

УДК 504.4.054

О. А. Проскурнин, канд. техн. наук, старш. научн. сотр.
(УкрНИИЭП)

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К НОРМИРОВАНИЮ СОСТАВА ОТВОДИМЫХ В ВОДОТОК СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ СЛУЧАЯ НЕПОЛНОГО РАЗБАВЛЕНИЯ

Описывается оптимизационный подход к нормированию сброса в водный объект последовательно трансформирующихся веществ со сточными водами. Цель оптимизационной задачи – определение максимально допустимой антропогенной нагрузки на водный объект. Рассматривается случай неполного разбавления сточных вод в водотоке. Приводится демонстрационный пример расчета для веществ азотной группы.

Ключевые слова: *нормирование, сточные воды, загрязняющее вещество, трансформация, оптимизация.*

Согласно существующему водному законодательству [1], для предприятий-водопользователей разрабатываются и утверждаются предельно допустимые сбросы (ПДС) загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты (ВО) со сточными водами (СВ). В действующей «Инструкции по разработке и утверждению ПДС...» [2] содержатся два возможных подхода к решению данной задачи. Базовый подход основан на равномерном использовании ассимилирующей способности ВО ([2], прилож. 1, п. 1.2.4). Он предписывает проводить расчет ПДС отдельно по каждому веществу с учетом интенсивности его химического разложения, определяемого коэффициентом неконсервативности. Однако базовый подход не решает ряд подзадач, наиболее существенная из которых – это учет химического превращения (трансформации) в ВО одного вещества в другое вещество, которое является также загрязняющим и для которого устанавливается предельно допустимая концентрация (ПДК).

Альтернативным базовому является оптимизационный подход, при котором расчет ПДС проводится одновременно для всех рассматриваемых веществ с учетом их взаимной трансформации в ВО. Оптимизационная задача по расчету ПДС, приведенная в «Инструкции...» ([2], прилож. 1, п. 1.2.5), имеет целью минимизацию затрат на очистку СВ со стороны всех водопользователей; оптимизационными переменными при этом являются доли расхода СВ, проходящих

по различным технологическим маршрутам их очистки. При этом могут рассматриваться как действующие очистные сооружения (ОС), так и другие варианты. Таким образом, метод расчета по сути сводится к оптимальному управлению комплексом ОС. Однако реализации такого подхода препятствует то обстоятельство, что режим работы ОС диктуется их характеристиками, заложенными на этапе проектирования. Поэтому управление очисткой путем регулирования потоков СВ в общем случае не допускается [3].

Вариант оптимизационного подхода, который не содержит указанного недостатка, описан в [4, 5]. При данном подходе в качестве функции цели берется максимально допустимая комплексная техногенная нагрузка на ВО, не приводящая к нарушению требуемых норм качества воды в контрольном створе (КС) по каждому отдельному показателю либо для групп показателей с единым лимитирующим признаком вредности (ЛПВ) [5]. Однако как данный подход, так и подход, содержащийся в «Инструкции...» [2], применимы только для случая полного разбавления СВ водой ВО, что делает затруднительным их использование для крупных и средних рек.

Целью данной работы является постановка оптимизационной задачи по расчету ПДС последовательно трансформирующихся веществ. При этом:

- рассматривается случай неполного смешения СВ водой ВО;
- цель оптимизационной задачи – максимизация общей массы загрязняющих веществ, поступающих в ВО.

Задача рассматривается для водотока рыбохозяйственной категории водопользования с одним КС на примере минеральных веществ азотной группы (табл. 1). (Оптимизационная задача по расчету ПДС, включающая в рассмотрение органический азот, для которого отсутствует ПДК, но который в то же время формально является обязательным для нормирования [6, 7], была рассмотрена в работе [4].)

При отсутствии естественного природного фонового содержания веществ в ВО процесс трансформации описывается матричной формулой [8]:

$$C(t) = A(t) \cdot C_0, \quad (1)$$

где C_0 , $C(t)$ – векторы концентраций веществ соответственно в начальный момент и в момент времени t ; $A(t)$ – матрица трансформации.

1. Последовательно трансформирующиеся вещества азотной группы

Загрязняющее вещество	Индекс k	ПДК, мг/дм ³
Азот аммонийный	1	0,39
Азот нитритный	2	0,02
Азот нитратный	3	9,03

Поскольку реакция протекает в одном направлении и вещества проиндексированы в последовательности, соответствующей их химическому превращению, то матрица трансформации $A(t)$ является треугольной. Ненулевые элементы матрицы в этом случае определяются по формулам [8]:

$$\begin{aligned}
 a_{kk} &= \exp(-n_k \cdot t); \\
 a_{2,1} &= f(2, 2, 3); \\
 a_{3,2} &= f(3, 3, 4);
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$a_{3,1} = n_1 / (n_2 - n_1) \cdot (f(3, 2, 4) - a_{3,2}),$$

где $n_k, k = 1 \div 3$, – коэффициенты трансформации; $f(j, i, p) = n_j / (n_p - n_i) \cdot [\exp(-n_i \cdot t) - \exp(-n_p \cdot t)]$.

Согласно «Инструкции...» [2], при неполном разбавлении СВ вывод о степени техногенного влияния на ВО делается по максимально загрязненной части потока, в качестве которой рассматривается часть речной воды в прибрежной зоне. Однако при наличии нескольких выпусков СВ, расположенных на разных берегах, а также при значительном фоновом загрязнении водотока максимальное загрязнение может находиться также в срединной части. Более того, в общем случае максимальное загрязнение воды по каждому показателю находится в различных частях поперечного сечения водотока. В связи с этим в данной работе приняты следующие упрощения:

- рассматривается «плоская» задача, т. е. игнорируется неравномерность глубины водотока;

- полагается, что загрязняющее вещество распространяется равномерно в поперечном потоку направлении в границах, определяемых кратностью разбавления.

В этом случае КС разбивается на равномерно загрязненные участки (РЗУ), границы которых удалены от правого берега на расстояния

$$l = \begin{cases} \frac{q^i n^i}{hv} & \text{для правобережных выпусков,} \\ B - \frac{q^i n^i}{hv} & \text{для левобережных выпусков,} \end{cases}$$

где i – индекс выпуска СВ (здесь и далее верхние индексы означают привязку к источнику загрязнения; нижние индексы – означают привязку к веществам); q^i – расход СВ; n^i – кратность разбавления СВ; B – ширина реки; h – средняя глубина реки.

В качестве функции цели принимается сумма

$$Z = \sum_{i=1}^m q^i \sum_{k=1}^3 \mu_k^i x_k^i \rightarrow \max,$$

где m – количество выпусков; k – индекс вещества; x_k^i – искомая допустимая концентрация вещества; μ_k^i – весовой коэффициент.

Весовые коэффициенты μ_k^i могут зависеть от различных факторов, в частности, от ПДК вещества и от стоимости очистки. Подбор весовых коэффициентов также должен обеспечивать технологически достижимый результат расчета. Однако в настоящей статье вопрос выбора весовых коэффициентов не рассматривается.

Не нарушая общности, полагается, что фактические концентрации загрязняющих веществ в СВ превосходят ПДК. (В противном случае соответствующие величины x_k^i рассматриваются как константы и уменьшается лишь размерность задачи.) Без учета ЛПВ ограничения определяются следующими требованиями «Инструкции...» [2]:

- непревышение ПДК веществ в КС;
- ограничение искомых допустимых концентраций снизу величиной ПДК и сверху фактической концентрацией в СВ.

Формально система ограничений записывается в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{i=1}^m d_z^i q^i \sum_{j=1}^k a_{kj}^i x_j^i + d_z^\phi q^\phi \sum_{j=1}^k a_{kj}^\phi C_j^\phi}{Q_z} \leq C_{ПДК,k}, \quad k = 1 \div 3, \quad z = 1 \div Z; \\ x_k^i \leq C_k^i, \quad k = 1 \div 3, \quad i = 1 \div m; \\ x_k^i \geq C_{ПДК,k}, \quad k = 1 \div 3, \quad i = 1 \div m; \end{array} \right. \quad (3)$$

где C_k^i – фактическая концентрация вещества в СВ; $C_{ПДК,k}$ – ПДК вещества; C_j^ϕ – концентрация вещества в фоновом створе ВО (выше выпусков); z – индекс РЗУ; Z – количество РЗУ; Q_z – расход воды на РЗУ; $d_z^i = q^i/Q_z$, $d_z^\phi = q^\phi/Q_z$ – соответственно доля СВ выпуска i и речной воды, поступающей из фонового створа, попадающая в РЗУ z .

Элементы матриц трансформации в (3) могут быть рассчитаны по формулам (2) [8]. Момент времени t при этом равен времени добегания воды до КС.

Следует заметить, что п. 2.12 «Инструкции...» [2] позволяет для веществ азотной группы назначать допустимые концентрации выше фактических в том случае, если содержание этих веществ в СВ увеличивается в процессе очистки. Поэтому в системе ограничений в качестве верхней границы искомых концентраций могут назначаться не фактические концентрации, а более высокие значения, определяемые техническими параметрами очистных сооружений.

Поскольку функция цели (2) и ограничения (3) линейны относительно искомых концентраций, то данная задача оптимизации является задачей линейного программирования (ЗЛП) [9]. Для решения задачи симплекс-методом (основным методом решения ЗЛП) необходимо данную ЗЛП привести к каноническому виду. С этой целью проводятся следующие преобразования:

- переход к одинарному индексу переменных:

$$x_k^i = x_{(i-1)3+k};$$

- замена максимизации функции цели минимизацией противоположной функции:

$$-Z = -\sum_{i=1}^m q^i \sum_{k=1}^3 \mu_k^i x_{(i-1)5+k} \rightarrow \min;$$

- запись ограничений в виде равенств путем введения дополнительных переменных:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{i=1}^m d_i^z q^i \sum_{j=1}^5 a_{kj}^i x_j^i}{C_{ПДК,k}} + x_{6+z} = Q_z - \frac{d_\phi^z q^\phi \sum_{j=1}^5 a_{kj}^\phi C_j^\phi}{C_{ПДК,k}}, \quad k = 1 \div 3; z = 1 \div Z; \\ -x_{(i-1)3+k} + x_{m \cdot Z + (i-1)3+k} = -C_{ПДК,k}, \quad i = 1 \div m, k = 1 \div 3; \\ x_{(i-1)3+k} + x_{m \cdot (3+Z) + (i-1)3+k} = C_k^i, \quad i = 1 \div m, k = 1 \div 3; \\ x_k \geq 0, \quad k = 1 \div 3 \cdot Z + 6 \cdot m. \end{array} \right.$$

Величины $x_{7+(z-1)+1}/Q_z$, $x_{7+(z-1)+2}/Q_z$, $x_{7+(z-1)+3}/Q_z$ ($z = 1 \div Z$) в данной задаче равны отклонениям (в сторону уменьшения) концентраций от ПДК соответственно азота аммонийного, нитритного и нитратного для каждого РЗУ.

Ниже приводится демонстрационный пример нахождения допустимых концентраций веществ в СВ путем решения оптимизационной задачи. Рассматривается сброс СВ в русло реки через два взаимодействующих выпуска, расположенных на расстоянии 230 м друг от друга; КС расположен в 1,4 км от нижнего выпуска. (Большое расстояние до КС выбрано с целью большей наглядности эффекта трансформации.) Исходные данные по выпускам приведены в табл. 2.

Следуя принятым допущениям относительно разбиения КС на участки, в данной задаче рассматриваются три РЗУ. На рис. 1 приведена иллюстрация распространения загрязняющего вещества от выпусков СВ до КС.

Весовые коэффициенты приняты равными единице:

$$\mu_k^i = 1, \quad i = 1 \div 2, \quad k = 1 \div 3.$$

2. Исходные данные для расчета ПДС

Параметр	Фоновый створ	Выпуск № 1	Выпуск № 2
Время добега воды до КС, сут.	1/3	1/4	1/3,5
Расход воды, м ³ /с	5	3	2
Кратность разбавления СВ	–	7/3	5/2
Концентрации веществ, мг/дм ³ :			
азот аммонийный	0,003	8	15
азот нитритный	0,002	3,5	7
азот нитратный	0,5	17	25

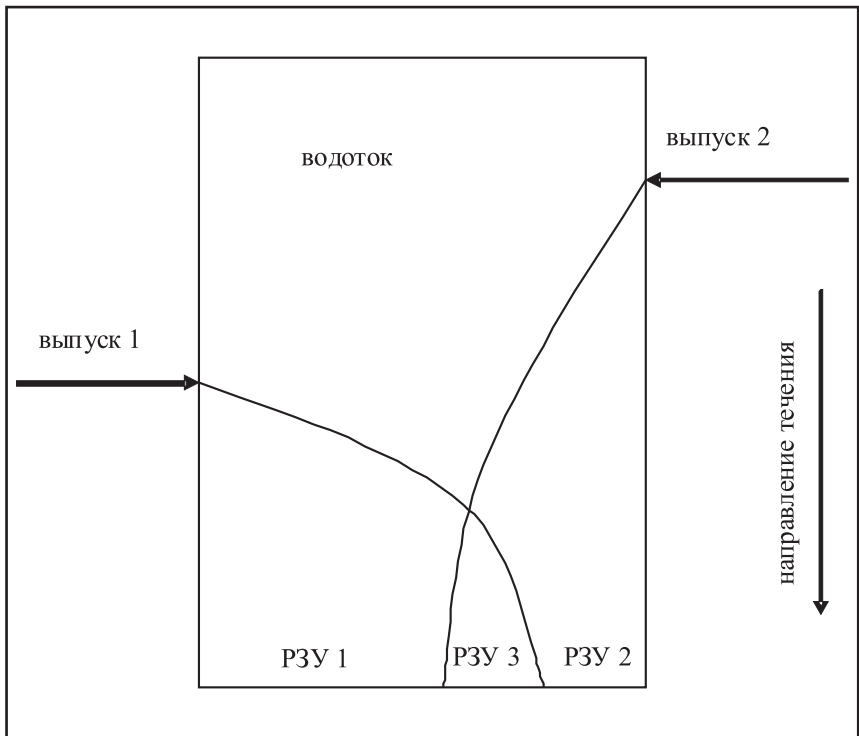


Рис. 1. Участки равномерного загрязнения вдоль КС

Для природной речной воды коэффициенты трансформации взяты по справочным данным [8] (на уровне верхней границы приведенного диапазона): азот аммонийный – 0,21; азот нитритный – 4,32; азот нитратный – 0,17. Однако в смеси речных и сточных вод процессы трансформации менее интенсивны. Это обусловлено тем, что в сточных водах фактически отсутствует микрофлора, способствующая протеканию биохимических реакций. Поэтому значения коэффициентов трансформации будут увеличиваться по мере проникновения речной воды в поток сточной воды, и интегральная оценка коэффициентов в этом случае представляет собой отдельную задачу. В данном примере полагается, что коэффициенты трансформации пропорциональны доли природной воды в общей смеси, а характер смешения не существенно отличается от линейного. В силу данного допущения, которое не влияет на общий ход рассуждений в рамках цели настоящей статьи, коэффициенты трансформации веществ в смеси приняты равными: $n_{\text{смесь},k} = 0,29 \cdot n_k$ (выпуск № 1) и $n_{\text{смесь},k} = 0,30 \cdot n_k$ (выпуск № 2).

Опуская механизм решения данной задачи симплекс-методом, в табл. 3 и 4 приведем оптимальное решение, а также результат решения этой задачи методом согласно [2, прилож. 1, п. 1.2.4].

3. Результат расчета допустимых концентраций веществ в сточных водах

Вещество	Оптимизационный метод		Расчет согласно [2, прилож. 1, п. 1.2.4]	
	Выпуск № 1	Выпуск № 2	Выпуск № 1	Выпуск № 2
Азот аммонийный	0,60	0,39	0,57	0,57
Азот нитритный	0,03	0,02	0,10	0,10
Азот нитратный	17,0	25,0	13,65	13,65

Сравнивая оба результата, увидим, что при расчете оптимизационным методом экологические требования соблюдаются на всех РЗУ, в то время как расчет согласно «Инструкции...» [2, прилож. 1, п. 1.2.4] приводит к превышению ПДК азота нитритного на 1-м РЗУ и к превышению ПДК азота аммонийного и азота нитритного на 3-м РЗУ, что связано с игнорированием процессов трансформации веществ.

**4. Расчетные концентрации веществ в КС
(с учетом процессов трансформации) при условии достижения ПДС**

Вещество	Оптимизационный метод			Расчет согласно [2, прилож. 1, п. 1.2.4]		
	Концентрация в КС, мг/дм ³	ПДК, мг/дм ³	Приведенная к ПДК концентрация	Концентрация в КС, мг/дм ³	ПДК, мг/дм ³	Приведенная к ПДК концентрация
РЗУ 1						
Азот аммонийный	0,239	0,39	0,61	0,233	0,39	0,60
Азот нитритный	0,016	0,02	0,80	0,022	0,02	1,10
Азот нитратный	0,026	9,03	0,003	0,013	9,03	0,001
РЗУ 2						
Азот аммонийный	0,154	0,39	0,39	0,216	0,39	0,55
Азот нитритный	0,005	0,02	0,25	0,019	0,02	0,95
Азот нитратный	0,008	9,03	0,001	0,012	9,03	0,001
РЗУ 3						
Азот аммонийный	0,390	0,39	1,00	0,447	0,39	1,15
Азот нитритный	0,02	0,02	1,00	0,041	0,02	2,05
Азот нитратный	0,03	9,03	0,003	0,023	9,03	0,003

Вывод

Описанный в статье оптимизационный подход к расчету ПДС позволяет определять состав СВ, обеспечивающий максимально допустимую комплексную техногенную нагрузку на ВО. При этом учитываются процессы трансформации веществ, а также неравномерность загрязнения воды в поперечном сечении водотока.

Следует заметить, что справочные данные по коэффициентам трансформации азотных веществ носят приближенный характер и практическая реализация оптимизационного подхода требует в качестве отдельной задачи определения этих коэффициентов исходя из реальных свойств ВО. Одним из способов решения такой задачи является использование статистических методов. При этом возможно как непосредственное применение регрессионного анализа, так и линеаризация модели (1) с последующей идентификацией ее параметров статистическими методами [10].

Основные направления дальнейших исследований в данной области следующие:

- постановка оптимизационной задачи для участка бассейна реки с несколькими КС;
- учет рыночных отношений при распределении затрат на очистку сточных вод;
- включение в оптимизационную задачу всех показателей качества воды, по которым осуществляется очистка СВ, а также разработка рекомендаций по выбору параметров функции цели с целью получения технологически достижимого результата расчета;
- определение весовых коэффициентов в функции цели с учетом специфики технологии основного производства.

Также следует заметить, что при дальнейшем усложнении задачи с целью ее большей адекватности реальным условиям водоотведения, оптимизационная задача может оказаться нелинейной. В этом случае оптимальный состав сточных вод необходимо будет определять с помощью одного из методов нелинейного программирования, например, методом градиентного спуска [11].

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» // <http://ecopravo.org.ua/2008/11/19/zakon-ukrani-pro-oxoronu-navkolishnjogo-prirodnogo-seredovischa>.
2. Інструкція про порядок розробки та затвердження гранично-допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами : затв. Мінприроди України 15.12.1994. – Харків : УкрНЦОВ, 1994. – 79 с.
3. Канализация населённых мест и промышленных предприятий : Справочник проектировщика / *Н. И. Лихачев, И. И. Ларин, С. А. Хаскин* и др. – М. : Стройиздат, 1981. – 639с.
4. *Проскурнин О. А.* Нормирование поступления взаимно трансформирующихся веществ в водный объект со сточными водами / *О. А. Проскурнин* // *Наук. вісн. будівництва*. – Х. : ХДТУБА ХОТВ АБУ. – 2008. – № 46. – С. 189–195.
5. *Проскурнин О. А.* Оптимизационный подход к ограничению содержания веществ, нормируемых по лимитирующим признакам вредности, в сточных водах / *О. А. Проскурнин* // *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки : зб. наук. пр. УкрНДІЕП*. – Х. : Райдер, 2010. – № 32. – С. 162–172.

6. О порядке разработки и утверждения нормативов предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ и перечень загрязняющих веществ, сброс которых нормируется : Постановление КМУ № 1100 от 11 сентября 1996 г. // Собрание постановлений правительства Украины. – 1997. – №. 17 – С. 490.
7. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю. Ю. Лурье – М. : Химия, 1984. – С. 66–67.
8. Хват В. А. Справочник по охране водных ресурсов / В. А. Хват, В. Н. Львов, В. Н. Ладыженский. – К. : Урожай, 1989. – 176 с.
9. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация: Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М.: Мир, 1985. – 512 с.
10. Василенко С. Л. Статистические модели последовательной трансформации веществ в водотоках с непрерывными источниками вдоль потока / С. Л. Василенко // Проблемы охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки : зб. наук. пр. УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2004. – С. 54–66.
11. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию / Б. Т. Поляк. – М. : Наука, 1983. – 384 с.

Проскурнін О. А. ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО НОРМУВАННЯ СКЛАДУ СТІЧНИХ ВОД, ЩО ВІДВОДЯТЬСЯ У ВОДОТОКИ, ДЛЯ ВИПАДКУ НЕПОВНОГО РОЗБАВЛЕННЯ

Описується оптимізаційний підхід до нормування скидання у водний об'єкт речовин, що послідовно трансформуються, із стічними водами. Мета оптимізаційної задачі – визначення максимально допустимого антропогенного навантаження на водний об'єкт. Розглядається випадок неповного розбавлення стічних вод у водотоці. Наводиться демонстраційний приклад розрахунку для речовин азотної групи.

Ключові слова: *нормування, стічні води, забруднююча речовина, трансформація, оптимізація.*

Proskurnin O. A. OPTIMIZATION APPROACH TO SETTING OF THE DISCHARGED INTO THE WATERCOURSE WASTE WATER FOR DILUTION CASE OF INCOMPLETE

Describes an optimization approach to regulating water discharges consistently transforming substances from wastewater. The goal of the optimization problem – determining the maximum allowable load on the human body of water. The case of partial dilution of waste water in the stream. We present a demo of the calculation for nitrogen group of substances.

Keywords: *normalization, wastewater, pollutant, transformation, optimization.*