

УДК 628.35/3 (575.2)(04)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРУДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

А.С. Куйчиев

Рассмотрено использование связанного кислорода в процессе биологической очистки сточных вод.

Ключевые слова: сточные воды; органические вещества; растворенный кислород; биохимическая потребность; очистка воды; биологический пруд.

В практике наибольшее распространение получили биологические пруды двух типов: стабилизационные (или неаэрируемые) и аэрируемые (или аэрационные лагуны Джонсон Сандра, 1978), которые предназначены как для очистки, так и для доочистки сточных вод.

В стабилизационных прудах создаются анаэробно-аэробные условия, при этом растворенный кислород сохраняется лишь в верхних слоях жидкости. Первичный распад органических веществ происходит в донных анаэробных слоях, окончательная очистка – в верхних аэробных. В аэрируемых прудах, предназначенных для биологической очистки сточных вод, процессы вполне аналогичны тем, которые происходят в аэротенке-смесителе. В аэрируемых и неаэрируемых прудах, предназначенных для доочистки биологически очищенных стоков, при малом количестве органических загрязнений имеют место ярко выраженные процессы фотосинтеза, которые совместно с гетеротрофным окислением определяют конечный результат очистки.

На практике чаще всего применяют двух- и многоступенчатые пруды. Комбинации двухступенчатых прудов различны. Обе ступени могут быть неаэрируемыми или аэрируемыми либо аэрируется только первая ступень.

Первые исследования по очистке сточных вод в прудах были проведены в 1912 г. Наиболее широкое распространение пруды получили в 30–40-х гг. прошлого века. Их устраивали сериями по пять–шесть секций, при этом первая по ходу движения воды секция служила отстойником. В последней секции происходило обильное развитие планктона, что позволяло разводить рыбу и получать значительный улов с 1 га пруд-

да (до 500 голов). Норма нагрузки на пруд принималась равной 125–300 м³ (га·сут.), или около 4,5 кг БПК₅/(га·сут.). Именно в прудах впервые было обнаружено наличие активного бактериофага (по отношению к возбудителям кишечных заболеваний), что послужило основанием для широкого изучения роли фагов в процессах очистки (Л.Б. Доливо-Добровольский, 1943).

Расчет прудов в СССР проводился по рекомендациям, составленным И.Д. Родзиллером (1977). Для неаэрируемых прудов было принято снижение БПК по уравнению реакции 1-го порядка, если БПК поступающей воды не превышало 300 мг/л. Если БПК выше 300 мг/л, то в формуле принимали $L_0 = 300$, ход реакции от БПК=500 до БПК = 300 мг/л принимали по переходному порядку, а свыше 500 мг/л – по нулевому порядку:

$$t = \frac{L_n - 300}{K_0} + \frac{1}{K_1} \lg \frac{300}{L_t}, \quad (1)$$

где t – продолжительность, пребывания воды в пруду; L_n – начальная БПК, мг/л; L_t – требуемая БПК очищенной воды, мг/л; K_0 – скорость реакции в начальной стадии окисления, мг/(л·сут.); K_1 – константа скорости реакции и конечной стадии, сут.⁻¹.

Константа скорости реакции K_1 индивидуальна для каждого вида сточной воды, и ее значения находят из экспериментальных данных определения БПК в склянках методом разведения. Считая, что ход кривой БПК описывается уравнением

$$L_t = L_0(1 - 10^{-K_1 t}), \quad (2)$$

принимают значение констант K_1 в уравнениях (1) и (2) одинаковыми. Для индивидуальных веществ значение K_1 берут из таблиц, составленных В.Т. Каплиным.

Все вещества, для которых K_1 определены экспериментально, условно разделены на три группы: биологически мягкие, промежуточные и жесткие. К биологически мягким относятся: глюкоза, различные моно- и дисахара, низшие спирты, низшие альдегиды и другие подобные вещества. Для этих веществ $K_1=0,61\div 0,13 \text{ сут}^{-1}$. К числу промежуточных веществ относятся некоторые фенолы и ряд СПАВ, для которых $K_1 = 0,125\div 0,026 \text{ сут}^{-1}$. Для биологически жестких веществ (жесткие СПАВ, гидрохинон и др.) $K_1 < 0,022 \text{ сут}^{-1}$. По классификации В.Т. Каплина городские сточные воды должны быть отнесены к промежуточной группе.

Общий объем системы рассчитывают исходя из условия, что активная зона пруда составляет в среднем 50 % его объема. По объему определяют площадь пруда, которая может обеспечить поступление необходимого количества кислорода воздуха путем реэрации. При расчете аэрируемых прудов, как в отечественной, так и в зарубежной практике принимают, что гидродинамический режим пруда соответствует режиму полного смешения.

Расчетная формула И.Д. Родзиллера базируется на следующих положениях. В момент времени t количество загрязнений в воде пруда равно $pt = WL$, где W – объем пруда, а L – БПК_{полн} прудовой воды. В момент $(t + \Delta t)$ количество загрязнений в прудовой воде составит:

$$P_{t+\Delta t} = W(L + \Delta L). \quad (3)$$

Изменение количества вещества равно:

$$P_{t+\Delta t} - P_t = W\Delta L. \quad (4)$$

Это изменение обусловлено поступлением qL_{CT} загрязнений $qL_{CT}\Delta t$ (где q – расход воды; L_{CT} – БПК_{полн} поступающей воды), появлением продуктов метаболизма $K_s v S \Delta t$ (K_s – константа скорости образования метаболитов; v – удельная БПК_{полн} единицы массы метаболитов; S – концентрация биомассы) выносом загрязнений с очищенной водой $qL_{CT}\Delta t$ и убылью загрязнений в процессе метаболизма $K_d L W \Delta t$ (K_d – коэффициент неконсервативности, т.е. коэффициент скорости превращения вещества, выраженный по величине скорости потребления кислорода в динамических условиях). В установившемся режиме скорости поступления и оттока вещества равны, поэтому можно записать

$$\frac{dL}{dt} = \frac{q}{W} L_{CT} - \frac{q}{W} L - K_d L + K_s v S = 0, \quad (5)$$

или

$$\frac{dL}{dt} = \frac{q}{W} L_{CT} - \left(K_d + \frac{q}{W} \right) L + K_s v S = 0. \quad (6)$$

Величина S не постоянна, но ее изменение настолько незначительно, что для упрощения расчета она может быть принята равной S_{cp} . Тогда $K_s v S_{cp}$ – БПК_{полн} метаболитов – уже не зависит от t и может быть обозначена как постоянная величина L_M .

Для решения уравнения (1) его переписывают в виде

$$\frac{dL}{\frac{q}{W} L_{CT} - \left(K_d + \frac{q}{W} \right) L + L_M} = dt. \quad (7)$$

Введем обозначения:

$$\frac{q}{W} L_{CT} + L_M = A \text{ и } K_d + \frac{q}{W} = B. \quad (8)$$

После небольших преобразований получим:

$$\frac{dL}{\frac{A}{B} - L} = B dt \quad (9)$$

и в интегральной форме

$$-\ln \left(\frac{A}{B} - L \right) = Bt + const. \quad (10)$$

Для определения константы интегрирования приравняем $t = 0$. Тогда $L = L_{CT}$ следовательно,

$$const = -\ln \left(\frac{A}{B} - L_{CT} \right). \quad (11)$$

Подставив выражение (7) в (5), (6) и сделав необходимые подстановки и преобразования, можно получить:

$$L = \left\{ \frac{1}{K_d + \frac{q}{W} + 1} \left[1 - e^{-\left(K_d + \frac{q}{W} \right) t} \right] + e^{-\left(K_d + \frac{q}{W} \right) t} \right\} L_{CT} + \frac{L_M}{K_d + \frac{q}{W}} \left[1 - e^{-\left(K_d + \frac{q}{W} \right) t} \right]. \quad (12)$$

При больших значениях $e^{-\left(K_d + \frac{q}{W} \right) t} \rightarrow 0$ и тогда уравнение (12) может быть значительно упрощено. Если обозначить

$$\frac{L_M}{K_d + \frac{q}{W}} = L_r \text{ и } \frac{1}{K_d + \frac{q}{W}} = \beta, \quad (13)$$

то расчетное уравнение примет вид:

$$L = \beta L_{CT} + L_r \quad (14)$$

Если пруды устраивают многосекционными, то после первой секции БПК выходящей воды L_1 по уравнению (14) будет равно:

$$L_1 = \beta L_{CT} + L_r \quad (15)$$

а после второй секции

$$L_2 = \beta L_1 + L_r \text{ и т.д.} \quad (16)$$

В общем виде после n -й секции

$$L_n = L_{CT} \beta^n + \frac{1 - \beta^n}{1 - \beta} L_r \quad (17)$$

Для практических расчетов L_r можно принимать равной 1–2 мг/л. Однако в период цветения L_r может достигать 10 мг/л и более. Для вычисления β значение K_d принимается равным (5–7) K_1 (где K_1 берется из таблицы В.Т. Каплина) и учитывается переход от натуральных к десятичным логарифмам:

$$\beta = \frac{1}{1 + 2,3WK_d / q} \quad (18)$$

Число ступеней пруда при их одинаковом объеме определяют из уравнения (17), отбрасывая для простоты расчета второй член:

$$n = \frac{\left(\lg \frac{L_n}{L_{CT}} \right)}{\lg \beta} \quad (19)$$

Если объемы секций пруда разные, то расчет выполняется последовательно для каждой секции, назначая ее объем и определяя качество воды, выходящей из данной секции.

Расход воздуха для пневматической системы аэрации подсчитывают по той же формуле, что и для аэротенков, но учитывают содержание кислорода в воде b_0 , поступающей в данную секцию, и требуемый уровень растворенного кислорода в прудовой воде b . Таким образом, числитель формулы принимает вид

$$z(L_{n-1} - L_n) + b - b_0, \quad (20)$$

где L_{n-1} и L_n – соответственно БПК_{полн} прудовой воды в $(n - 1)$ и n – ступени пруда.

Общее количество воздуха определяется как сумма расхода воздуха, требующегося для каждой ступени. При механической системе аэрации необходимое число аэраторов n подсчитывают по формуле:

$$m = \frac{[z(L_{n-1} - L_n) + b - b_0] q}{Kn_1 \cdot n_2 (a - b)} \quad (21)$$

где

$$K = 0,57N^2 D_p^{3,5} (H_c + h_l)^{0,7} b_l^{0,2} n_l^{0,25}, \quad (22)$$

в ней N – частота вращения; D_p – диаметр ротора; H_c – глубина погружения диска ротора под воду; h_l – высота лопасти ротора; b_l – ширина лопасти; n_l – число лопастей.

После биопрудов вода поступает во вторичные отстойники.

При проектировании вторичного отстойника следует соблюдать два основных условия:

- 1) обеспечение необходимой длительности пребывания для эффективного удаления взвеси;
- 2) создание достаточного объема иловой части для накопления ила.

Для вторичных отстойников применяют по возможности самое простое оборудование и в минимальном количестве (ввиду возможности обрастаний водорослями), предусматривая минимум устройств для устранения запахов.

Все эти требования не всегда могут быть удовлетворены одновременно. Иногда требуется сократить время отстаивания, чтобы избежать обрастания, но при этом снижается эффективность задержания ила. На основании опыта эксплуатации предложены некоторые практические рекомендации. Так, минимальное время отстаивания принимается в одни сутки, поэтому последний пруд может заполняться не полностью, а только на объем, соответствующий этому времени. Если развиваются водоросли, то максимальное время отстаивания не должно превышать трех суток. Для предотвращения запахов рекомендуется уменьшать глубину пруда до 0,9 м зимой и до 1,8 м летом. Этой глубины достаточно для анаэробного разложения органических веществ и перевода дурно пахнущих сульфидов в не имеющие запаха сульфаты.

Скорость распада осевшего в пруду ила описывается уравнением:

$$Wt / W_0 = e^{-D_k t}, \quad (23)$$

где: W_0 и W_t – начальная и конечная концентрации беззольного вещества, мг; D_k – скорость распада, сут⁻¹ (ч⁻¹); t – длительность процесса, сут (ч).

В среднем за год распадается 40–60 % накопленного ила. Остаток представляет собой бионеразлагаемую (в условиях пруда) инертную массу.

Так же, как и для аэротенка-смесителя, определяют количество элементов питания (азота и фосфора), необходимых для бактериального синтеза.

Для проектирования прудов аналогично аэротенкам-смесителям, должны быть известны кинетические параметры (k , a , b , a' , b' , θ для коррекции k , θ , для коррекции $k_L a$, N_0), заданы условия проекта (средний и максимальный расходы воды, температура поступающей воды, средняя и экстремальные температуры воздуха, а также относительная влажность воздуха летом и зимой, солнечная радиация, средняя и максимальная БПК₅ поступающей воды, концентрации взвеси, азота и фосфора), определены условия решения задачи (средняя и максимальная БПК₅ выходящей воды, вынос ила).

Расчет выполняется методом подбора, так как для определения длительности очистки нужно знать скорость процесса, которая является функцией температуры. Следовательно, требуется знать температуру прудовой воды T_w , а для ее подсчета необходима величина t – длительность очистки. В связи с этим либо определяют минимальный объем пруда и соответствующее количество энергии для обеспечения требуемого качества воды, либо определяют минимальное количество энергии и соответствующий ей объем пруда. Окончательный вариант выбирается в результате сравнения капитальных и эксплуатационных затрат.

Рассмотрим пример расчета двухступенчатой системы – аэрируемой 1-й ступени и частично аэрируемой стабилизационной 2-й ступени. Объем прудов рассчитывается на зимние условия, а требуемое количество кислорода – на летний период считается достаточным.

При расчете объема первого пруда вначале задаются произвольным временем пребывания воды t_1 , по этой величине вычисляют объем V_1 и, задавшись глубиной пруда d_1 (порядка 3–4,5 м), находят площадь пруда A_1 . Количество энергии для полного перемешивания принимается из условия 2,76 кВт/108 м³, что в свою очередь определяет необходимое число аэраторов. Если известно число аэраторов, то можно вычислить температуру воды в пруду T_w , по ней скорректировать константу скорости окисления k и определить S_e для зимних условий. Затем

аналогично вычисляют S_e для летних условий при максимальной БПК₅ поступающей воды.

Для второго пруда расчет производится аналогично, но здесь контрольная норма энергии 0,79 кВт/10⁶ м³, что обеспечивает должный кислородный режим пруда, но оказывается недостаточным для поддержания всего ила во взвешенном состоянии. Часть ила выпадает на дно, поэтому расчеты S_e , R_p , D_k , W_t проводят с учетом величины F .

Избыточный ил определяют на оба пруда и по максимальной исходной БПК. Кроме того, вычисляют также количество осадка, накапливаемого во втором факультативном пруду. В заключение определяют достаточность элементов питания – азота и фосфора.

Вся описанная выше схема расчета соответствует одному циклу подбора объема первого и второго прудов. Очевидно, что, задаваясь все возрастающим объемом первого пруда, можно получить все меньшую S_e и таким образом обеспечить снижение объема V_2 второго пруда. Оптимальное решение находят как по сумме объемов двух ступеней системы, так и по сумме требуемой мощности на оба пруда. Минимальные значения объемов прудов и энергии не совпадают, поэтому для окончательного выбора выполняется технико-экономическая оценка вариантов.

В настоящее время ведутся исследования по интенсификации работы прудов. Одним из направлений является создание очень мелких прудов $h=0,45$ м при высокой нагрузке на них – 224 кг БПК/(га·сут.). Такие пруды работоспособны в условиях жаркого климата. Значительная роль в очистке принадлежит водорослям. Вода из пруда после коагуляции подается на флотатор для удаления водорослей, которые затем высушиваются в тонком слое.

Проводятся исследования по очистке сточных вод в контактных биологических прудах, в которые вводятся протококковые микроводоросли (Я.А. Карелин, Лам Мин Чьет). Микроводоросли *Chlorella* и *Scenedesmus* обеспечивают высокую очистительную способность прудов, особенно при наличии искусственной аэрации.