

УДК 556.531.4

А.Т. Зиновьев, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., зав. лабор. ИВЭП СО РАН, г. Барнаул
К.Б. Кошелев, канд. физ.-мат. наук, доц., с.н.с. лабор. ИВЭП СО РАН, г. Барнаул

ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ ЭВЕНКИЙСКОЙ ГЭС

В статье развиваются методы количественного прогнозирования воздействия крупномасштабного гидротехнического строительства на качество воды на зарегулированных участках рек. В качестве примера выполнено компьютерное моделирование гидротермических и гидрохимических процессов в Эвенкийском водохранилище на перспективу строительства высоконапорной ГЭС на р. Нижняя Тунгуска. Рассмотрено влияние формирующейся вертикальной плотностной стратификации на показатели качества воды как в водохранилище, так и сбрасываемой в нижний бьеф.

Ключевые слова: водохранилище, вертикальная стратификация, качество воды, кислородный режим, математическое моделирование.

Развитие математических моделей гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов в глубоких внутренних водоемах имеет большой научный интерес для количественного прогнозирования состояния возникающих экосистем водохранилищ при строительстве высоконапорных ГЭС. Для глубоких водохранилищ, как правило, характерно формирование вертикальной плотностной (обычно температурной) стратификации. Наличие такой стратификации существенно затрудняет процесс эффективного перемешивания водных масс по глубине и создает, в частности, условия для вертикальной неоднородности растворенных примесей и газов. Так, в глубоких термически стратифицированных водохранилищах часто отмечается вертикальная неоднородность растворенного кислорода [5].

Кислородный режим является одним из основных показателей экологического состояния водоемов, поскольку практически все внутриводоемные химические и микробиологические процессы протекают с участием или в присутствии растворенного кислорода. Его дефицит приводит, как правило, к структурной перестройке всего цикла круговорота веществ в водоеме. К примеру, снижение концентрации растворенного кислорода ниже допустимых норм отрицательно сказывается на ихтиофауне, появляются заморные явления и, как следствие, снижается рыбная продуктивность водохранилищ. Для корректного прогнозирования изменения содержания растворенного кислорода в воде при строительстве крупных и глубоких водохранилищ учет формирования вертикальной плотностной стратификации принципиально важен [5].

При количественной оценке изменения качества воды в р. Нижняя Тунгуска на перспективу строительства Эвенкийской ГЭС важными вопросами являются содержание растворенного кислорода и уровень минерализации в воде будущего водохранилища [8]. Высокий уровень залесенности зоны затопления в случае сооружения плотины ГЭС обуславливает решение вопроса о влиянии затопления большого объема древесно-кустарниковой растительности на качество воды в водохранилище. Достаточно высокий естественный уровень минерализации поверхностного стока в районе гидростроительства требует оценки возможной минерализации вод Эвенкийского водохранилища.

Для прогноза этих показателей качества воды в Эвенкийском водохранилище были использованы методы математического моделирования процессов переноса растворенного кислорода и растворенной примеси в глубоком слабо проточном водоеме в рамках одномерного вертикального приближения.

Математическая модель, описывающая кислородный режим глубокого стратифицированного водохранилища состоит из двух основных блоков. Гидродинамический блок слу-

жит для воспроизведения формирования плотностной стратификации водохранилища. Данная задача решается путем использования системы уравнений, реализующих одномерную вертикальную гидротермическую модель глубокого водохранилища [1]. Гидрохимический блок модели предназначен как для описания процесса переноса растворенных солей, так и кислородного режима стратифицированного водохранилища. Пространственно-временная динамика общей минерализации в водной толще прогнозируется с использованием подхода, предложенного в работе [2] для описания поведения растворенной консервативной примеси в водохранилище. В отсутствие надежной информации о возможных дополнительных источниках солей в ложе будущего водохранилища моделировался лишь перенос в водохранилище растворенных примесей, поступающих с речным стоком.

Собственно модель кислородного режима глубокого водоема базируется на принципах, предложенных Стритером и Фелпсом. Стандартные уравнения этой модели записаны в предположении однородности распределения химических параметров по горизонтальным слоям водохранилища. Используемая в работе система уравнений, описывающая поведение кислорода в глубоком стратифицированном водоеме, в общем случае включает три переменных: растворенный кислород, растворенное лабильное органическое вещество и взвешенное органическое вещество [7]. Вертикальное распределение этих показателей рассматривается с учетом их переноса конвекцией и диффузией.

Хорошо известно, что скорость окисления твердых частиц много меньше аналогичного процесса для растворенного органического вещества. Поэтому в общем случае моделируемый окислительный процесс разделяется на две стадии: первая – это декомпозиция или растворение органического вещества осадков (сорбированное органическое вещество); вторая – биохимическое окисление лабильного органического вещества [7]. Кроме того, учитывается потребление кислорода на границе «вода-дно». При отсутствии достоверной информации о взвешенном органическом веществе влиянием его окисления на содержание растворенного кислорода в воде пренебрегается. В соответствии с принятыми предположениями уравнения «кислородного» подблока общей модели записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial(\Omega C)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(Q_w C) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega K_c \frac{\partial C}{\partial z}\right) + q_{in} C_{in} - q_{out} C - \Omega k_L L + \frac{\partial}{\partial z}\left[\int_{\Omega_w(z)} \dot{j} \cdot d\Omega\right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\Omega L)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(Q_w L) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega K_L \frac{\partial L}{\partial z}\right) + q_{in} L_{in} - q_{out} L - \Omega k_L L, \quad (2)$$

где $C(z, t)$ – концентрация растворенного кислорода ($\text{мг O}_2 \text{ л}^{-1}$); $L(z, t)$ – лабильное органическое вещество ($\text{мг O}_2 \text{ л}^{-1}$); K_C, K_L – коэффициенты эффективной диффузии; k_L – постоянная скорости окисления лабильного органического вещества; j – поток потребления кислорода на границе «вода-дно» ($\text{мг O}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$); $\Omega(z)$ – площадь зеркала водоема на высоте z от дна.

Граничные условия для уравнений (1)-(2) следующие:

$$\text{для } z = 0$$

$$K_C \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad ; \quad K_L \frac{\partial L}{\partial z} = 0 \quad ; \quad (3)$$

$$\text{для } z = H$$

$$K_C \frac{\partial C}{\partial z} = k_r (C_S - C) \quad ; \quad K_L \frac{\partial L}{\partial z} = 0 \quad ; \quad (4)$$

Здесь k_r – скорость обмена кислородом через границу «воздух-вода»; C_S – концентрация насыщения растворенным кислородом.

Для определения коэффициента k_r используется стандартная формула Бэнкса [6]. В постановке гидротермической задачи имеется определенная специфика, связанная с формированием ледяного покрова в зимний период года. Наличие или отсутствие льда на поверхности водохранилища следует учитывать, когда вычисляются потоки тепла и кислорода через границу раздела «вода-воздух» (или «вода-лед»). При наличии льда в (4) полагается $k_r = 0$ (т.е. отсутствует поток кислорода на границе «вода-лед»).

Для расчета потребления кислорода на окисление затопленной растительности используются полуэмпирические формулы, в которых значение потока на границе раздела «вода-дно», в частности, пропорционально суммарной массе всех экстрагируемых веществ в затопленном биоматериале. Дополнительный (к естественному фону) "сток потребности" в кислороде идет на окисление органических веществ, экстрагируемых водой из затопленной растительности и почв. Полный поток органической массы G_n из биоматериала в воду в результате вымывания растворимых его компонентов рассчитывается по формуле (5), предложенной С.И. Прокофьевым:

$$G_n = \exp[\varepsilon(T/T_0 - 1)] M_n^S / (\sigma_n(B)\tau_n) = -\partial M_n / \partial t = -\partial M_n^S / \partial t, \quad (5)$$

где M_n – масса биоматериала вида n в рассматриваемом объеме; M_n^S – суммарная масса всех экстрагируемых веществ в биоматериале; τ_n – характерное время экстракции; $\sigma_n(B)$ – для древесной растительности поправка на толщину: $\sigma_n(B) = \max\{0.074; B/B_0\}$, а для недревесных биоматериалов $\sigma_n = 1$. B – средневзвешенная по всей высоте толщина ствола (ветвей); B_0 – "стандартная" толщина (диаметр), принятая равной 0.25 м. $\varepsilon = 0.7167$ – температурный коэффициент; T_0 – "стандартная" температура = +10 °С.

В итоге имеем выражение (6) для потока (стока) кислорода у дна

$$\vec{j} = -\beta \eta(c) \sum_n (\chi_n G_n), \quad (6)$$

где $\beta = 1.34730$; χ_n – доля легко окисляемой органики среди экстрагируемых веществ; $\eta(c) = c/c_S$ – поправка на "нестандартную" концентрацию растворенного кислорода.

В качестве уравнения состояния используется эмпирическое соотношение, учитывающее влияние температуры и минерализации воды на ее плотность [4]. Для задания начальных условий для уравнений (1)-(2) использованы значения соответствующих показателей качества воды в р. Нижняя Тунгуска. Для решения нелинейной начально-краевой задачи был использован консервативный полуявный численный алгоритм, основанный на методе контрольного объема и учитывающий ход уровня воды в водохранилище во времени. Решение задачи отыскивалось в пространстве естественных независимых переменных (время t , высота z).

Численные расчеты выполнены для двух вариантов расположения створа гидроузла: 1-й – створ на расстоянии 59,5 км от устья р. Нижняя Тунгуска, отметка НПУ 110,00 мБС, 2-й – на расстоянии 120,0 км от устья, НПУ 200 мБС. Длина водохранилища при НПУ в 1-м варианте равна 695,5 км, объем – 48,51 км³; во 2-м варианте эти показатели будут 1229 км и 409,40 км³ соответственно. Площади затопляемых земельных угодий равны 73,6 в 1-м варианте и 868 тыс. га во 2-м. Моделируемые процессы рассчитаны на 30 лет от начала заполнения водохранилища (т.е. для условий наполнения и проектного режима эксплуатации водохранилища). Для расчетов использованы натурные данные о расходах и температурах втекающей в водохранилище воды, содержании в ней растворенного кислорода и ее минерализации, сведения о метеорологических характеристиках в районе водохранилища.

Расчеты гидротермического режима Эвенкийского водохранилища показали, что с его наполнением достаточно быстро формируется температурная стратификация, весной и осенью сменяемая состояниями гомотермии. На рисунке 1 показано влияние учета минерализации воды на вертикальное распределение температуры воды в течение года. Изменение со временем температуры и солености втекающей воды могут приводить к немонотонности распределения температуры воды по вертикали. Однако следует отметить, что во всех расчетах плотность воды с глубиной возрастала (рис. 2).

Расчет общей минерализации в водохранилище выполнен с учетом данных об изменении солености воды, поступающей по основному руслу и с притоками. Точных данных о поступлении в водохранилище солей с подземными водами нет. Вымывание солей из затопленных почв на данном этапе исследований пренебрегалось. По оценкам для увлажненных территорий их вклад не превысит нескольких процентов [3]. Поэтому следует заключить, что полученные результаты по прогнозу солености воды в водохранилище, в целом, носят предварительный характер. На рисунке 3 представлены изолинии минерализации воды. Как видно, вблизи свободной поверхности достаточно быстро устанавливаются сравнительно невысокие значения уровня минерализации.

Расчеты кислородного режима показали, что распределение концентрации растворенного кислорода по глубине водохранилища будет определяться конкуренцией ряда факторов: содержанием кислорода в поступающей в водохранилище воде, потоками на границах разделов «воздух-вода» и «вода-дно», скоростью окисления органического вещества, вертикальным турбулентным обменом. В модели предполагается, что поток кислорода на границе раздела «вода-дно» определяется, в основном, вымыванием растворимых компонентов древесины, а при замерзании водохранилища такой поток через границу раздела «вода-лед» отсутствует. В расчетах принимается, что лесосводка на затопляемой территории проводиться не будет (до 92 % затопляемых площадей занято древесно-кустарниковой растительностью). На рис. 4 показана концентрация растворенного кислорода в приповерхностных слоях воды.

Из результатов расчетов следует, что показатели качества втекающей воды будут стабилизироваться по мере наполнения водохранилища. Так, температура вытекающей воды ста-

нет близкой к 4 еС (рис. 5). Минерализация сбрасываемой воды после некоторого повышения в начальные годы заполнения водохранилища затем уменьшится до величин менее 100 мг/л.

Выводы. Прогноз качества воды Эвенкийского водохранилища по температуре, минерализации и растворенному кислороду следующий:

– при заполнении водохранилища достаточно быстро возникнет вертикальная плотностная стратификация, при этом основная масса воды будет иметь температуру около 4 °С; летом накопление тепла будет происходить в поверхностных слоях водохранилища выше термоклина; максимальные температуры поверхностных слоев воды после заполнения водохранилища будут на 2-3 еС выше среднегодовой максимальной температуры воды в створе Б. Порог (125,0 км от устья р. Нижняя Тунгуска);

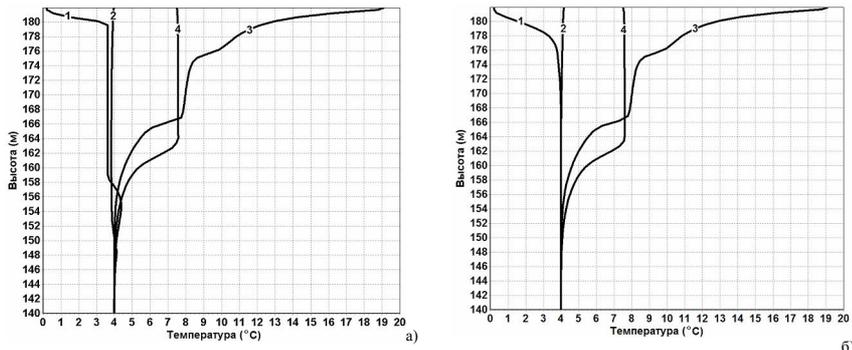


Рис. 1. Расчетные температуры поверхностных слоев воды (цифровые обозначения: 1 – 15 января, 2 – 15 мая, 3 – 15 июля, 4 – 15 сентября): а – с учетом влияния минерализации на плотность воды, б – без учета

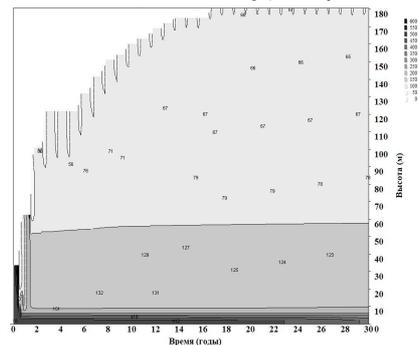


Рис. 3. Расчетные изолинии минерализации воды, мг/л

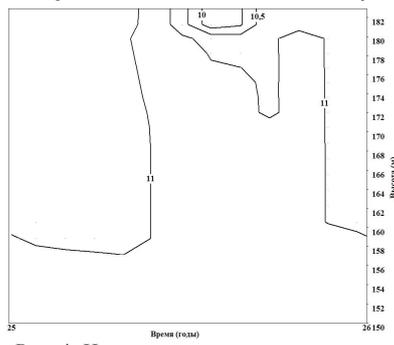


Рис. 4. Изолинии концентрации кислорода (мг/л) в поверхностном слое в течение года, 26-й расчетный год

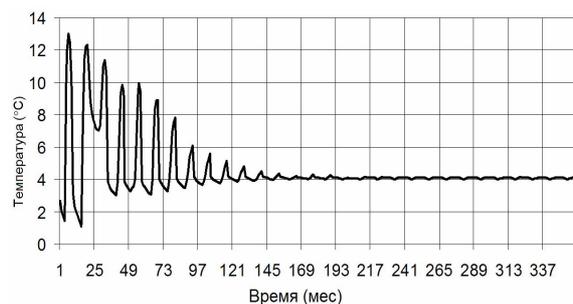


Рис. 5. Изменение температуры вытекающей воды с наполнением водохранилища

толщина ледяного покрова на водохранилище увеличится по сравнению с наблюдающейся толщиной льда в створе Б. Порог на 30-40 см;

– температура сбрасываемой в нижний бьеф воды в первые годы заполнения будет меняться в довольно широком диапазоне (до 10 °С), после заполнения водохранилища температура вытекающей воды установится около 4 °С;

– рассчитанные с учетом формирования вертикальной плотностной стратификации показатели качества воды в водохранилище по растворенному кислороду и минерализации, в целом, благоприятные; в течение первых лет заполнения водохранилища в поверхностных слоях воды зимой будет наблюдаться дефицит кислорода, однако с наполнением водохранилища он будет уменьшаться, а концентрации растворенного кислорода по всей глубине водохранилища станут близкими к кон-

– начало ледостава на водохранилище будет в конце первой декады октября, т.е. примерно в те же сроки, что и в естественных условиях на р. Нижняя Тунгуска; расчетная продолжительность ледостава составит 240-250 суток, освободиться ото льда водохранилище будет к концу мая – началу июня; максимальная

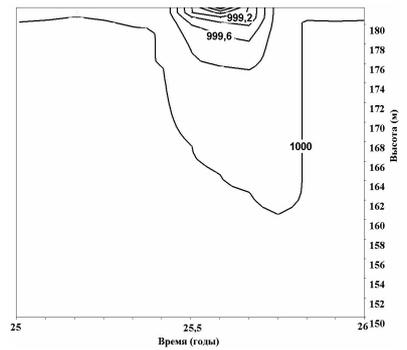


Рис. 2. Изолинии плотности поверхностных слоев воды с учетом влияния минерализации на плотность, 26-й расчетный год

центрациям насыщения. Расчеты показали, что минерализации поверхностных слоев воды будет менее 100 мг/л, а у дна значения минерализации будут около 400 мг/л.

Авторы статьи признательны академику РАН О.Ф. Васильеву за внимание к работе. При подготовке статьи использованы результаты НИИР по теме «Оценка современного состояния водной среды и прогноз ее изменения на перспективу строительства Эвенкийской ГЭС» (договор 8И/2008 от 03.07.08 между ОАО «Ленгидропроект» и ИВЭП СО РАН).

Библиографический список

1. Васильев, О.Ф. Математическое моделирование гидротермических процессов в глубоководных водоемах / О.Ф. Васильев, А.Т. Зиновьев, О.Б. Бочаров // Гидротехническое строительство. – 1991. – №7.
2. Васильев, О.Ф. Математическая модель миграции растворенной примеси в системе водохранилище - затопленные почвы / О.Ф. Васильев, А.Т. Зиновьев, П.В. Иванов, С.А. Сухенко // Водные ресурсы. – 1993. – Т. 20. – N 6.
3. Денисова, А.И. Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования / А.И. Денисова. – Киев: Наукова думка, 1979. Смирнов, Г.Н. Океанология. Учебников для вузов / Г.Н. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1974.
5. Хендерсон-Селлерс, Б. Инженерная лимнология / Б. Хендерсон-Селлерс. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.
6. Banks, R.B. Some features of wind action on shallow lakes / R.B. Banks // Proc. ASCE, J. Env. Eng. Div. – 1975. - V. 101. – P. 813-827.
7. Ivanov, P.V. Mathematical modeling of dissolved oxygen dynamic in a deep reservoir / P.V. Ivanov, A.A.Kuzmin, A.T. Zinoviev // In Proc. IAWQ 17th Biennial Conference. – Budapest, 1994.
8. Эвенкийская ГЭС на р. Нижняя Тунгуска. Предварительные материалы и проект технического задания на проведение оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) – http://www.gidroogk.ru/file/main/global/company/invest/investprojects/PredOVO_S_11.06.08.pdf

Статья поступила в редакцию 18.03.09