

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ БИОХИМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ И БИОХИМИЧЕСКОЙ ПОТРЕБНОСТИ В КИСЛОРОДЕ ТАБЛИЧНЫМ МЕТОДОМ<sup>14</sup>

Готовцев А.В.

Институт водных проблем РАН, г. Москва,

gotov44@mail.ru

Коэффициент скорости биохимического окисления ( $k_0$ ) и биохимическую потребность в кислороде (БПК) предлагается определять с помощью приведенных ниже таблиц. Для определения указанных теоретических величин (БПК и  $k_0$ ) требуется пара экспериментально полученных значений БПК<sub>T</sub> и БПК<sub>2T</sub> (биохимическое потребление кислорода за периоды времени  $T$  и  $2T$  суток, соответственно). В практике мониторинга водных объектов общепринято измерение БПК<sub>5</sub>, что соответствует значению  $T=5$  сут. В этом случае для вычисления обозначенных выше теоретических величин БПК и  $k_0$  достаточно помимо измеренного значения БПК<sub>5</sub> иметь дополнительно измеренное (для той же пробы воды) значение БПК<sub>10</sub>. Измеренную величину БПК<sub>5</sub> можно использовать также в паре с величиной БПК<sub>2,5</sub> (при  $T=2,5$  сут.).

Обратим внимание на принципиальное смысловое различие аббревиатур БПК и БПК<sub>T</sub>. Аббревиатура БПК в зависимости от контекста может обозначать два различных понятия: 1) *процесс* биохимического потребления кислорода; 2) *величину* биохимической потребности в кислороде единицей водного объема. Аббревиатура БПК<sub>T</sub> (с нижним индексом  $T$ ) обозначает только одно понятие, а именно: *величину* биохимического потребления кислорода единицей водного объема за период времени  $T$ , указывающий количество суток, если не оговорена другая единица измерения.

Биохимическое потребление зависит не только от времени (периода инкубации), но и от температуры, а также других условий эксперимента. Именно поэтому для сравнимости результатов договорились о стандартных условиях измерения: проба воды помещается в затемненную (чтобы избежать фотосинтеза) герметичную склянку при температуре 20°C.

Биохимическая потребность – величина, определяющая кон-

---

<sup>14</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00672).

центрацию растворённого в воде органического вещества (ОВ), выраженную в кислородных единицах. В математических выкладках, в частности в дифференциальных уравнениях переноса и распада ОВ, величина БПК обычно обозначается как  $L$ , а величина БПК<sub>T</sub> как  $X_T$ . Если  $L_T$  – значение биохимической потребности в кислороде (т.е. концентрации ОВ) в произвольный момент времени  $T$ , а  $L_0$  – в начальный момент  $T=0$  (например, когда пробу воды только что поместили в колбу для измерения биохимического потребления), то разность  $(L_0 - L_T)$  показывает уменьшение концентрации ОВ в результате биохимического окисления, т.е. величину  $X_T$ . Таким образом, справедливо балансовое соотношение:

$$X_T = L_0 - L_T.$$

Обратим внимание на различный смысл нижнего индекса «Т» в переменных  $L_T$  и  $X_T$ . Для переменной «L» (она же «БПК», она же «биохимическая потребность в кислороде», она же «концентрация ОВ, выраженная в кислородных единицах») индекс «Т» обозначает *момент* времени, которому соответствует *вычисленное* значение этой величины. Для переменной «X<sub>T</sub>» индекс «Т» означает *продолжительность* эксперимента по измерению величины биохимического потребления кислорода.

Для определения  $L_0$  и  $k_0$  требуется пара экспериментально полученных величин  $X_T$  и  $X_{2T}$  (т.е. БПК<sub>T</sub> и БПК<sub>2T</sub>) и соответствующие формулы, для которых необходимо решить так называемую «обратную задачу» относительно исходной «прямой задачи», состоящей в нахождении решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс биохимического окисления ОВ в водном объёме при отсутствии аэрации. Решение «прямой задачи», в свою очередь, зависит от двух параметров:  $L_0$  (начальная концентрация ОВ) и  $k_0$ , которые сами являются неизвестными, более того искомыми величинами.

До недавнего времени для вычисления биохимической потребности в кислороде  $L_0$  и константы неконсервативности  $k_1$  использовались следующие формулы:

$$\text{БПК} \equiv L_0 = \frac{X_T^2}{2X_T - X_{2T}}, \quad k_1 = \frac{1}{T} \ln \frac{X_T}{X_{2T} - X_T}. \quad (1)$$

Неизвестно, кем и когда впервые были получены выражения (1), по-видимому, их вывод был выполнен в промежутке между 1937 и 1973 годами на основе решения обратной задачи для классической системы Стритера–Фелпса [1]. Так, в публикации [2, 1937 г.] автору, по-видимому, ещё не известно о том, что можно получить точное аналитическое решение обратной задачи, если использовать для измерения биохимического потребления кратные интервалы времени (например,  $T$  и  $2T$ ). Поэтому в [2] ищется приближенное численное решение для произвольного случая, используя метод линеаризации трансцендентного уравнения, а именно, разложение решения в ряд Тейлора с оставлением первого члена ряда.

В 1973 г. в документе «Руководство... 1973» [3], без ссылки на источник, уже приводятся формулы для БПК и  $k_1$  с использованием аргументов  $T$  и  $2T$ , однако в них, так же как и в решении дифференциального уравнения (прямая задача), были допущены ошибки, что было показано через 36 лет в [4]. В следующем издании («Руководство... 1977») ошибочные формулы были изъяты, а верные не приведены. В то же время в руководствах по анализу БПК в сточных водах встречаются выражения (1), но без вывода и указания источника. Корректный вывод выражений (1) при решении обратной задачи для классической системы Стритера–Фелпса [1], а также обсуждение возможности их применения в практике мониторинга водных объектов, можно найти, например, в [4], [5].

Назовём формулы (1) «старыми», так как далее предлагается использовать на практике «новые формулы» (2). Необходимость вывода новых формул объясняется тем, что в [6] был найден существенный недостаток классической системы Стритера–Фелпса, на основе получены формулы (1). Этот недостаток обусловлен отсутствием связи между скоростью окисления ОВ и концентрацией растворенного кислорода (РК), что может приводить к физически некорректным решениям, когда расчетная концентрация РК становится отрицательной величиной (физический нонсенс). Для устранения этого недостатка в [6] предложена «модифицированная система Стритера–Фелпса», отличающаяся от классической системы Стритера–Фелпса тем, что в ней добавлено третье уравнение, отражающее гипотезу о линейной зависимости между коэффициентом скорости распада  $k_1$  и концентрацией РК. Далее в [7] сформулирована и решена обратная задача относительно двух неизвестных  $L_0$  и  $k_0$  :

$$\text{БПК} = L_0 = \frac{X_T^2 \cdot (X_{2T} - C_S)}{X_T^2 - 2X_T C_S + X_{2T} C_S},$$

$$k_0 = \frac{C_S \cdot (X_T^2 - 2C_S X_T + C_S X_{2T})}{T \cdot (C_S - X_T) \cdot (X_T X_{2T} - 2C_S X_T + C_S X_{2T})} \ln \left( \frac{X_T \cdot (C_S - X_{2T})}{C_S \cdot (X_{2T} - X_T)} \right). \quad (2)$$

Нетрудно проверить, что «новые формулы» эквивалентны «старым» при  $X_T \rightarrow 0$ .

На первый взгляд новые выражения (2) выглядят более громоздкими, чем старые (1). Однако они должны заменить старые, поскольку более точно описывают биохимический процесс, а их область определения (более узкая, чем у старых формул) позволяет отбраковывать некорректные экспериментальные данные.

Результаты расчёта БПК и  $k_0$  с помощью (2) представлены в табл. 1 а, 1 б и 1 в как зависимость от БПК<sub>T</sub> для разных диапазонов значений. Значения  $k_0$  (в скобках) вычислены при  $T=5$  сут. В противном случае, коэффициенты  $k_0$  следует пересчитать по формуле:

$$k_0(T) = \frac{5}{T} k_0(5). \quad (3)$$

Значения БПК не зависят от  $T$  и поэтому пересчета не требуют.

Далее поясним на следующих примерах, как пользоваться приведёнными ниже таблицами.

**Пример 1.** Пусть эксперимент (т.е. два гидрохимических измерения одной и той же пробы воды) показал: БПК<sub>5</sub>=5 мг/л; БПК<sub>10</sub>=6.5 мг/л. Значение БПК<sub>5</sub>=5 – это первый аргумент – он определяет столбец, в котором находится решение (этот столбец содержится в табл. 1 б, представленной далее и составленной для диапазона  $3.5 \leq \text{БПК}_T \leq 5.5$ ). Отношение  $(\text{БПК}_{10} / \text{БПК}_5) = 6,5 / 5 = 1,3$  – второй аргумент, определяющий строку, в которой находится решение. Итак, в табл. 1б на пересечении столбца БПК<sub>T</sub>=5.0 и строки  $(\text{БПК}_{2T} / \text{БПК}_T) = 1,30$  находим содержимое ячейки: [9.62 (0.23)], откуда получаем: БПК=9.62 мг/л,  $k_0=0.23$  сут<sup>-1</sup>.

Если полагать, что в первом приближении выполняется  $k_0 \approx k_1$ , то с помощью табл. 2 (см. далее) можно определить вещество, обладающее такой же скоростью распада, как и загрязняющее вещество (ЗВ) в исследуемой пробе воды.

Таблица 2 – Коэффициенты неконсервативности органических веществ в статических условиях при температуре 20°C, полученные В.Т. Каплиным (Родзиллер, [8], с. 185)

$k_{1-1}$ (сут <sup>-1</sup> )	Наименование вещества	$k_{1-1}$ (сут <sup>-1</sup> )	Наименование вещества
Биологически мягкие вещества		Промежуточные вещества	
1.40	Формальдегид	0.29	Синтанол ВТ-15В
0.99	Алкилсульфат (АС) без наполнителя	0.27	Синтанол ДТ-7
0.96	Паста АС-1	0.23	Коммунально-бытовые стоки
0.76	Паста АС-2	0.22	Синтанол ВН-7
0.72	Глюкоза	0.18	Адипиновая кислота
0.63	Мальтоза	0.12	Акилсульфонат керосиновый
0.57	Метиловый спирт	0.11	Резорцин
0.56	Гептиловый спирт	0.10	Пирогаллол
0.55	Фурфурол	0.06	Лигносulfонаты
0.50	Этиловый спирт	Биологически жесткие вещества	
0.49	Уксусный альдегид	0.05	Карвакрол
0.47	Амилловый спирт	0.04	Гидрохинон
0.45	Бутиловый спирт	0.03	Гидросульфит
0.42	Оксанол Л-2	0.02	Проксанол-186
0.41	Пропиловый спирт	0.01	Капролактан
0.4	Ялан	0.007	Препарат ОП-7
0.38	Фенол	0.006	Препарат ОП-10
0.37	Вторичный пропиловый спирт	0.002	Циклогексаноноксим
0.35	Изобутиловый спирт	0.001	Циклогексанол
0.30	Синтанол ВТ-7		

Из табл. 2 следует, что полученное выше значение  $k_0=0.23$  по скорости распада эквивалентно коммунально-бытовым стокам. Следует подчеркнуть, что совпадение значений коэффициентов неконсервативности не означает, что другие свойства органического «вещества-аналога» (химический состав и пр.) могут быть экстраполированы на исследуемую органическую смесь.

**Пример 2.** Пусть эксперимент показал, что  $БПК_5=2$  мг/л;  $БПК_{10}=2.24$  мг/л. Вычисляем отношение  $(БПК_{10} / БПК_5) = 2,24 / 2 = 1,12$  и в табл. 1 а (см. далее) на пересечении столбца  $БПК_T=2$  и строки  $(БПК_{2T} / БПК_T) = 1,12$  находим содержимое ячейки:  $БПК=2.28$  мг/л,  $k_0=0.49$  сут<sup>-1</sup>. Из табл. 2 видно, что исследуемое вещество по скорости разложения соответствует этиловому спирту.

**Пример 3.** Пусть эксперимент показал, что:  $БПК_5=2$  мг/л;  $БПК_{10}=3.36$  мг/л. Вычисляем отношение  $(БПК_{10} / БПК_5) = 3,36 / 2 = 1,68$  и в табл. 1 а (ниже) находим  $БПК=12.82$  мг/л,  $k_0=0.04$  сут<sup>-1</sup>. Из табл. 2 видно, что  $k_0=0.04$  сут<sup>-1</sup> соответствует гидрохинону. Из-

вестно, что по рыбохозяйственному критерию предельно допустимая концентрация (ПДК) для БПК равна 3, а для БПК<sub>5</sub> – 2 мг/л. Получается, что при «хорошей» (для водоёма рыбохозяйственного назначения) величине БПК<sub>5</sub>=2 мг/л имеем БПК=12.82 мг/л! Это в 4 с лишним раза превышает ПДК! Данный пример убедительно демонстрирует недостаток существующей практики мониторинга, когда измеряется только БПК<sub>5</sub>. Действительно, без измерения БПК<sub>10</sub> случай вопиющего (в 4 раза!) превышения ПДК остался бы не замеченным.

Таблица 1а – Зависимость БПК и  $k_0$  (в скобках) от БПК<sub>T</sub> и БПК<sub>2T</sub> при  $1.0 \leq \text{БПК}_T \leq 3.0$

$\left(\frac{\text{БПК}_{2T}}{\text{БПК}_T}\right)$	БПК <sub>T</sub> , мг О <sub>2</sub> /л				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
1.04	1.04(0.70)	1.56(0.73)	2.08(0.77)	2.61(0.81)	3.13(0.86)
1.08	1.09(0.55)	1.63(0.57)	2.18(0.59)	2.72(0.62)	3.27(0.65)
1.12	1.14(0.46)	1.71(0.47)	2.28(0.49)	2.86(0.51)	3.44(0.54)
1.16	1.20(0.39)	1.80(0.40)	2.40(0.42)	3.01(0.43)	3.63(0.45)
1.20	1.26(0.34)	1.89(0.35)	2.54(0.36)	3.19(0.37)	3.86(0.38)
1.24	1.33(0.30)	2.01(0.31)	2.69(0.32)	3.40(0.32)	4.12(0.33)
1.28	1.41(0.27)	2.13(0.27)	2.87(0.28)	3.64(0.28)	4.45(0.28)
1.32	1.50(0.24)	2.28(0.24)	3.09(0.24)	3.94(0.24)	4.85(0.24)
1.36	1.61(0.21)	2.45(0.21)	3.34(0.21)	4.29(0.21)	5.35(0.21)
1.40	1.73(0.18)	2.65(0.18)	3.65(0.18)	4.74(0.18)	6.00(0.17)
1.44	1.87(0.16)	2.90(0.16)	4.03(0.16)	5.31(0.15)	6.88(0.14)
1.48	2.04(0.14)	3.20(0.14)	4.51(0.13)	6.08(0.13)	8.14(0.11)
1.52	2.25(0.13)	3.57(0.12)	5.14(0.11)	7.14(0.10)	10.09(0.09)
1.56	2.51(0.11)	4.06(0.10)	6.00(0.09)	8.73(0.08)	13.50(0.06)
1.60	2.85(0.09)	4.71(0.08)	7.25(0.07)	11.36(0.06)	21.00(0.04)
1.64	3.29(0.08)	5.64(0.07)	9.23(0.06)	16.55(0.04)	51.00(0.01)
1.68	3.89(0.06)	7.04(0.05)	12.82(0.04)	31.58(0.02)	-
1.72	4.79(0.05)	9.44(0.04)	21.38(0.02)	-	-
1.76	6.24(0.04)	14.45(0.02)	68.50(0.01)	-	-
1.80	9.00(0.03)	31.50(0.01)	-	-	-
1.84	16.27(0.01)	-	-	-	-

**Пример 4.** Рассмотрим случай  $T=10$  сут. Пусть эксперимент показал, что: БПК<sub>10</sub>=6 и БПК<sub>20</sub>=6,6. Вычисляем отношение  $(\text{БПК}_{20} / \text{БПК}_{10}) = 6,6/6 = 1,1$  и в табл. 1 в (далее) находим содержимое ячейки: [6.86 (0.82)], откуда БПК=6.86 мг/л. Что касается  $k_0$ , то поскольку в данном примере  $T=10$  сут (а не 5), его значение следует пересчитать по формуле (3):  $k_0 = 0,82 \cdot 5/10 = 0,41$  сут<sup>-1</sup> (скорость распада исследуемого ЗВ сравнимо со скоростью распада пропилового спирта).

Таблица 1 б – Зависимость БПК и  $k_0$  (в скобках) от БПК<sub>T</sub> и БПК<sub>2T</sub> при  $3.5 \leq \text{БПК}_T \leq 5.5$

$\left(\frac{\text{БПК}_{2T}}{\text{БПК}_T}\right)$	БПК <sub>T</sub> , мг О <sub>2</sub> /л				
	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
1.02	3.57 (1.13)	4.08 (1.21)	4.59 (1.31)	5.10 (1.42)	5.62 (1.56)
1.04	3.65 (0.91)	4.17 (0.97)	4.70 (1.04)	5.22 (1.12)	5.75 (1.22)
1.06	3.73 (0.78)	4.27 (0.83)	4.81 (0.88)	5.35 (0.95)	5.89 (1.02)
1.08	3.82 (0.69)	4.37 (0.73)	4.93 (0.77)	5.49 (0.82)	6.05 (0.88)
1.10	3.92 (0.62)	4.49 (0.65)	5.06 (0.69)	5.65 (0.73)	6.24 (0.77)
1.12	4.02 (0.56)	4.61 (0.59)	5.21 (0.62)	5.82 (0.65)	6.45 (0.68)
1.14	4.14 (0.51)	4.75 (0.53)	5.37 (0.56)	6.02 (0.58)	6.70 (0.61)
1.16	4.26 (0.47)	4.90 (0.49)	5.56 (0.50)	6.25 (0.52)	7.00 (0.54)
1.18	4.39 (0.43)	5.07 (0.44)	5.77 (0.46)	6.51 (0.47)	7.34 (0.48)
1.20	4.54 (0.40)	5.25 (0.41)	6.00 (0.42)	6.82 (0.42)	7.76 (0.42)
1.22	4.70 (0.36)	5.46 (0.37)	6.27 (0.38)	7.18 (0.38)	8.29 (0.37)
1.24	4.88 (0.34)	5.69 (0.34)	6.58 (0.34)	7.61 (0.34)	8.95 (0.32)
1.26	5.08 (0.31)	5.95 (0.31)	6.94 (0.31)	8.13 (0.30)	9.81 (0.27)
1.28	5.31 (0.28)	6.26 (0.28)	7.36 (0.28)	8.78 (0.26)	11.00 (0.23)
1.30	5.56 (0.26)	6.61 (0.26)	7.87 (0.25)	9.62 (0.23)	12.72 (0.18)
1.32	5.85 (0.24)	7.02 (0.23)	8.50 (0.22)	10.71 (0.19)	15.44 (0.14)
1.34	6.18 (0.22)	7.51 (0.21)	9.28 (0.19)	12.23 (0.16)	20.37 (0.10)
1.36	6.57 (0.20)	8.09 (0.19)	10.29 (0.16)	14.47 (0.13)	32.15 (0.06)
1.38	7.02 (0.18)	8.81 (0.16)	11.62 (0.14)	18.10 (0.10)	96.93 (0.02)
1.40	7.55 (0.16)	9.71 (0.14)	13.50 (0.12)	25.00 (0.07)	-
1.42	8.20 (0.14)	10.89 (0.12)	16.31 (0.09)	43.18 (0.04)	-
1.44	9.00 (0.14)	12.46 (0.10)	21.00 (0.07)	-	-
1.46	10.01 (0.11)	14.70 (0.09)	30.37 (0.04)	-	-
1.48	11.33 (0.10)	18.12 (0.07)	58.50 (0.02)	-	-
1.50	13.12 (0.08)	24.00 (0.05)	-	-	-
1.52	15.71 (0.06)	36.50 (0.03)	-	-	-
1.54	19.74 (0.05)	81.14 (0.01)	-	-	-
1.56	26.93 (0.04)	-	-	-	-
1.58	43.37 (0.02)	-	-	-	-

Формулы (2) и таблицы (1 а-в) получены на основе решения обратной задачи для системы (2)-(3). Как известно, обратные задачи являются некорректными. Нетрудно проверить, что для полученного аналитического решения (2) первые два из трёх условий корректности (существование, единственность, устойчивость) выполняются. А что касается третьего условия (устойчивость решения), то эта проблема требует отдельного исследования, поэтому ограничимся пока только двумя общими соображениями.

Во-первых, формулы (2) получены при решении обратной задачи для системы дифференциальных уравнений, которая основана на гипотезе, что микроорганизмы, осуществляющие биохимическое окисление (минерализацию) ОВ, находятся в стабильном состоянии. Причём не просто в стабильном, но в «условно оптимальном» состоянии, когда они ничем не угнетены (например, токсинами), а

их численность практически не меняется во времени. Однако на практике может оказаться, что проба воды взята из водного объекта в момент, когда микроорганизмы, ответственные за биохимическое окисление органики, были подавлены токсинами, попавшими в водный объект незадолго до момента взятия пробы. В этом случае значение параметра  $\text{БПК}_{2T} / \text{БПК}_T$  может оказаться за пределами допустимого таблицами диапазона и этот факт можно трактовать как вероятность наличия токсинов в исследуемой пробе воды.

Таблица 1 в – Зависимость БПК и  $k_0$  (в скобках) от  $\text{БПК}_T$  и  $\text{БПК}_{2T}$  при  $6.0 \leq \text{БПК}_T \leq 8.0$

$\left(\frac{\text{БПК}_{2T}}{\text{БПК}_T}\right)$	БПК <sub>T</sub> , мг О <sub>2</sub> /л				
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
1.01	6.06(2.14)	6.57(2.44)	7.07(2.86)	7.58(3.50)	8.09(4.59)
1.02	6.13(1.74)	6.64(1.97)	7.15(2.28)	7.67(2.73)	8.20(3.44)
1.03	6.20(1.51)	6.72(1.69)	7.24(1.94)	7.77(2.28)	8.33(2.78)
1.04	6.27(1.34)	6.80(1.50)	7.34(1.70)	7.89(1.96)	8.50(2.29)
1.05	6.35(1.22)	6.90(1.35)	7.45(1.51)	8.04(1.71)	8.73(1.90)
1.06	6.44(1.12)	7.00(1.23)	7.58(1.36)	8.20(1.50)	9.04(1.56)
1.07	6.53(1.03)	7.11(1.12)	7.72(1.22)	8.41(1.32)	9.51(1.26)
1.08	6.63(0.95)	7.23(1.03)	7.87(1.11)	8.65(1.16)	10.29(0.97)
1.09	6.74(0.88)	7.37(0.95)	8.06(1.01)	8.97(1.01)	11.79(0.69)
1.10	6.86(0.82)	7.52(0.87)	8.27(0.91)	9.38(0.88)	16.00(0.39)
1.11	6.99(0.77)	7.68(0.81)	8.52(0.82)	9.93(0.74)	95.99(0.04)
1.12	7.12(0.72)	7.87(0.74)	8.83(0.74)	10.71(0.62)	-
1.13	7.28(0.67)	8.09(0.68)	9.19(0.66)	11.93(0.49)	-
1.14	7.45(0.63)	8.33(0.63)	9.65(0.59)	14.06(0.37)	-
1.15	7.64(0.58)	8.62(0.58)	10.23(0.51)	18.75(0.24)	-
1.16	7.85(0.54)	8.95(0.53)	11.00(0.44)	37.50(0.10)	-
1.17	8.08(0.51)	9.35(0.48)	12.06(0.37)	-	-
1.18	8.35(0.47)	9.82(0.43)	13.63(0.30)	-	-
1.19	8.65(0.43)	10.41(0.39)	16.17(0.24)	-	-
1.20	9.00(0.39)	11.14(0.34)	21.00(0.16)	-	-
1.21	9.41(0.37)	12.09(0.30)	33.73(0.09)	-	-
1.22	9.88(0.34)	13.37(0.25)	-	-	-
1.23	10.45(0.30)	15.19(0.21)	-	-	-
1.24	11.14(0.27)	17.97(0.17)	-	-	-
1.25	12.00(0.24)	22.75(0.12)	-	-	-
1.26	13.09(0.21)	32.91(0.08)	-	-	-
1.27	14.53(0.18)	-	-	-	-
1.28	16.50(0.16)	-	-	-	-
1.29	19.38(0.13)	-	-	-	-
1.30	24.00(0.10)	-	-	-	-
1.31	32.57(0.07)	-	-	-	-
1.32	54.00(0.04)	-	-	-	-

С другой стороны (и это «во-вторых»), случай, когда значение параметра  $\text{БПК}_{2T} / \text{БПК}_T$  находится за пределами допустимого таблицами диапазона, можно трактовать как недопустимую погрешность измерений  $\text{БПК}_T$  и  $\text{БПК}_{2T}$ . Таким образом, если исследо-



ватель уверен в точности измерений, то случай попадания параметра  $\text{БПК}_{2T} / \text{БПК}_T$  за пределы допустимого таблицами диапазона он будет трактовать как факт наличия токсинов в исследуемой пробе воды, а если нет, то результаты измерений он забракует как ненадёжные.

Для отбраковки некорректных измерений можно привлекать также априорное неравенство  $\text{БПК} < \text{ХПК}$ . Если окажется, что полученное с помощью таблиц значение БПК превышает величину ХПК (измеренную для той же пробы воды), то значения  $\text{БПК}_T$  и  $\text{БПК}_{2T}$  (а, возможно, и ХПК), следует признать ненадежными.

Очевидно, что вопрос о необходимой точности измерений  $\text{БПК}_T$  и  $\text{БПК}_{2T}$  должен быть рассмотрен в контексте точности решений, получаемых с помощью формул (2) и таблиц 1(а-в).

**Заключение.** Предложен новый и достаточно удобный, по мнению автора, инструмент в виде таблиц для определения пары теоретических величин (БПК и коэффициента скорости биохимического окисления  $k_0$ ) по двум измеренным значениям биохимического потребления ( $\text{БПК}_T$ ;  $\text{БПК}_{2T}$ ). Построенные таблицы универсальны – могут быть применены для любого инкубационного периода  $T$ .

Используя табл. 2 для поиска «вещества-аналога» исследуемой органической смеси, следует иметь в виду, что сравнение производится только по значению коэффициента неконсервативности и никакие другие свойства органического «вещества-аналога» (химический состав и пр.), кроме скорости распада вещества, не могут быть экстраполированы на исследуемую органическую смесь.

«Старые» формулы (1), несмотря на длительное существование, до сих пор так и не получили широкого распространения в практике мониторинга водных объектов ни в России, ни за рубежом. Объяснить этот факт для России можно, по крайней мере, двумя причинами. Первая – ошибка в «Руководстве» [3], исправленная спустя 36 лет в новом издании [9] (по публикации [4]). Вторая – отсутствие нормативного документа, обязывающего измерять биохимическое потребление за два периода ( $T$  и  $2T$  суток). Сейчас общепринято измерение  $\text{БПК}_5$ , а для применения как «старых», так и «новых» формул требуется дополнительное измерение  $\text{БПК}_{10}$  (либо  $\text{БПК}_{2,5}$ ), что влечёт дополнительные затраты.

О причинах, по которым в практике зарубежного мониторинга отсутствуют необходимые измерения и методики для определения

биохимической потребности (не путать с биохимическим потреблением!) в кислороде и коэффициента скорости биохимического окисления, остаётся только догадываться и ... сожалеть!

Автор надеется, что «новые» формулы (2) ждёт более счастливая судьба и рано или поздно они будут внедрены в практику мониторинга качества воды в водных объектах. Этому внедрению могут поспособствовать представленные в данной работе таблицы.

### Литература

1. *Streeter H.W., Phelps E.B.* A study of the pollution and natural purification of the Ohio River // U.S. Publ. Health Service Bull. 1925. № 146. P. 1–75.

2. *Harold A. Thomas.* The "Slope" Method of Evaluating the Constants of the First-Stage Biochemical Oxygen-Demand Source: Sewage Works Journal, Vol. 9, No. 3 (May, 1937), pp. 425-430 Published by: Water Environment Federation Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/25028779> Accessed: 10/02/2015 06:04.

3. *Алекин О.А., Семёнов А.Д., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши // Л.: Гидрометеоздат, 1973. 269 с.

4. *Готовцев А.В.* О методике математической обработки результатов химического анализа вод // Вода: химия и экология, 2009. № 7. С. 30–34.

5. *Готовцев А.В., Данилов-Данильян В.И., Никаноров А.М.* Проблемы мониторинга БПК // Водные ресурсы, 2012, т. 39, № 4. С. 510–520.

6. *Готовцев А.В.* Модификация системы Стритера–Фелпса с целью учёта обратной связи между концентрацией растворённого кислорода и скоростью окисления органического вещества // Водные ресурсы, 2010, т. 37, №2. С. 250–256.

7. *Готовцев А.В.* Новый способ вычисления БПК и скорости биохимического окисления на основе модифицированной системы уравнений Стритера–Фелпса // Водные ресурсы, 2014, т. 41, № 3. С. 325–329.

8. *Родзиллер И.Д.* Прогноз качества воды водоемов — приемников сточных вод. М.: Стройиздат. 1984. 265 с.

9. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши/ под ред. Л.В. Боевой. – Ростов-на-Дону: НОК, Ч.1.2009.1044 с.