

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИМЕСИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОХРАНИЛИЩА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОПУСКАХ ГЭС

© 2010 г. А.В. Рахуба

Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук, г. Тольятти

Ключевые слова: качество воды, зона загрязнения, неустановившийся гидродинамический режим, экстремальный режим, фаза водности, волна попуска, возвратное стоковое течение, численная модель.

Методами численного моделирования проведена оценка влияния источника сброса сточных вод г. Тольятти на качество воды Саратовского водохранилища в условиях зарегулированности стока. Показана математическая модель динамики примеси, определены ее параметры и выполнена верификация. Обсуждаются результаты моделирования распространения загрязняющих веществ при различных режимах попусков воды на ГЭС.

Введение

Формирование качества вод водохранилищ происходит при крайне неустановившемся режиме стока. Причем размеры зон загрязнения в нижнем бьефе водохранилища зависят не только от массы и концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, типа водовыпуска, но и от динамики потока в различные фазы водности. Интенсивные колебания скорости и разнонаправленность течений, обусловленные режимом работы гидроэлектростанций, непосредственно влияют на процессы накопления и распространения в воде примесей, осложняя наблюдения и контроль экологического состояния природных вод. Особенно неблагоприятная обстановка складывается на акваториях водохранилищ в районах крупных промышленных городов, где формируются зоны загрязнения с повышенным содержанием в воде химических веществ. Поэтому определение границ зон чрезмерного загрязнения при возможных экстремальных попусках ГЭС имеет важное

экологическое значение и требует наряду с натурными исследованиями использования численных экспериментов на моделях.

В данной работе на примере Саратовского водохранилища для оценки динамики примеси в нижнем бьефе ГЭС был выбран участок в районе сброса сточных вод г. Тольятти (рис. 1). Источник сброса расположен в 8 км ниже по течению от Жигулевской ГЭС на расстоянии 500 м от левого берега вблизи пос. Федоровка. Ширина водохранилища на этом участке составляет 1–3 км, глубина в русловой части у правого берега – 14–17 м, у левого в месте сброса – 4–6 м.

Рис. 1. Расположение источника сточных вод г. Тольятти.

Особенности гидродинамического режима Саратовского водохранилища

Наряду с естественными гидродинамическими факторами, влияющими на динамику примеси в нижних бьефах водохранилищ, значительную роль играют суточная и недельная изменчивость уровня воды, скорости и направления течений, обусловленных неравномерным режимом работы гидроузлов.

Особенностью режима уровня Саратовского водохранилища являются более значительные суточные колебания в районе нижнего бьефа и небольшие – в районе приплотинного плеса. При таком колебании уровня на всем протяжении водохранилища образуются длинные прямые и обратные волны, которые усложняют режим стокового течения. Согласно экспедиционным наблюдениям и модельным расчетам в ночное время и в выходные дни во время прохождения прямых волн от Жигулевской ГЭС по Саратовскому водохранилищу уровень воды в районе прилегающей поймы держится значительно выше, чем на вышележащем участке, что приводит к появлению обратных уклонов и формированию возвратного стокового течения [1, 2]. Так, в нижнем бьефе Жигулевской ГЭС и у г. Самара в рабочие дни в период с 2 до 5 часов отметка уровня воды ниже, чем в пос. Печерское (рис. 2). При таком распределении уровней на участке от г. Тольятти до пос. Печерское местами как на мелководье, так и в русловой части водохранилища, образуются застойные зоны, а также могут возникать слабые (0,01–0,05 м/с) обратные течения.

Рис. 2. Продольный профиль водной поверхности Саратовского водохранилища (H – уровень воды над «0» графика).

Таким образом, при разных объемах попусков на ГЭС в нижнем бьефе Саратовского водохранилища формирование зоны загрязнения и ее распространение от Тольяттинского источника определяются особенностями гидродинамики.

Создание и верификация численной модели водохранилища

Для оценки распространения загрязняющих веществ в нижнем бьефе Саратовского водохранилища при возможных режимах попусков Жигулевской ГЭС использовалась двумерная компьютерная модель, построенная на основе системы уравнений гидродинамики и конвективно-диффузионного переноса примеси [3, 4, 5]:

$$U_t + \left(\frac{U^2}{H} \right)_x + \left(\frac{UV}{H} \right)_y + gH\zeta_x = lV + c_a \frac{\rho_a}{\rho} W_{(x)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H^2} U|V| + K_L \nabla^2 U + \frac{H P_a}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}, \quad (1)$$

$$V_t + \left(\frac{VU}{H} \right)_x + \left(\frac{V^2}{H} \right)_y + gH\zeta_y = -lU + c_a \frac{\rho_a}{\rho} W_{(y)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H^2} V|V| + K_L \nabla^2 V + \frac{H P_a}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = 0, \quad (3)$$

$$(CH)_t + (UC)_x + (VC)_y = EH\nabla^2(CH) - rCH + C_s W_s, \quad (4)$$

где $U = \int_{-h}^{\zeta} u dz$ и $V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$;

$u(x,y,t)$ и $v(x,y,t)$ – усредненные по глубине, соответственно, продольная и поперечная скорости, м/с;

$h(x,y)$ – невозмущенная глубина, м;

$\zeta(x,y,t)$ – уровень на свободной поверхности, м;

$H = (h + \zeta)$ – полная глубина, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$l = 2\omega \sin\varphi$ – параметр Кориолиса, с⁻¹;

$\omega = 2\pi/\text{сут} = 7,27 \cdot 10^{-5}$ – угловая скорость вращения земли, с^{-1} ;

φ – географическая широта места, град;

c_a – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности;

$\rho_a/\rho = 0,001$ – отношение плотностей воздуха и воды;

$W_{(x)}$ и $W_{(y)}$ – компоненты составляющей скорости ветра, м/с ;

W – результирующий вектор скорости ветра м/с ;

$f_{\text{дно}} = g/C^2$ – безразмерный коэффициент придонного трения (C – коэффициент Шези);

P_a – атмосферное давление, Н/м^2 ;

C – концентрация, г/м^3 ;

K_L, E – горизонтальные коэффициенты турбулентного обмена и диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

r – коэффициент неконсервативности, с^{-1} ;

C_s – концентрация примеси в воде, поступающая из источника, г/м^3 ;

w_s – объем воды, поступающий в единичный объем за единицу времени из внутренних источников, м/с .

Построенная модель разработана для всего Саратовского водохранилища и состоит из 10 125 узлов расчетной сетки с шагом 100–500 м. Все расчеты проводились с шагом по времени, равным 60 с.

Определение коэффициентов модели осуществлялось на отдельных участках водохранилища в районе сброса сточных вод г. Тольятти и в районе пос. Печерское. По данным измерений и модельным экспериментам были определены следующие коэффициенты, используемые в модели: шероховатости $n=0,02$, горизонтального турбулентного обмена $K_L=2,5 \text{ м}^2/\text{с}$, турбулентной диффузии $E=3,0 \text{ м}^2/\text{с}$, бокового трения на границах расчетной области $f_{\text{бок}}=0,01$.

Проверка модели производилась путем сравнения результатов моделирования с натурными данными. На рис. 3 представлены результаты верификации модели по данным натурных измерений, полученных с экспедиционного судна «Биолог» 2–3 августа 2005 г. во время суточной стоянки в русловой части Саратовского водохранилища (координаты стоянки: северная широта $53^\circ 26,666'$ и восточная долгота $49^\circ 37,903'$). Суточная станция (контрольная точка) гидрологических наблюдений была выбрана ниже по течению от Жигулевской ГЭС на расстоянии 9,4 км (пос. Федоровка).

Рис. 3. Измеренный и расчетный ход уровня воды относительно отметки дна в пос. Федоровка 2–3 сентября 2005 г.

Статистическая обработка результатов расчета на модели показала, что модельное и измеренное среднеквадратичное отклонение равно $\sigma_x/\sigma_y = 0,10/0,08$ и коэффициент корреляции равен $R_{xy} = 0,78$. Погрешность расчета составила 20 %, что послужило достаточным основанием для проведения численных экспериментов на построенной модели.

Моделирование динамики сточных вод города Тольятти при различных гидродинамических режимах

Модельный расчет распространения примеси сточных вод г. Тольятти осуществлялся на основе измеренных ежечасных расходов воды на Жигулевской ГЭС (рис. 4), данных наблюдений за расходами воды в устьях основных боковых притоков и данных расхода и концентрации сточных вод источника сброса (табл. 1). В качестве индикатора загрязненности водной среды в расчетах использовался показатель удельной электропроводности воды (УЭП). Фоновый показатель УЭП на Саратовском водохранилище составил 370 мкСм/см. Было рассмотрено три экстремальных режима работы входного и замыкающих гидроузлов:

- штатный режим суточных колебаний расходов в рабочие дни;
- режим минимальных санитарных попусков воды в нижнем бьефе и режим расходов в выходные дни;
- максимальный режим попусков воды весеннего половодья.

Рис. 4. Суточный ход расхода воды через Жигулевскую ГЭС в рабочие дни.

В течение рабочих суток в створе сброса сточных вод г. Тольятти наблюдается два явно выраженных режима расходов. В дневные и вечерние часы расход воды имеет максимальное значение и составляет от 7000–8000 м³/с. В ночные и утренние часы расход воды может снижаться до 300 м³/с и ниже. В результате таких колебаний в районе сброса сточных вод возникает неоднородная картина полей течений, которая влияет на характер распространения примесей в нижнем бьефе водохранилища.

Таблица 1. Характеристика источника сточных вод г. Тольятти

<i>Источник</i>	<i>Расход сточных вод, м³/с</i>	<i>УЭП, мкСм/см</i>	<i>Глубина, м</i>	<i>Расстояние от левого берега, м</i>
1	3,20	828	4–6	500
2	2,06	1488		
3	0,65	2621		
Суммарный источник	5,91	1255		

В момент снижения нагрузки на ГЭС в районе острова Бахилловский, разделяющего основной русловой поток на два рукава, появляются два слабых противотока вдоль правого берега по направлению к плотине и вдоль левого берега – от плотины (рис. 5). Такая циркуляция течений непосредственным образом влияет на формирование геометрии шлейфа сточных вод. В течение 3–4 часов, пока на ГЭС держатся низкие расходы воды, возле источника сброса сточных вод формируется зона повышенных концентраций химических веществ (УЭП 390–425 мкСм/см). Вследствие низких скоростей течения (0,05–0,1 м/с) шлейф примеси вытягивается по течению на расстояние 0,8–1 км по ширине и 3–4 км по длине русла. Затем, когда расходы воды начинают повышаться, сформировавшееся пятно загрязнения сносится возросшим течением вдоль левого рукава русла вниз по течению на десятки километров. Во время максимальной суточной фазы стока зона загрязнения от источника уже существенно сужается (рис. 6), а скорость потока возрастает до 0,5–1 м/с.

Рис. 5. Распространение сточных вод г. Тольятти в нижнем бьефе Жигулевской ГЭС в ночные часы суток (а – распределение УЭП в мкСм/см, б – скорость течения в см/с).

Рис. 6. Распространение сточных вод г. Тольятти в нижнем бьефе Жигулевской ГЭС в дневные и вечерние часы суток (а – распределение УЭП в мкСм/см, б – скорость течения в см/с).

Рис. 7. Распространение сточных вод г. Тольятти в нижнем бьефе Жигулевской ГЭС во время санитарных попусков (а – распределение УЭП в мкСм/см, б – скорость течения в см/с).

Модельные расчеты показывают, что в случае суточного колебания расходов воды распространение загрязняющих веществ на Саратовском водохранилище идет

порционно, накапливаясь в местах сброса сточных вод в маловодную фазу гидродинамического режима и смещаясь ниже по течению в многоводную.

В выходные дни, а особенно во время санитарных попусков, когда скорость течения может снижаться до чувствительности измерительных приборов, зона распространения сточных вод существенно увеличивается в районе сброса. Слабый однонаправленный поток от плотины ГЭС разносит пятно примеси практически по всей ширине русла. На рис. 7 показан модельный расчет формирования зоны загрязнения во время санитарных попусков ($Q=300 \text{ м}^3/\text{с}$) с суточной продолжительностью.

При максимальных попусках во время весеннего половодья расходы воды через гидроузел Жигулевской ГЭС достигают $25\ 000\text{--}30\ 000 \text{ м}^3/\text{с}$. Скорость потока в этот период возрастает до $1\text{--}1,5 \text{ м/с}$, что способствует хорошему смешению сточных вод. В результате в пределах 500 метровой зоны сброса концентрация загрязняющих веществ не превышает величины фона.

Таким образом, согласно проведенным модельным расчетам было установлено, что в период летне-осенней межени максимальная зона загрязнения от источника сброса сточных вод г. Тольятти формируется во время продолжительных санитарных попусков и занимает площадь 5 км^2 . В суточном режиме работы ГЭС в дневные и вечерние часы зона загрязнения составляет $0,5 \text{ км}^2$, а в ночные часы увеличивается до 1 км^2 . В период весеннего половодья зона загрязнения уже не формируется, поскольку в результате больших объемов попусков ГЭС разбавление сточных вод происходит сразу в створе сброса.

Заключение

Выполненные расчеты на модели показали, что суточные попуски воды с ГЭС оказывают весьма существенное влияние на характер формирования и распространения шлейфа загрязнения в нижнем бьефе водохранилища. В работе были смоделированы три характерные ситуации: режим колебаний расходов в рабочие дни, режимы минимальных и максимальных попусков. Во всех случаях картины распространения сточных вод принципиальным образом отличаются. В маловодную фазу гидродинамического режима идет увеличение зон загрязнения в районах сброса, тогда как в многоводную они сносятся ниже от источника возросшим стоковым течением.

Для источника сброса сточных вод г. Тольятти было установлено, что слабые обратные течения, возникающие вдоль правого берега в результате суточных колебаний характеристик потока, не оказывают существенного влияния на снос струи сточных вод в сторону ГЭС, как предполагалось нами ранее. Поэтому, зона распространения загрязнения всегда направлена вниз по течению и вытягивается вдоль левого берега во все фазы гидродинамического режима водохранилища.

Следует отметить, что в условиях экстремальных попусков на ГЭС нельзя принять достаточно обоснованным проведение гидрохимической съемки без предварительного определения масштабов зон загрязнения. Неучет особенностей динамики примеси в нижних бьефах водохранилищ может привести к искажению оценки фоновых показателей качества воды. В этом случае, подобное моделирование позволяет достоверно оценить границы распространения сточных вод в разные фазы суточного гидродинамического режима водохранилища и обоснованно выбрать станции отбора проб для химического анализа при проведении мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахуба А.В. Динамика водных масс Саратовского водохранилища под влиянием попусков ГЭС // Водное хозяйство России. 2008. № 2. С. 55–66.
2. Чигиринский П.Ф. Динамика водной поверхности Саратовского водохранилища // Сб. работ Тольяттинской ГМО. Вып. 11. Л., 1979. С. 53–62.
3. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометиздат, 1977. 207 с.
4. Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Тузова О.И. Моделирование адвекции и диффузии примесей в произвольной области // Морские гидрофизические исследования. Севастополь, 1990. Т. 5. С. 56–59.
5. Стокер Дж.Дж. Волны на воде. Москва: Издательство иностранной литературы, 1959. 617 с.

Сведения об авторе:

Рахуба Александр Владимирович, к. т. н., научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов Института экологии Волжского бассейна РАН, 445003 г. Тольятти, Самарская обл., ул. Комзина д. 10; e-mail: rahavum@mail.ru.