

жин ведется только специализированными организациями, имеющими соответствующие права, эксплуатация подземных вод возможна только при наличии специального разрешения соответствующих водохозяйственных органов.

Планирование использования подземных вод проводят при обязательном учете их взаимосвязи с поверхностными и возможного влияния этого отбора на экологические условия. Планирование целесообразно выполнять в рамках схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, составляемых по отдельным речным бассейнам или крупным административным единицам. При этом следует в обязательном порядке предусматривать мероприятия по охране как самих подземных вод, так и других компонентов природной среды, учитывая не только установленные тенденции динамики данного процесса в предплановый период, но и возможный эффект от осуществления планируемых мероприятий по контролю использования водных ресурсов и их охране.

С целью охраны подземных вод от загрязнения и истощения их эксплуатационных запасов должно быть предусмотрено проведение комплекса природоохранных мероприятий. Особое внимание следует уделять законодательным ограничениям и контролю за теми отраслями хозяйственной деятельности, которые могут привести к негативным изменениям качества подземных вод и уменьшению их ресурсов.

УДК 532.543:681.121

Ф.Д. ШНИПОВ

К ВОПРОСУ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ И КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Дефицит водных ресурсов в южных районах СССР вызывает необходимость совершенствования прежде всего государственной системы оперативного учета использования вод, основой которой должны быть автоматические устройства измерения количественных и качественных характеристик.

Эффективным способом определения расхода (объема) воды, обеспечивающим возможность автоматизации, является одноточечный "скорость — площадь", в котором средняя скорость потока измеряется непосредственно [1]. Его теоретической основой выступает полуэмпирическая зависимость для расчета распределения по сечению продольной осредненной скорости [2], полученная из некоторых гипотетических предложений. К определенным недостаткам одноточечного способа можно отнести следующие:

положенная в его основу полуэмпирическая зависимость не полностью отражает сложную кинематическую структуру потока в открытых руслах, в частности влияние трехмерности поля осредненных скоростей, свободной поверхности, ветровых воздействий на нее и т.д.;

точка на репрезентативной вертикали, где локальная скорость равна средней, находится в ядре потока на расстоянии $(0,3-0,4)H_i$ от дна (H_i — глубина на вертикали). Это приводит к дополнительным методическим погрешностям измерений в руслах с большими глубинами.

Кроме измерения количественных характеристик водных ресурсов (расход, объем стока), необходимо знание некоторых показателей качества (например, температура, минерализованность, мутность и т.д.). Для оперативного определения этих величин также требуются способы, обеспечивающие возможность автоматизации измерений.

В статье изложены методические положения, составляющие основу для разработки оперативных способов измерения количественных и некоторых качественных характеристик водных ресурсов.

Необходимым условием для определения расхода воды в русле является знание (измерение или расчет) поля продольной скорости с учетом особенностей внутренней структуры потока и внешних воздействий (ветер, деформации сечения и т.д.). При расчете поля осредненных скоростей в качестве исходных целесообразно использовать упрощенные (параболизованные) дифференциальные уравнения турбулентного движения Рейнольдса [3], в которых диффузионным переносом в продольном направлении x_1 пренебрегают и градиент локального гидродинамического давления dP/dx заменяется градиентом среднего по сечению давления $d\bar{P}/dx_1$:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \nu \Delta v_1 + F_1 - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\bar{P}}{dx_1} + \frac{d}{dx_2} (\overline{-v'_1 v'_2}) + \frac{d}{dx_3} (\overline{-v'_1 v'_3}), \\ \frac{dv_2}{dt} = \nu \Delta v_2 - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx_2} + \frac{d}{dx_2} (\overline{-v'^2_2}) + \frac{d}{dx_3} (\overline{-v'_2 v'_3}), \\ \frac{dv_3}{dt} = \nu \Delta v_3 - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx_3} + \frac{d}{dx_2} (\overline{-v'_3 v'_2}) + \frac{d}{dx_3} (\overline{-v'^2_3}), \end{cases} \quad (1)$$

где $v_i, \overline{v'_i v'_j}$ ($i, j = 1, 2, 3$) — компоненты соответственно осредненной скорости и турбулентного направления; x_i ($i = 1, 2, 3$) — декар-

товые координаты; $\frac{dv_i}{dt} = \frac{dv_i}{dt} + \frac{dv_i v_j}{dx_j}$.

Гидростворы, в которых выполняются измерения характеристик водных ресурсов, располагаются на прямолинейных участках водотоков на значительном удалении от водорегулирующих и водоподпорных сооружений. Поэтому влиянием нестационарности и продольной неоднородности потока можно пренебречь. Отметим, что исходными данными по гидроствору являются координаты поперечного сечения и локальные коэффициенты шероховатости и, как правило, не имеется сведений об участке водотока. Это служит еще одним аргументом необходимости пренебрежения производными по t, x_1 . Известно, однако, что нестационарность и неоднородность существенно деформируют поле продольной скорости, поэтому можно попытаться учесть ее влияние, записав первое уравнение (1) в виде

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dx_2} + \frac{dv_1 v_3}{dx_3} &= v \Delta v_1 + g i_o - g i_c = \\ &= -g i_n + \frac{d}{dx_2} (\overline{-v'_1 v'_2}) + \frac{d}{dx_3} (\overline{-v'_1 v'_3}), \end{aligned}$$

где i_o, i_c — уклоны соответственно дна водотока и свободной поверхности; $g i_n = \frac{dv_1}{dt} + \frac{dv_1^2}{dx_1}$; $i_n = i_n(x_2, x_3)$ — уклон "инерции".

После введения функции тока ψ для поперечной циркуляции гипотезы Буссинеска для турбулентных касательных напряжений и некоторых несложных преобразований система уравнений (1) может быть представлена в виде

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{K} \Delta \overline{v_1} + \left(\frac{d\overline{K}}{dx_2} - \overline{v_2} \right) \frac{d\overline{v_1}}{dx_2} + \left(\frac{d\overline{K}}{dx_3} - \overline{v_3} \right) \frac{d\overline{v_1}}{dx_3} &= -g, \\ \overline{v} \Delta^2 \psi - \frac{d}{dx_2} (\Delta \overline{\psi v_2}) - \frac{d}{dx_3} (\Delta \overline{\psi v_3}) &= \frac{d^2}{dx_2 dx_3} (v_3'^2 - v_2'^2) + \\ + \left(\frac{d^2}{dx_3^2} - \frac{d^2}{dx_2^2} \right) (\overline{-v'_2 v'_3}), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $\overline{v_i} = v_i I^{-0,5}$; $\overline{\psi} = \psi I^{-0,5}$; $\overline{v'_i v'_j} = v'_L v'_j I^{-1}$; $\overline{K} = \overline{K} I^{-0,5}$; $I = i_o - i_c - i_n$; \overline{K} — кинематический коэффициент турбулентной вязкости.

Для определения напряжений Рейнольдса $\overline{v'_i v'_j}$ можно использовать модели турбулентности различной степени сложности, но необходимым условием является адекватное моделирование ими анизотропности нормальных компонентов. Зачастую в зависимости

для $v'_i v'_j$ входят кинетическая энергия турбулентности K_3 и скорость ее диссипации ϵ , для определения которых, как правило, используется двухпараметрическая ($K_3 - \epsilon$) модель:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\bar{K}}{\sigma_K} \Delta \bar{K}_3 + \left(\frac{1}{\sigma_K} \cdot \frac{d\bar{K}}{dx_2} - \bar{v}_2 \right) \frac{d\bar{K}_3}{dx_2} + \left(\frac{1}{\sigma_K} \cdot \frac{d\bar{K}}{dx_3} - \bar{v}_3 \right) \frac{d\bar{K}_3}{dx_3} = \bar{\epsilon} - \bar{P}, \\ & \frac{\bar{K}}{\sigma_\epsilon} \Delta \bar{\epsilon} + \left(\frac{1}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{d\bar{K}}{dx_2} - \bar{v}_2 \right) \frac{d\bar{\epsilon}}{dx_2} + \left(\frac{1}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{d\bar{K}}{dx_3} - \bar{v}_3 \right) \frac{d\bar{\epsilon}}{dx_3} = \\ & = c_{\epsilon_2} \frac{\bar{\epsilon}^2}{\bar{K}_3} - c_{\epsilon_1} \frac{\bar{\epsilon}}{K_3} \bar{P}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $K_3 = K_3 I^{-0,5}$; $\bar{\epsilon} = \epsilon I^{-1,5}$; $\bar{P} = \bar{K} \left(\left(\frac{d\bar{v}_1}{dx_2} \right)^2 + \left(\frac{d\bar{v}_1}{dx_2} \right)^2 + \left(\frac{d\bar{v}_1}{dx_3} \right)^2 \right)$;

$\sigma_K, \sigma_\epsilon, c_{\epsilon_1}, c_{\epsilon_2}$ — эмпирические коэффициенты.

Для определения концентрации примеси (мутность, минерализованность, температура) целесообразно использовать дифференциальное уравнение турбулентной диффузии в виде

$$\bar{D}_2 \frac{d^2 \bar{C}}{dx_2^2} + \bar{D}_3 \frac{d^2 \bar{C}}{dx_3^2} + \left(\frac{d\bar{D}_2}{dx_2} - \bar{v}_2 \right) \frac{d\bar{C}}{dx_2} + \left(\frac{d\bar{D}_3}{dx_3} - \bar{v}_3 \right) \frac{d\bar{C}}{dx_3} = \bar{S}_c, \quad (4)$$

где $D_i = D_i I^{-0,5}$, $\bar{C} = CI^{-0,5}$, D_i — коэффициенты турбулентной диффузии; \bar{S}_c — объемная плотность источников (стоков).

Поскольку плотность воды зависит от концентрации содержащихся в ней веществ, необходимо к имеющимся уравнениям добавить уравнение состояния $\bar{\rho} = \rho(\bar{C})$. Введением вихря скорости $\bar{W} = \Delta \psi$ второе уравнение (2) может быть заменено двумя дифференциальными уравнениями 2-го порядка. Тогда системы (2), (3), (4) состоят из однотипных уравнений 2-го порядка эллиптического типа, и для них могут быть сформулированы корректные граничные задачи с краевыми условиями различного типа [4]. По оценке П. Роуча [5], последние играют весьма важную роль в вычислительной гидродинамике, что требует особой тщательности при их формулировке. Однако этот вопрос выходит за рамки данной статьи, поэтому лишь отметим, что именно посредством задания соответствующих краевых условий можно учесть влияние на кинематику потока свободной поверхности и ветровых напряжений.

Уравнения (2), (3), (4) записаны для переменных, пропорциональных I^{-n} (n — показатель степени), поэтому исходными дан-

ными для их решения являются координаты поперечного сечения и локальные коэффициенты шероховатости. Результатом совместного численного решения сформулированных граничных задач является математическая модель, позволяющая получить поля кинематических характеристик ($\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3, \bar{K}_3, \bar{\epsilon}, \bar{K}$) и локальные значения концентрации \bar{C} с учетом трехмерности движения потока, влияния свободной поверхности и ветровых напряжений. Она выступает основой для разработки оперативных способов измерения расходов воды и концентрации примесей в водотоках, некоторые положения которых излагаются ниже.

Выполнив с помощью разработанной математической модели расчет локальных значений продольной осредненной скорости и концентрации, относительные величины расхода и средней концентрации можно определить численным интегрированием по площади живого сечения w функций $\bar{v}_1(x_2, x_3), \bar{C}(x_2, x_3)$:

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \int_w \bar{v}_1(x_2, x_3) dw, \\ \bar{C} &= \frac{1}{w} \int_w \bar{C}(x_2, x_3) dw. \end{aligned} \quad (5)$$

Для вычисления абсолютных значений этих величин необходимо выполнить идентификацию, т. е. по данным измерений v_1 в одной или нескольких точках сечения определить величину уклона I . Репрезентативное нахождение последнего является нетривиальной задачей, поскольку в него включена величина уклона "инерции" i_n , характеризующего нестационарность, продольную неоднородность, являющейся переменной по сечению. Обоснование выбора расположения точек идентификации является предметом особых исследований, однако уже сейчас можно сделать предположение о необходимости измерений в областях, где поле продольной скорости при нестационарном и неравномерном движении претерпевает наибольшие изменения по сравнению с продольно-однородным потоком. Следовательно, идентификацию целесообразно выполнять по измерениям v_1 в двух точках потока (у уреза и вблизи гидродинамической оси) и величину уклона вычислять по формуле

$$I = \left(\beta \frac{v_1(1)}{v_1(1)} + (1 - \beta) \frac{v_1(2)}{v_1(2)} \right)^2, \quad (6)$$

где β — весовой коэффициент (0...1), отображающий влияние на величину уклона репрезентативных точек 1 и 2; $v_1(1), v_1(2), \bar{v}(1), \bar{v}(2)$ — соответственно измеренные и расчетные значения продольной скорости.

Построение градуировочной таблицы гидроствора. Математическая модель и соответствующее программное обеспечение позволяют для каждого гидроствора вычислить значения $\bar{Q}(i, j), \bar{C}(i, j)$ во всем диапазоне изменения отметок свободной поверхности ($\min - \max, i = \overline{1, N}$) и при различных величинах ветровых напряжений, воз-

действующих на свободную поверхность ($j = \overline{1, N_1}$). (Выходные данные: координаты x_2, x_3 гидроствора и локальные коэффициенты шероховатости.)

Отметка свободной поверхности	Ветровые напряжения					
	$\tau_b(1)$	$\tau_b(2)$	...	$\tau_b(j)$	...	$\tau_b(N_1)$
$x_2^n(1)$	$\overline{Q}(1,1)$ $\overline{C}(1,1)$	$\overline{Q}(1,2)$ $\overline{C}(1,2)$	...	$\overline{Q}(1,j)$ $\overline{C}(1,j)$	...	$\overline{Q}(1,N_1)$ $\overline{C}(1,N_1)$
$x_2^n(2)$	$\overline{Q}(2,1)$ $\overline{C}(2,1)$	$\overline{Q}(2,2)$ $\overline{C}(2,2)$	...	$\overline{Q}(2,j)$ $\overline{C}(2,j)$	...	$\overline{Q}(2,N_1)$ $\overline{C}(2,N_1)$
...
$x_2^n(i)$	$\overline{Q}(i,1)$ $\overline{C}(i,1)$	$\overline{Q}(i,2)$ $\overline{C}(i,2)$	...	$\overline{Q}(i,j)$ $\overline{C}(i,j)$	...	$\overline{Q}(i,N_1)$ $\overline{C}(i,N_1)$
...
$x_2^n(N_2)$	$\overline{Q}(N_2,1)$ $\overline{C}(N_2,1)$	$\overline{Q}(N_2,2)$ $\overline{C}(N_2,2)$	...	$\overline{Q}(N_2,j)$ $\overline{C}(N_2,j)$	...	$\overline{Q}(N_2,N_1)$ $\overline{C}(N_2,N_1)$

Рис. 1. Градуировочная таблица гидроствора

Результаты заносятся в градуировочную таблицу (рис. 1), представляющую двумерную матрицу $Q(i, j) = f_1(x_2^n(i), \tau_b(j))$, $\overline{C}(j, i) = f_2(x_2^n(i), \tau_b(j))$. Отметим, что в дальнейшем при учете дополнительных факторов (например, деформация русла) размерность матрицы будет увеличиваться. Каждый столбец матрицы (таблично заданная функция) аппроксимируется сплайном m -й степени:

$$\overline{Q}_m(x_2^n) = \sum_{a=1}^m a_a^i (x_2^n - x_2^n(i))^a, \quad (7)$$

$$\overline{C}_m(x_2^n) = \sum_{a=1}^m b_a^i (x_2^n - x_2^n(i))^a,$$

и, таким образом, зависимость измеряемой характеристики от уровня воды в гидростворе при фиксированном значении ветрового напряжения представляется в виде полинома. Отметим, что количество полиномов для \overline{C} будет определяться количеством измеряемых характеристик качества (например, мутность, минерализованность, температура).

Алгоритм измерения расхода воды и (или) концентрации примеси. После построения градуировочной таблицы гидроствора измерение характеристик выполняется в такой последовательно-

сти: измеряется отметка свободной поверхности x_2^n и ветровое напряжение τ_B ; выполняется идентификация (измеряется продольная скорость в репрезентативных точках потока), вычисляется уклон I по (6); выбираются полиномы (7), соответствующие величине ветрового напряжения, и вычисляются величины $\overline{Q}(x_2^n)$ и (или) $\overline{C}(x_2^n)$, а также абсолютные значения расхода воды и (или) концентрации примеси:

$$Q(x_2^n) = \overline{Q}(x_2^n) I^{-0,5}; \quad C(x_2^n) = \overline{C}(x_2^n) I^{-0,5}.$$

Следует отметить, что предлагаемый способ будет иметь наибольшую эффективность при выполнении измерений с помощью автоматических устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р о г у н о в и ч В.П., О с и п о в и ч А.А. Совершенствование первичного учета использования водных ресурсов на мелиоративных системах // Тез. докл. Всесоюз. НТС "Проектир. комплексн. использ. и охраны водн. рес. на мелиор. системах" / ЦБНТИ Минводхоза СССР. — М., 1978. — С. 14—17.
2. Р о г у н о в и ч В.П., Б о г д а н о в и ч М.И. Распределения осредненных скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1983. — Вып. 13. — С. 56—62.
3. Р о д и В. Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений. — М., 1984. — С. 227—332.
4. Т и х о н о в А.Н., С а м а р с к и й А.А. Уравнения математической физики. — М., 1977. — 735 с.
5. Р о у ч П. Вычислительная гидродинамика. — М., 1980. — 616 с.

УДК 628.356

Т.В. ЦЕЛИКОВА, Г.Ф. КОЗАК

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ МИНСКОЙ СТАНЦИИ АЭРАЦИИ

На очистные сооружения г. Минска поступают бытовые сточные воды и сточные воды предприятий автомобильной, станкостроительной, электронной и радиопромышленности, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. Количество сточных вод, сбрасываемых в р.Свислочь по г.Минску за 7 лет (1980—1986 гг.) возросло на 180,5 тыс. м³/сут.

Цель данной работы — изучение динамики содержания тяжелых металлов и влияние их на биологическую очистку Минской станции аэрации (МСА), оценка качества сточных вод с целью охраны окружающей среды.