

Проскурнин О. А.

НОРМИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В СТОЧНЫХ ВОДАХ, ПОСТУПАЮЩИХ В ВОДНЫЙ ОБЪЕКТ

В статье обосновывается наличие методических недоработок при нормировании содержания растворенного кислорода в сточных водах, отводимых в водные объекты. Предлагается допустимое содержание растворенного кислорода находить путем решения оптимизационной задачи. Критерием оптимизации является максимально допустимая техногенная нагрузка на экосистему. Рассматривается случай полного разбавления сточных вод в водотоке. Приводится демонстрационный пример расчета для двух выпусков.

Ключевые слова: сточные воды, водный объект, растворенный кислород, допустимые концентрации.

1. Введение

Одной из экологических проблем экономически развитых стран является загрязнение водных объектов (ВО) сточными водами (СВ), отводимых от промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных предприятий. С целью недопущения уровня загрязнения ВО выше безопасного в Украине для предприятий-водопользователей разрабатываются и утверждаются предельно допустимые сбросы (ПДС) загрязняющих веществ, поступающих в ВО со СВ [1]. ПДС представляет собой допустимую массу загрязняющего вещества, которая может сбрасываться в ВО в единицу времени.

Методической базой разработки ПДС является «Инструкция по разработке и утверждению ПДС...» [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).

Список нормируемых веществ, для которых производится расчет ПДС, определяется Постановлением КМУ от 11.09.1996 г. [3]. Согласно данному Постановлению, в список обязательных для нормирования веществ входит растворенный кислород, который, в отличие от загрязняющих веществ, благоприятно влияет на качественное состояние водной экосистемы. Поэтому ухудшение качества природной воды по показателю растворенный кислород за счет попадания в нее СВ заключается не в увеличении его концентрации кислорода, а, напротив, в возможном его снижении ниже допустимого уровня.

Таким образом, совершенствование методологии нормирования водоотведения в плане учета содержания растворенного кислорода в СВ является актуальным. Более перспективным при этом видится оптимизационный подход, учитывающий трансформацию веществ в ВО.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В «Инструкции...» содержатся два возможных подхода к нормированию состава СВ. При оптимизационном подходе [2, приложение 1, п. 1.2.5] расчет ПДС проводится одновременно для всех рассматриваемых веществ с учетом их взаимной трансформации в ВО. Целью оптимизационной задачи является минимизация общих затрат на очистку СВ со стороны всех водопользователей; оптимизируемыми переменными являются доли расхода СВ, проходящих по различным технологическим маршрутам их очистки. Таким образом, расчет ПДС по сути сводится к оптимальному управлению комплексом очистных сооружений [4, 5]. Однако реализации оптимизационного подхода препятствует то обстоятельство, что режим работы очистных сооружений диктуется их характеристиками, заложенными на этапе проектирования [6, 7]. Поэтому управление очисткой путем регулирования потоков СВ в общем случае недопустимо [8].

По этой причине в практических задачах расчет ПДС производится исходя из равномерного использования ассимилирующей способности ВО [2, приложение 1, п. 1.2.4]. Данный подход предписывает проводить расчет ПДС отдельно по каждому веществу с учетом интенсивности его химического разложения, определяемого коэффициентом неконсервативности. Однако указанный подход применим к расчету загрязняющих веществ и не позволяет определять минимально допустимое содержание растворенного кислорода в СВ.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования является антропогенное влияние на качество воды ВО по показателю растворенный кислород.

Целью работы является постановка оптимизационной задачи для определения минимально допустимого содержания растворенного кислорода в СВ. Задача рассматривается на примере отведения СВ в водоток.

Для достижения поставленной цели необходимо определить функцию цели, оптимизируемые переменные и систему ограничений.

Метод исследования — линейное программирование.

4. Основной материал исследований

4.1. Исследование закономерностей формирования кислородного режима в ВО. Многофакторное исследование закономерностей формирования кислородного режима в ВО проводилось в рамках многих работ ныне УкрНИИЭП) в 1970–1980 годах [9]. Было доказано, что поступление и расход кислорода в воде определяется большим количеством химических и биологических факторов, связанных с гидрологическими характеристиками ВО, биоразнообразием микрофлоры и высшей водной растительности. Однако в задачах нормирования, согласно «Инструкции...», принят упрощенный подход, учитывающий действие двух противоположных процессов [10]:

1) потребление кислорода органическими веществами, определяемое интегральным показателем БПК (биологическое потребление кислорода);

2) реаэрация — поступление кислорода из атмосферного воздуха и его растворение в воде ВО.

Существенным отличием расчета допустимой концентрации растворенного кислорода в сравнении с аналогичным расчетом для загрязняющих веществ состоит в том, что предельно допустимой концентрацией (ПДК) кислорода в ВО является не верхняя, а нижняя допустимая граница, определяемая категорией водопользования.

При расчете концентрации растворенного кислорода вводится в рассмотрение понятие дефицит кислорода D — разность между концентрацией кислорода в воде при полном насыщении (т. е. в пределах его растворимости при заданных температуре и давлении) $C_{\text{нас}}$ и его фактической концентрацией C :

$$D = C_{\text{нас}} - C.$$

Процесс реаэрации описывается экспоненциальной зависимостью подобно процессу самоочищения:

$$D(t) = D_0 \cdot \exp(-k_p t),$$

где t — текущее время, сут; D_0 — начальный дефицит кислорода, мг/дм³; k_p — константа реаэрации, 1/сут.

Интенсивность реаэрации — это уникальное свойство водотока, зависящее от большого числа факторов. Поэтому определение константы реаэрации в лабораторных условиях не представляется возможным. Для приближенных расчетов можно принять следующие значения константы реаэрации для температуры воды 20 °С: для малых рек $k_p = 0,5-0,8$, для средних и крупных малых рек со скоростью течения до 0,5 м/с $k_p = 0,2-0,25$, для рек со скоростью течения более 0,5 м/с $k_p = 0,3-0,8$ [10].

Для произвольной температуры воды T константа реаэрации пересчитывается по формуле [10]:

$$k_p(T) = k_p(20) \cdot 1,0159^{T-20}.$$

Действие обоих процессов (биологического потребления и реаэрации), описывается формулой Фелпса и Стритера [10]:

$$D(t) = \frac{k_{\text{БПК}} \cdot C_{\text{БПК}}}{k_p - k_{\text{БПК}}} \cdot (\exp(-k_{\text{БПК}} t) - \exp(-k_p t)) + D_0 \cdot \exp(-k_p t), \quad (1)$$

где $k_{\text{БПК}}$ — коэффициент неконсервативности показателя БПК.

Окончательно концентрация растворенного кислорода определяется как разность:

$$C(t) = C_{\text{нас}}(T) - D(t). \quad (2)$$

В результате действия обоих процессов концентрация кислорода в воде не изменяется монотонно, а имеет локальный минимум. Характер динамики изменения концентрации растворенного кислорода в ВО приведен на рис. 1.

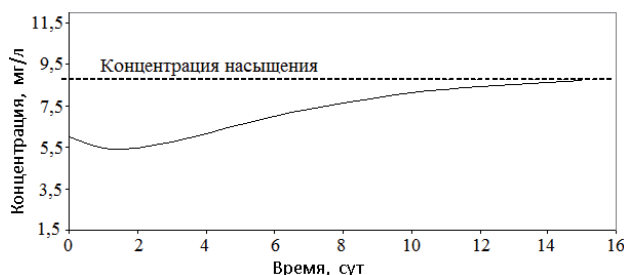


Рис. 1. Динамика изменения концентрации растворенного кислорода в ВО

Момент времени, соответствующий минимальной концентрации кислорода, определяется уравнением:

$$t_{\text{кр}} = \frac{\ln \left[\frac{k_p}{k_{\text{БПК}}} \cdot \left(1 - \frac{D_0 \cdot (k_p - k_{\text{БПК}})}{k_p C_{\text{БПК}}} \right) \right]}{(k_p - k_{\text{БПК}})}.$$

4.2. Оптимизационный подход к нормированию водотока. В работах [4, 5] был предложен вариант оптимизационной задачи для расчета ПДС, где в качестве функции цели бралась максимально допустимая комплексная техногенная нагрузка на ВО, не приводящая к нарушению требуемых норм качества воды в контрольных створах (КС) по каждому загрязняющему веществу. Оптимизируемыми переменными являлись концентрации загрязняющих веществ в СВ. Видится целесообразным применение данного подхода и к нахождению минимально допустимой концентрации кислорода в СВ.

4.3. Постановка оптимизационной задачи для определения допустимого содержания растворенного кислорода в СВ. В настоящей работе при постановке оптимизационной задачи по расчету ПДС приняты следующие упрощения:

— рассматривается случай полного смешения СВ с водой ВО;

— не принимается во внимание взаимосвязь содержания растворенного кислорода в СВ на выходе из ОС с показателем БПК. В этом случае функция цели записывается следующим образом:

$$Z = \sum_{i=1}^m q^i (\mu_{\text{БПК}}^i \cdot x_{\text{БПК}}^i - \mu_{\text{РК}}^i \cdot x_{\text{РК}}^i) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где i — порядковый номер выпуска СВ; m — количество выпусков; $x_{\text{БПК}}^i, x_{\text{РК}}^i$ — соответственно искомая допустимая величина БПК и концентрация растворенного кислорода; $\mu_{\text{БПК}}^i, \mu_{\text{РК}}^i$ — весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты могут зависеть от различных факторов: от ПДК, от стоимости очистки СВ, от величины платы за загрязнение ВО.

Ограничения в оптимизационной задаче, относящиеся к показателю БПК, будут определяться следующими требованиями «Инструкции..» [2]:

- не превышение ПДК в КС;
- установление допустимых концентраций не выше фактических;
- установление допустимых концентраций не ниже ПДК.

Ограничения, относящиеся к содержанию растворенного кислорода, будут аналогичны, за исключением изменения знака неравенства на противоположный.

Значение БПК в КС определяется исходя из балансового уравнения:

$$C_{\text{БПК}}^{\text{КС}} = \frac{\sum_{i=1}^m q^i [(C_{\text{БПК}}^i - C_{\text{БПК}}^e) \cdot \exp(-n \cdot t^i) + C_{\text{БПК}}^e]}{Q} + \frac{q_{\text{Ф}} [(C_{\text{БПК}}^{\text{Ф}} - C_{\text{БПК}}^e) \cdot \exp(-n \cdot t^{\text{Ф}}) + C_{\text{БПК}}^e]}{Q},$$

где n — коэффициент неконсервативности БПК; t — время добегаания СВ до КС; $C_{\text{БПК}}^i, C_{\text{БПК}}^{\text{Ф}}$ — соответственно значение БПК в СВ выпуска i и фоновом створе выше верхнего выпуска; $C_{\text{БПК}}^e$ — естественное (без учета антропогенного влияния) фоновое значение БПК; Q — расход воды в КС.

Если начать нумерацию выпусков СВ с верхнего, то концентрация растворенного кислорода в районе выпусков при принятых допущениях рассчитывается по рекуррентному соотношению:

$$C_{\text{РК}}^i = \frac{f(C_{\text{РК}}^{i-1}, t^{i-1} - t^i) \cdot \sum_{j=0}^{i-1} q^j + q^i C^i}{\sum_{j=0}^i q^j},$$

где t — время добегаания воды от выпуска до КС; f — расчетная концентрация РК по формулам (1) и (2) с подстановкой $C_0 = C_{\text{РК}}^{i-1}$ и $t = t^{i-1} - t^i$.

При этом фоновый створ рассматривается как нулевой выпуск, а КС — как $(m + 1)$ -й выпуск с нулевым расходом СВ (рис. 2).

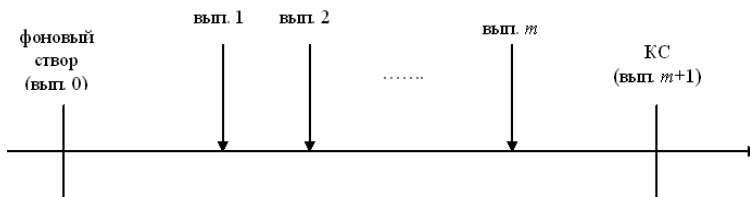


Рис. 2. Схема расположения выпусков СВ

Не нарушая общности, предполагаем, что фактическое значение БПК в СВ превосходит ПДК. (В противном случае снижается лишь размерность задачи, не нарушая общей логики рассуждений). Система ограничений может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} C_{\text{БПК}}^{\text{КС}} \leq \text{ПДК}_{\text{БПК}}, \\ C_{\text{РК}}^{\text{КС}} \geq \text{ПДК}_{\text{РК}}, \\ x_{\text{БПК}}^i \leq C_{\text{БПК}}^i, \\ x_{\text{РК}}^i \geq C_{\text{РК}}^i, \\ x_{\text{БПК}}^i \geq \text{ПДК}_{\text{БПК}}. \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку функция цели (3) и ограничения (4) линейны относительно искомым концентрациям, то данная задача оптимизации является задачей линейного программирования и может быть решена симплекс-методом [11].

4.4. Пример расчета. Демонстрационный пример расчета приводится для двух взаимодействующих выпусков СВ в водоток рыбохозяйственной категории водопользования с одним КС. В табл. 1 приведены исходные данные для расчета.

Таблица 1

Исходные данные для расчета ПДС

Параметр	Фоновый створ	Выпуск № 1	Выпуск № 2
Время добегаания воды до КС, сут	1/3	1/4	1/3,5
Расход воды, м ³ /с	7	1	2
Концентрации, мг/дм ³	—	—	—
БПК	2	5	7
Растворенный кислород	4,5	2	3

Естественная (природная) концентрация БПК принята по справочным данным на уровне 1,8 мг/дм³ [2]. Коэффициент реаэрации кислорода также принят по справочным данным на уровне 0,7. Концентрация насыщенного кислорода принята равной 9,17 мг/дм³, что соответствует нормальному давлению и температуре воды 20 °С.

Опуская процедуру приведения оптимизационной задачи к каноническому виду и составления начальной симплекс-таблицы, в табл. 2 приведен результат решения.

Таблица 2

Результат решения оптимизационной задачи

Концентрации, мг/дм ³	Выпуск № 1	Выпуск № 2	КС
БПК	3,000	6,873	3,000
Растворенный кислород	2,000	3,000	4,777

5. Обсуждение результатов расчета допустимого состава СВ

Как видно из табл. 2, рассчитанный оптимизационным способом допустимый состав СВ по рассматриваемым показателям находится в пределах допустимых норм.

6. Выводы

Поставленная в статье оптимизационная задача позволяет определять минимально допустимую величину растворенного кислорода в СВ, отводимых в ВО.

Для внедрения в практику предлагаемой стратегии необходимо оптимизационную задачу усложнить в плане: — учета рыночных отношений при распределении затрат на очистку СВ; — учета взаимозависимости БПК и количества растворенного кислорода в СВ на этапе очистки.

Указанные нерешенные на настоящий момент проблемы оптимизационного подхода к нормированию водоотведения являются предметом дальнейших исследований в данном направлении.

Литература

1. Водный кодекс Украины [Текст]. — К.: Видавничий Дім «Ін Юре», 2004. — 138 с.
2. Інструкція про порядок розробки та затвердження гранично-допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами [Текст]: Затв. Мінприроди України 15.12.94. — Харків: УкрНЦОВ, 1994. — 79 с.
3. О порядке разработки и утверждения нормативов предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ и перечень загрязняющих веществ, сброс которых нормируется [Текст]: Постановление КМУ № 1100 от 11 сентября 1996 г. // Собрание постановлений правительства Украины. — 1997. — № 17. — С. 490.
4. Проскурнин, О. А. Нормирование поступления взаимно трансформирующихся веществ в водный объект со сточными водами [Текст] / О. А. Проскурнин // Науковий вісник будівництва. — Харків: 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 [Текст]: Зб. наук. пр. УкрНДІЕП / О. А. Проскурнин // Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки. — Харків: ВД «Райдер», 2010. — № 32. — С. 162–173.
6. Vanrolleghem, P. Optimal design of in-sensor-experiments for on-line modelling of nitrogen removal processes [Text] / P. Vanrolleghem, F. Coen // Water Science and Technology. — 1995. — Vol. 31, № 2. — P. 149–160. doi:10.1016/0273-1223(95)00188-s
7. Watts, J. On-line Respirometry: A powerful for ASP operation and design [Text] / J. Watts, W. Garber // 6th IAWQ ICA of Water and Wastewater Treatment. — Hamilton Canada, 1993. — P. 238–248.
8. Лихачев, Н. И. Канализация населенных мест и промышленных предприятий [Текст]: справочник проектировщика / Н. И. Лихачев, И. И. Ларин, С. А. Хаскин и др. — М.: Стройиздат, 1981. — 639 с.
9. Еременко, Е. В. Математическое моделирование кислородного режима участка реки [Текст] / Е. В. Еременко, В. З. Колпак, В. П. Мальханов // Проблемы охраны вод. — Харків: ВНИИВО, 1975. — № 6. — С. 134–143.
10. Черкинский, С. Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы [Текст] / С. Н. Черкинский. — М.: Стройиздат, 1977. — 224 с.
11. Поляк, Б. Т. Введение в оптимизацию [Текст] / Б. Т. Поляк. — М.: Наука, 1983. — 384 с.

НОРМУВАННЯ ВМІСТУ РОЗЧИНЕНОГО КИСНЮ У СТИЧНИХ ВОДАХ, ЩО НАДХОДЯТЬ ДО ВОДНОГО ОБ'ЄКТА

У статті обґрунтовується наявність методичних недоробок при нормуванні вмісту розчиненого кисню в стічних водах, що відводяться у водні об'єкти. Пропонується допустимий вміст розчиненого кисню знаходити шляхом розв'язання оптимізаційної задачі. Критерієм оптимізації є максимально допустиме техногенне навантаження на екосистему. Розглядається випадок повного розбавлення стічних вод в водотоці. Наводиться демонстраційний приклад розрахунку для двох випусків.

Ключові слова: стічні води, водний об'єкт, розчинений кисень, допустимі концентрації.

Проскурнин Олег Аскольдович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, лабораторія проблем формування, регулювання якості вод та інформаційного забезпечення екологічного менеджменту, НІУ «Український науково-дослідницький інститут екологічних проблем», Харків, Україна, e-mail: oaproskurnin@mail.ru.

Проскурнин Олег Аскольдович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, лабораторія проблем формування, регулювання якості вод та інформаційного забезпечення екологічного менеджменту, НДУ «Український науково-дослідницький інститут екологічних проблем», Харків, Україна.

Proskurnin Oleg, Research Institution «Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems», Kharkiv, Ukraine, e-mail: oaproskurnin@mail.ru