

УДК 551.482.214.51

МОДЕЛЬ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА ПРЭСНОВОДНОГО ВОДОЕМА ПРИ ЛЕТНЕМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ОСЕДАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

В. В. Алексеев, Ю. И. Горбатов, А. О. Кокорин

(кафедра физики моря и вод суши)

В последнее время в связи с бурным развитием энергетики большое значение приобрела проблема комплексного использования естественных и искусственных водохранилищ-охладителей. Одним из наиболее важных является вопрос прогнозирования и сохранения качества воды и биологической продуктивности водоемов. К числу основных параметров качества воды относится концентрация растворенного кислорода.

Исследование динамики кислорода в воде осложняется тем, что кислород не является пассивной примесью, т. е. концентрация его определяется не только процессами перемешивания водных масс и обмена с атмосферой, но также биологическими и химическими процессами в водоеме. Кислород продуцируется фитопланктоном при фотосинтезе и расходуется при дыхании организмов и окислении органического вещества.

Для изучения динамики растворенного кислорода при радиационном нагреве сверху был проведен 20-суточный эксперимент. Этого времени достаточно, чтобы процессы, типичные для водоема в период прогрева, проявились достаточно четко. Эксперимент проводился на модели пресноводного водоема. Подробное описание экспериментальной установки приводится в работах [1, 2].

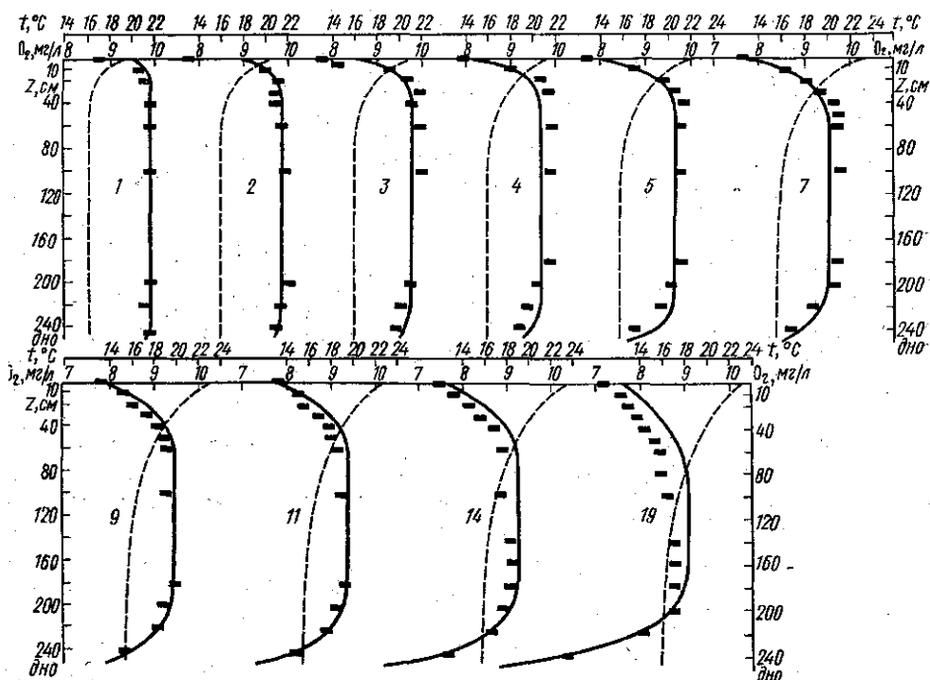
Бассейн был заполнен водопроводной водой. Начальное распределение параметров по глубине было однородным. Затем был включен софит из люминесцентных ламп, который осуществлял радиационный нагрев сверху в течение всего эксперимента.

Температура воды в бассейне измерялась платиновыми термометрами сопротивления ИС264А на 18 фиксированных горизонтах и регистрировалась двумя многоканальными самописцами КСМ-4. Точность измерения температуры $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Температура поверхности воды контролировалась оптическим методом с помощью прибора ИМП-3. Точность измерения $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Количество растворенного в воде кислорода измерялось зондом — оксиметром с гальваническим датчиком мембранного типа, изготовленным в нашей лаборатории. Точность определения концентрации кислорода $\pm 0,1$ мг/л. Точность установки горизонта по глубине при измерении кислорода ± 1 см.

При измерениях было получено 16 профилей температуры и концентрации растворенного кислорода. Некоторые из них представлены на рисунке. Пунктирными кривыми изображены профили температуры воды, прямоугольниками — экспериментально измеренные значения

концентрации кислорода. Размеры прямоугольника соответствуют доверительным интервалам по глубине и концентрации. Из рисунка видно, что по мере прогрева поверхностных слоев воды концентрация растворенного кислорода убывает. В близких к поверхности слоях возникает диффузионный поток кислорода, приводящий к снижению концентрации кислорода по сравнению с более глубокими слоями.



Экспериментально измеренные значения концентрации кислорода в воде (прямоугольники) и их сравнение с теоретическими профилями концентрации (сплошные кривые), рассчитанными при $D=D_1=50 \text{ см}^2/\text{сут}$; $d=5 \text{ см}/\text{сут}$. Пунктирными кривыми изображены профили температуры воды. Цифры около кривых обозначают время в сутках

Поскольку диффузия кислорода при устойчивой плотностной стратификации мала, убыль кислорода в средних слоях происходит в основном за счет окисления растворенной и взвешенной органики. В придонных слоях воды возникает дефицит кислорода, который постоянно возрастает. Этот эффект можно объяснить постепенным оседанием взвешенного органического вещества на дно, в результате чего концентрация органики в придонных слоях увеличивается и растет расход кислорода на ее окисление.

При создании математической модели динамики растворенного кислорода при нагреве сверху были учтены все вышеперечисленные эффекты.

В основу модели положена система двух уравнений диффузии:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} - b\rho\eta, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} - d \frac{\partial \eta}{\partial z}, \end{cases} \quad 0 \leq z \leq H; t > 0,$$

где $\rho(z, t)$ — концентрация кислорода в воде; $\eta(z, t)$ — концентрация органического вещества; H — глубина бассейна; D — коэффициент турбулентной диффузии кислорода в воде; D_1 — коэффициент турбулентной диффузии органического вещества в воде; b — коэффициент, характеризующий скорость окисления органики; d — скорость оседания органического вещества на дно.

При оценке коэффициента диффузии D мы полагали, что кислород диффундирует как пассивная примесь. Коэффициент D при устойчивой температуре стратификации измерялся методом фотосъемки с внесением красителя (родамина). Измерения показали, что коэффициент турбулентной диффузии красителя меняется по глубине и во времени от 20 до 130 см²/сут. При расчетах коэффициент D принимался постоянным и равным 50 см²/сут.

Для оценки скорости оседания и коэффициента турбулентной диффузии органического вещества был проведен специальный эксперимент, в котором измерялась концентрация органического вещества, первоначально сосредоточенного у поверхности. При увеличении размеров частиц органического вещества коэффициент диффузии D_1 уменьшался, а скорость оседания d увеличивалась. При расчетах использовались значения, соответствующие частицам размером около 1 мкм: $D_1 = 50$ см²/сут, $d = 5$ см/сут.

Коэффициент b был принят равным $0,32 \cdot 10^{-2}$ (сут·мг/л)⁻¹. Влияние окисления на концентрацию органического вещества считалось малым и не учитывалось.

Начальные значения концентраций кислорода и органического вещества составляли $\rho(z, 0) = 9,95$ мг/л; $\eta(z, 0) = 1,6$ мг/л.

Для органического вещества на границах было принято условие непроницаемости с учетом оседания:

$$D_1 \frac{\partial \eta}{\partial z} \Big|_{z=0} - d\eta(0, t) = 0,$$

$$D_1 \frac{\partial \eta}{\partial z} \Big|_{z=H} - d\eta(H, t) = 0.$$

Численные оценки показали, что в придонной области изменение концентрации кислорода вследствие диффузии составляет лишь 5—10% от изменения концентрации вследствие окисления органики. Поэтому для концентрации кислорода на дне было принято следующее граничное условие:

$$\frac{\partial \rho(H, t)}{\partial t} = -b\rho(H, t)\eta(H, t).$$

Естественным граничным условием для концентрации кислорода на поверхности является условие локального термодинамического равновесия на границе раздела, т. е. концентрация кислорода в тонком поверхностном слое воды принимается равной равновесной концентрации при температуре поверхности воды. Однако на поверхности быстро образуется бактериальная пленка. Часть кислорода, проникающего из атмосферы и диффундирующего из более глубоких слоев воды, затрачивается на окислительные процессы в пленке. В результате концентрация кислорода в поверхностном слое воды оказывается меньше равновесной.

Количество кислорода, затраченное на окисление органического вещества в пленке, разумно представить в виде $\rho_p(t)be^{\delta(t)}$, где $\delta(t)$ — температура поверхности воды, $\rho_p(t)$ — равновесная концентрация кис-

лорода при этой температуре; множитель $e^{u(t)}$ характеризует усиление окислительных процессов с ростом температуры по закону Аррениуса. Коэффициент μ был принят равным 0,826, при этом коэффициент b равнялся $e^{-25,65\mu}$. В результате для концентрации кислорода на поверхности получили следующее выражение:

$$\rho(0, t) = \rho_p(t) \{1 - e^{0,826 [\theta(t) - 25,65]}\}.$$

Ход температуры поверхности воды в течение эксперимента аппроксимировался формулой

$$\theta(t) = 23 - 6,9 e^{-0,64t},$$

где t — время в сутках.

Равновесная концентрация кислорода уменьшается при росте температуры. Зависимость концентрации в диапазоне температур от 20 до 23°C была принята линейной, ρ_p изменялась от 9,3 до 8,6 мг/л. Окончательное граничное условие для концентрации кислорода на поверхности имеет вид

$$\rho(0, t) = (8,6 + 1,587 e^{-0,64t}) [1 - \exp\{-2,187 - 5,7 e^{-0,64t}\}].$$

Полученная система уравнений диффузии решалась численно с помощью явной разностной схемы на ЭВМ БЭСМ-6. Погрешность расчета не превышала 2%. На рисунке показано сравнение рассчитанных на ЭВМ профилей растворенного кислорода с экспериментальными данными (прямоугольники). Расхождение теоретических и экспериментальных значений не превышает 10%.

Инверсии концентрации можно объяснить наличием медленной циркуляции воды в бассейне. Отклонения на верхней границе вызваны грубостью учета процессов роста и окисления бактериальной пленки. С течением времени расхождение расчетных и экспериментальных результатов в верхней части бассейна увеличивается. Это, по-видимому, вызвано неоднородностью состава органического вещества, часть которого не оседает, а медленно всплывает, увеличивая расход кислорода на окисление. Доля всплывающей органики была мала, что привело к заметному расхождению теории с экспериментом только на третьей неделе.

Предложенная модель, несмотря на простоту, довольно хорошо описывает динамику растворенного кислорода в экспериментальном бассейне при радиационном нагреве сверху. В реальных водоемах убыль кислорода в период летнего прогрева происходит значительно медленнее благодаря наличию ветрового перемешивания и аэрации верхних слоев воды. Описанную модель можно считать моделью экстремальной (наихудшей) ситуации, когда летний прогрев водоема совпадает с продолжительным периодом штилевой погоды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Алексеев В. В. и др. Биологические науки, 1979, № 7, с. 95. [2] Алексеев В. В., Сапожников В. В. Природа, 1979, № 10, с. 70.

Поступила в редакцию
30.06.80