практическое использование оптимизационного подхода требует внесения коррективов в законодательство, регулирующие финансовые затраты предприятий на водоохранные мероприятия.

ВЫВОДЫ

Содержащийся в [2] оптимизационный подход к расчету допустимых концентраций загрязняющих веществ в СВ, основанный на минимизации затрат на водоочистку, формально является допустимым. Однако его практическому применению препятствует отсутствие учета рыночных отношений при распределении затрат на очистку СВ между водопользователями, а также учета капитальных затрат на строительство ОС при рассмотрении альтернативных способов очистки СВ. Первая проблема требует корректировки водоохранного законодательства и не может быть устранена на методическом уровне. Вторую можно решить усложнением функции цели путем добавления слагаемого, выражающего капитальные вложения в водоохранные мероприятия.

Для практической реализации оптимизационного подхода разработчик ПДС должен иметь информацию

Розглянуто оптимізаційний підхід до нормування скидання стічних вод у водні об'єкти. Відзначено проблеми його практичного використання, наведено приклад розрахунку оптимального розподілу потоку стічних вод, що містять нафтопродукти.

о стоимостных характеристиках различных способов очистки, поэтому целесообразно создать доступную разработчику ПДС базу данных по экономическим показателям существующих технологий очистки СВ. При выборе адекватной экономической модели следует также учитывать последние достижения в области экологического менеджмента, тем более что в реальной ситуации очистка воды по различным показателям осуществляется на разных устройствах. При этом следует использовать общие экономические закономерности, описанные в литературе, так как индивидуальная оценка экономических характеристик каждого водопользователя при расчете ПДС является слишком трудоемкой подзадачей.

Отметим, что изложенный в [2] оптимизационный подход учитывает зависимость стоимости очистки только от объема очищаемой воды и не рассматривает зависимость от степени очистки, что обуславливает появление методической погрешности при поиске оптимального решения. Таким образом, предметом дальнейших исследований в данной области должен стать учет зависимости стоимости очистки от ее качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Водный кодекс Украины. – К. : Ін Юре, 2004. – 138 с.
2. Інструкція про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами ; затв. Мінприроди України 15.12.94. – Х. : УкрНЦОВ, 1994. – 79 с.
3. **Бабина, Ю.В.** Экологический менеджмент : учеб. пособие / Ю.В. Бабина, Э.А. Варфоломеева. – М. : ИД «Социальные отношения», Изд-во «Перспектива», 2002. – 207 с.
4. Рекомендации по оценке и выбору технико-экономических характеристик сооружений очистки городских сточных вод / Минводхоз СССР. – Х. : ВНИИВО, 1987. – 10 с.
5. **Кафаров, В.В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1971. – 180 с.

Поступила в редакцию 08.07.2013

Optimization approach to regulating discharge of wastewater into water bodies is considered. Problems of its practical use are emphasized; example of calculation of wastewater containing oil products is given.