

УДК 556.552

Внутренний обмен водохранилищ и методы его оценки

А.Б.Китаев

Пермский государственный университет

При внутреннем водообмене происходит перемещение и смешение водных масс в водоемах и их конкретных частях. Внутренний водообмен может быть связан как с внешним водообменом и водным балансом, так и с перемешиванием (горизонтальным и вертикальным турбулентным обменом). В первом случае фактором, определяющим водообмен, являются стоковые течения. Во втором случае турбулентное перемешивание происходит при волнах и течениях (как стоковых, так и ветровых).

В настоящее время оценки и методы внутреннего водообмена, который, несомненно, сложнее, менее разработаны, чем методы оценки внешнего водообмена.

Представление об интенсивности внутреннего водообмена, связанного с перемешиванием вод, дают значения коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена (A г/см·с). Среди работ этого направления следует выделить исследования В.А.Знаменского [7,8], Н.В.Буторина и А.С.Литвинова [3], В.Н.Верболова [4], В.М.Сокольников [15], Л.М.Талмазина и В.А.Шнайдмана [16], С.Г. Тушинского [17,18], И.М.Ширяк [21] и др. Результаты их работ показали, что в искусственных водоемах горизонтальный обмен вод происходит значительно интенсивнее вертикального. Внутренний водообмен, связанный с перемешиванием, приводит к видоизменению водных масс, выравниванию физико-химических показателей вод по всему объему.

Для оценки коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена наиболее часто используется подход, предложенный В.А.Знаменским [7]. Суть его сводится к следующему. Транзитные потоки в озерах и водохранилищах создают специфическую систему течений и обуславливают турбулентную диффузию как по вертикали, так и в поперечном направлении. Втекание потока в более широкий и глубокий водоем приводит к рассеиванию энергии и уменьшению скорости течения, а также к выравниванию скорости по глубине. Основные потери энергии потока осуществляются в придонном слое, где отмечается резкий перелом эпюры скоростей. Образующиеся там вихри имеют горизонтальную ось вращения и малые размеры (по сравнению с глубиной). На границе этого слоя отмечается максимум горизонтальной и вертикальной пульсационных составляющих скорости. Для скоростной вертикали плоского потока (полагая поток установившимся и равномерным) В.А.Знаменский предлагает коэффициент турбулентного обмена вида

$$A_z = \rho \chi H v \left(\frac{\lambda}{2} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, χ – коэффициент Кармана (для открытых потоков он $\approx 0,3$), H – глубина потока, v – скорость потока, λ – коэффициент гидравлического сопротивления ($\lambda = 2 \frac{H}{\Delta} \left(\frac{H}{\Delta} \right)^{0,75}$), где $\frac{H}{\Delta}$ – относительная шероховатость, $Re = \frac{vH}{\nu}$ – число Рейнольдса, ν – кинематическая вязкость).

Для продольной составляющей коэффициента турбулентного обмена может быть использована формула

$$A_x = k_x H \sqrt{2} q H I = k_x v H \lambda^{0,5}, \quad (2)$$

где I – уклон водной поверхности, k_x – числовой параметр (по Харлему $k_x = 14,3$).

Для поперечной составляющей может быть использована зависимость

$$A_y = A_z \left(k_y \frac{B}{H} \right)^{1,5}, \quad (3)$$

где $k_y = \frac{B_{cp}}{B}$ (B – ширина водоема, B_{cp} – средняя ширина отсека, ограниченная с одной стороны транзитным потоком, а с другой – линией нулевых скоростей в центральной части водоворота).

Турбулентный обмен характеризуется направленностью, поэтому коэффициенты обмена по соответствующим осям координат можно рассматривать как векторные величины. Тогда суммарный коэффициент турбулентного потока в водоеме может быть представлен как геометрическая сумма векторов в трехмерном пространстве:

$$A_s = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}. \quad (4)$$

Исходя из приведенных выше зависимостей, получим следующее выражение для суммарного коэффициента:

$$A_s = A_x \sqrt{1 + \left(\frac{k_z}{k_x} \right)^2 \cdot \left[1 + \left(k_y \cdot \frac{B}{H} \right)^3 \right]}, \quad (5)$$

где $k_z = 0,7 \chi$. Таким образом, суммарный коэффициент обмена прямо пропорционален величине продольного обмена и морфологическому параметру B/H .

Несколько позже В.А.Знаменский [10,11], учитывая морфометрические, гидравлические и энергетические характеристики водоемов, предложил два следующих варианта формул для расчета коэффициентов турбулентного обмена вдоль потока (A_x), в поперечном направлении (A_y) и по глубине (A_z):

$$A_x = 20,2 v \left(\frac{H}{\Delta} \right)^{0,375} \cdot Re^{0,5} = 20,2 v \left(\frac{Re}{Fr} \right)^{0,5} \cdot (I \cdot Re)^{0,5}, \quad (6)$$

$$A_y = 0,845 v \left(\frac{B}{H} \right)^{1,5} \cdot \frac{\left(\frac{H}{\Delta} \right)^{1,13}}{Re^{0,5}} = 2,82 v \left(\frac{B}{H} \cdot \frac{Re}{Fr} \right) \cdot \frac{I^{1,5}}{Fr^{0,5}}, \quad (7)$$

$$A_z = 0,845 v \frac{\left(\frac{H}{\Delta} \right)^{1,13}}{Re^{0,5}} = 2,82 v \left(\frac{Re}{Fr} \right) \cdot \frac{I^{1,5}}{Fr^{0,5}}, \quad (8)$$

где Fr – число Фруда. Бесспорным достоинством предложенных вариантов формул является то, что они прошли апробацию применительно к различным водоемам нашей страны и дали вполне удовлетворительные результаты.

Оценка интенсивности внутреннего водообмена с использованием коэффициентов турбулентного обмена вод имеет несомненные положительные стороны. Однако в ряде случаев расчет величин A_x, A_y, A_z часто затруднен отсутствием натуральных материалов для определения многих гидравлических характеристик водохранилищ и их конкретных частей. Последнее заставило многих исследователей использовать другие подходы к оценке внутреннего водообмена.

Отчетливое представление о специфике внутреннего водообмена в отдельных частях водоемов дают схемы интегральной циркуляции их вод. На искусственных водоемах такие схемы циркуляции вод получены по Рыбинскому водохранилищу И.Ф.Фомичевым [19,20], и на их основе разработана методика количественной оценки интенсивности внутреннего водообмена отдельных участков мелководного водоема [19,20]:

$$M_B = \frac{\sum Q_{np} + \sum Q_{ст}}{2W_{уч}}, \quad (9)$$

где M_B – коэффициент мгновенного водообмена, $\sum Q_{np}$ – сумма расходов воды, втекающей в участок, $\sum Q_{ст}$ – сумма расходов воды, вытекающей из участка, $W_{уч}$ – объем воды в исследуемом участке. Настоящий коэффициент показывает, какая часть водной массы сменяется за секунду.

В.А.Знаменский [9,10] предлагает характеризовать внутренний водообмен в водохранилищах с помощью показателя (автор называет его коэффициентом внутреннего водообмена), определяющего относительное изменение объема водоема:

$$D_{\Delta W} = \frac{\Delta W}{V_B} = \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{\Sigma T}{H} \right), \quad (10)$$

где ΔW – изменение объема воды в водоеме, $\Delta h/\Delta t$ – интенсивность изменения уровня воды при его спадах и подъемах, ΣT – суммарное время подъемов и спадов уровня различной интенсивности, V_B – объем водохранилища за соответствующий интервал времени, H – средняя глубина водоема. Настоящая методика проверена автором на Волгоградском водохранилище в навигационные периоды 1973 и 1974 гг. и дала вполне удовлетворительные результаты. Помимо оценки внутреннего водообмена исследуемого водохранилища в целом дан его расчет и применительно к конкретным морфометрическим участкам. При этом использовано выражение вида

$$D_{\Delta W_{уч}} = \frac{\Delta W_{уч}}{V_{уч}}, \quad (11)$$

где $\Delta W_{уч}$ – изменение объема воды в конкретном участке водоема, $V_{уч}$ – объем участка за расчетный период времени (по автору – за месяц). Используя выражения для оценки интенсивности внутреннего водообмена, автор предлагает зависимости для вычисления расхода воды Q_{Δ} , определяющего внутриводоемные перемещения водных масс, средние скорости их перемещения V_{Δ} и изменения уклона I_{Δ} водной поверхности:

$$Q_{\Delta} = \frac{\Delta W}{\Delta T} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot BL = \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta T}{H} \right) \cdot \frac{V_B}{\Delta T}, \quad (12)$$

$$V_{\Delta} = \frac{\Delta Q}{BH} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{L}{H} = \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta T}{H} \right) \cdot \frac{L}{\Delta T}, \quad (13)$$

$$I_{\Delta} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta T}{L} = \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta T}{H} \right) \cdot \frac{H}{L}, \quad (14)$$

где B – средняя ширина водоема, L – его длина.

Пользуясь приведенными выражениями, можно оценить отношение величины изменения объема за счет внутриводоемных процессов к аккумуляционной составляющей водного баланса.

Согласно структурно-функциональной схеме процессов, протекающих в водных объектах, основными характеристиками водного режима являются три показателя:

- коэффициенты водообмена по притоку в водоем;
- коэффициенты водообмена по стоку из водоема;
- коэффициенты, отражающие транзитное движение водных масс внутри водоема.

В настоящее время при изучении искусственных водоемов используются все эти показатели не только в целом для водоемов, но и применительно к их отдельным морфометрическим участкам. Показатели водообмена по притоку и стоку определяются как отношение объемов притока в водоем и стока из него соответственно к объему водной массы в водоеме. Транзитный водообмен может быть охарактеризован коэффициентом проточности [5], представляющим собой отношение скорости течения воды в водохранилище к скорости течения в реке (на которой создан водоем) в естественных условиях при одном и том же расходе воды; а также коэффициентом водообновления, оцениваемым через гидродинамические и гидрохимические показатели водоема [23,24,25]. Каждый в отдельности коэффициент водообмена по стоку и притоку крупных водохранилищ характеризует только один аспект водообмена в водоеме. В силу этого В.Н.Штефаном [22,23] была сделана попытка определения коэффициента водообмена как отношения полусуммы объемов притока и стока к объему водной массы водохранилища. На наш взгляд, такой подход является во многом механическим, не отражающим динамики водных масс в искусственных водоемах. Балансовый метод, положенный в основу изучения гидрологических процессов на водохранилищах, дает возможность оценить особенности водообмена по соотношению составляющих уравнения водного баланса. Объем водохранилища (или его конкретных участков) в конце любого интервала времени можно определить следующим образом:

$$V_t = V_{t-1} + W_{\text{пр}} - W_{\text{ст}} \pm \Sigma W, \quad (15)$$

где V_{t-1} и V_t – объемы водной массы водоема (или участка) в начальный и конечный моменты времени, $W_{\text{пр}}$ и $W_{\text{ст}}$ – объем притока воды в водоем и стока из него за данный период времени, ΣW – суммарное выражение всех остальных составляющих водного баланса водохранилища. Количество осадков, выпадающих на зеркало искусственных водоемов, почти всегда (или чаще всего) компенсируется величиной испарения с их водной поверхности. Другие же составляющие уравнения водного баланса, входящие в величину (ΣW), слишком малы, и ими можно пренебречь. Таким образом, для крупных долинных водохранилищ величину (ΣW) можно приравнять к нулю.

Если отнести все члены уравнения (15) к начальному объему водной массы (V_{t-1}), т.е.

$$\frac{V_t}{V_{t-1}} = 1 + \frac{1}{V_{t-1}} (W_{\text{пр}} - W_{\text{ст}}) \quad \text{или} \quad (16)$$

$$C = 1 + \left(\frac{W_{\text{пр}}}{V_{t-1}} - \frac{W_{\text{ст}}}{V_{t-1}} \right),$$

то отношение конечного и начального объемов воды, характеризующее в целом водообмен и динамику уровня поверхности, равно единице плюс разность коэффициентов водообмена по притоку и стоку. Таким образом, это отношение объемов учитывает и первый, и второй показатели водообмена. Очевидно, что при равенстве объемов притока и стока соотношение объемов водной массы за расчетный период времени равно единице, т.е. при $W_{\text{пр}} = W_{\text{ст}}$, $C=1$. Это свидетельствует о водообмене при постоянном положении свободной поверхности водоема. Если $W_{\text{пр}} > W_{\text{ст}}$, то $C > 1$, и водообмен происходит при повышении уровня воды, т.е. при наполнении водохранилища. При условии, что $W_{\text{ст}} > W_{\text{пр}}$, то $C < 1$ и водообмен происходит при понижении уровня воды в водоеме, т.е. при его сработке.

Полученный автором совместно с Т.П.Девятковой [6] коэффициент интенсивности изменения объемов водной массы водоема является, таким образом, обобщающим показате-

лем водообмена, отражающим особенности водного баланса, характеризующим наполнение и сработку водоемов, а также стабилизацию уровня воды в них.

Коэффициент интенсивности изменения объемов водной массы водохранилища или его конкретных морфометрических участков $C = \frac{V_t}{V_{t-1}}$ можно рассматривать как показатель,

отражающий специфику внутриводоемных процессов, т.е. как один из подходов к оценке внутреннего водообмена в искусственных водоемах.

Интенсивность внутреннего водообмена может быть оценена по показателям проточности. Ее способы разработаны Н.В. Пикушем [13] и Т.П. Девяtkовой [5]. Первый показатель представляет собой по существу не что иное, как характеристику скоростного режима водоема. Вторым показателем ($K_p = V_b/V_p$) – это отношение скоростей проточного течения (по автору коэффициента) в условиях водохранилища и в условиях реки (на которой создан водоем) при одном и том же расходе воды, т.е. он показывает, насколько скоростной режим в условиях водоема далек или близок к бытовым условиям. Его можно рассматривать как коэффициент транзитного водообмена, т.е. как показатель транзитного движения водных масс внутри водоема. Автором настоящей показатель назван коэффициентом проточности, что, на наш взгляд, не вполне удачно.

Одним из определяющих факторов перемешивания водных масс в водохранилище является степень развития проточных течений. Поэтому целесообразно оценивать интенсивность внутреннего водообмена с помощью метода, основанного на использовании плана проточных течений. План осредненных проточных течений позволяет выявить характер распределения скоростей течения в различных частях водохранилища, в связи с чем он представляет собой достаточно удобный метод оценки процессов обмена вод в искусственных водоемах.

План течений, составляющих поле скоростей потока, строится расчетными способами или с помощью гидравлического моделирования, если отсутствуют натурные материалы. При гидравлическом моделировании искажается вертикальный масштаб модели, иногда не учитывается масштаб шероховатости русла, при этом исследование поля скоростей часто ограничивается изучением поверхностного слоя потока. Поэтому расчетные способы имеют некоторые преимущества. Ведущая роль в построении плана осредненных проточных течений принадлежит методу Н.М.Бернадского [2], однако его использование чрезвычайно затруднено из-за сложности расчетов. Б.В. Проскуряковым [14] был предложен способ, опирающийся на основные положения этого метода, но позволяющий значительно сократить вычисления. Следуя Н.М.Бернадскому, он решает задачу, учитывая продольное и поперечное равновесие струи:

$$\frac{\partial z}{\partial s} = -\frac{V^2}{C^2 H} - \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial s}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{V^2}{g \cdot r}, \quad (18)$$

где z – отметка свободной поверхности потока; s – продольная координата, совпадающая с линией потока; V – средняя по вертикали скорость; C – коэффициент Шези; H – глубина потока в данной точке; g – ускорение силы тяжести; y – криволинейная координата, нормальная линии потока; r – радиус кривизны струи.

Решение и преобразование уравнений (17,18) приводит к дифференцированному уравнению «горизонталей» водной поверхности:

$$\frac{ds}{dy} = \frac{V^2}{g\chi \left(\frac{V^2}{C^2 H} + \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial s} \right)}, \quad (19)$$

$$\frac{ds}{dy} = \frac{1}{\frac{g\chi n^2}{H^{4/3}} + \frac{\chi}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial s}}, \quad (20)$$

где n – коэффициент шероховатости, введенный в уравнение (17) при выражении коэффициента Шези по формуле Маннинга.

Без учета инерционных сил уравнение имеет вид

$$\frac{ds}{dy} = \frac{H^{4/3}}{g\chi n^2}. \quad (21)$$

Задача построения плана течений решается в несколько этапов. На первом этапе пренебрегают условием поперечного равновесия и наличием инерционных сил. Построенный на этом этапе план течений дает возможность определить радиус кривизны струй. На втором этапе определяются положение горизонталей водной поверхности и расстояние между ними; на третьем этапе учитываются изменения этих расстояний по ширине реки и, следовательно, учесть инерционные силы.

Проверка метода Б.В. Проскурякова, выполненная М.И.Баюсовой [1] для Нижней Волги, дала вполне удовлетворительный результат и позволила рекомендовать метод для практических расчетов.

Использование метода Б.В.Проскурякова для построения плана осредненных проточных течений на Камском и Воткинском водохранилищах И.В.Кошмяковым и Т.П.Девятковой [12] предполагало предварительное определение и исследование коэффициентов шероховатости и Шези, а также выявление значений поперечных уклонов и скоростей при поворотах ложа водоемов. Распределение коэффициента шероховатости на участке водоема могло быть получено расчетом по формулам, где используются значения диаметра частиц, или по данным натуральных измерений уклонов, глубины, удельных расходов воды для целого поля точек потока. К сожалению, характер имеющихся натуральных данных не дал возможности им использовать эти способы, поэтому коэффициент шероховатости определялся по формуле

$$n = \frac{J_{\text{общ}}^2 \cdot H_{\text{ср}}^{2/3}}{V_{\text{ср}}}, \quad (22)$$

а скоростной коэффициент C – по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} \cdot H_{\text{ср}}^{1/6}, \quad (23)$$

где $J_{\text{общ}}$ – среднемесячное значение общего уклона участка водоема, вычисляемое по данным уровней воды в граничных створах; $H_{\text{ср}}$ – средняя глубина поперечника; $V_{\text{ср}}$ – среднемесячная скорость проточного течения.

Использование метода Б.В.Проскурякова для построения плана проточных водоемов Камского каскада позволило получить вполне удовлетворительные результаты.

Библиографический список

1. *Баюсова М.И.* Применение метода Б.В.Проскурякова для плана течений на участке Нижней Волги / М.И. Баюсова // Тр. ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Вып.192.

2. *Бернадский Н.М.* Речная гидравлика / Н.М. Бернадский. М.: Госэнергоиздат, 1933.
3. *Буторин Н.В.* Расчет коэффициента турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище / Н.В. Буторин, А.С. Литвинов // Тр. ИБВВ АН СССР. 1968. Вып.16(19). С. 250 – 258.
4. *Верболов В.И.* О коэффициентах горизонтального макротурбулентного обмена в прибрежной зоне Южного Байкала / В.И. Верболов // Тр. Лимнол. ин-та Сиб.отд. АН ССР. 1970. Вып.14(34). С. 122 – 132.
5. *Девяткова Т.П.* Проточность как специфическая черта гидрологического режима водохранилищ / Т.П. Девяткова // Методы изучения расчетов и прогнозов водных и климатических ресурсов. Пермь, 1978. С. 26 – 33.
6. *Девяткова Т.П.* Интенсивность изменения водных масс Камского и Воткинского водохранилищ при их наполнении и сработке / Т.П. Девяткова, А.Б. Китаев // Комплексные экологические исследования водоемов и водотоков бассейна реки Камы. Пермь, 1993. С. 6 – 11.
7. *Знаменский В.А.* Гидравлические сопротивления и турбулентный обмен при взаимодействии транзитного потока с плановыми водоворотами в водоемах / В.А. Знаменский // Тр. ГГИ. 1969. Вып.173. С. 86 – 99.
8. *Знаменский В.А.* К вопросу о процессах внутреннего водообмена и турбулентности на озере Байкал / В.А. Знаменский // Тр. ГГИ. 1973. Вып.203. С. 71 – 79.
9. *Знаменский В.А.* Влияние гидрологических и гидродинамических факторов на изменение концентраций химических веществ в водохранилищах волжского каскада / В.А. Знаменский // Материалы Всесоюз. науч.конф. по проблеме комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна Волги. Пермь, 1975. Вып.2. С. 58 – 62.
10. *Знаменский В.А.* Влияние гидролого-динамических факторов на изменение содержания химических веществ в водохранилище / В.А. Знаменский // Тр. ГГИ. Л.:Гидрометеиздат, 1977. Вып.246. С. 58 – 77.
11. *Знаменский В.А.* Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды /В.А. Знаменский. Л.:Гидрометеиздат, 1981. 247с.
12. *Кошмяков И.В.* О построении плана течений камских водохранилищ / И.В. Кошмяков, Т.П. Девяткова // Закономерности формирования, методы расчетов водных и климатических ресурсов. Пермь, 1982. С. 37 – 47.
13. *Пикуш Н.В.* Расчет водообмена и проточности водоемов / Н.В. Пикуш // Гидробиол.журн. 1972. Т.8, №4. С. 97 – 100.
14. *Проскуряков Б.В.* Расчет скоростного поля планового течения руслового потока /Б.В. Проскуряков // Тр. ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Вып.192.
15. *Сокольников В.М.* Течения в глубинных слоях и водообмен в Байкале / В.М. Сокольников // Тр. Лимнол.ин-та Сиб.отд.АНСССР.1970. Вып.14(34). С. 67 – 74.
16. *Толмазин Л.М.* Статистический анализ течений и параметров горизонтальной турбулентности в Каховском водохранилище / Л.М. Толмазин, В.А. Шнайдман // Метеорология и гидрология. 1972. №4. С. 55 – 60.
17. *Тушинский С.Г.* Исследование горизонтальной турбулентности вод Можайского водохранилища / С.Г. Тушинский. М.:Изд-во МГУ,1977. 14с.
18. *Тушинский С.Г.* Экспериментальное исследование горизонтальной турбулентной диффузии в водоемах для оценки переноса загрязняющих веществ / С.Г. Тушинский // Экспериментальные исследования гидрологических процессов и явлений. М.:Наука,1979. Ч.1. С. 161 – 168.
19. *Фомичев И.Ф.* Многолетние изменения составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища и их влияние на водообмен и уровень / И.Ф. Фомичев, А.С. Литвинов // Водные ресурсы. 1980. №4. С. 108 – 119.
20. *Фомичев И.Ф.* Многолетние изменения элементов гидрологического режима Рыбинского водохранилища и расчет их в связи с территориальным перераспределением стока: Автореф.дис....канд.геогр.наук / И.Ф. Фомичев. Пермь, 1982. 14с.

21. *Ширяк И.М.* Исследование переноса загрязняющих веществ в мелководных и слабопроточных водоемах ветровыми течениями: Автореф.дис....канд.техн.наук / И.М. Ширяк. Л.,1978. 20с.
22. *Штефан В.Н.* К расчету водообмена долинных водохранилищ / В.Н. Штефан // Вестн.Моск.ун-та. Сер. 5. География. 1975. №5. С. 71 – 75.
23. *Штефан В.Н.* Водообновление стока Москворецкой системы / В.Н. Штефан // Там же. 1979. №4. С. 84 – 89.
24. *Штефан В.Н.* Водообмен водохранилищ волжско-камского каскада / В.Н. Штефан // Комплексные исследования водохранилищ. М.:Изд-во МГУ, 1980. Вып.5. С. 46 – 55.
25. *Эдельштейн К.К.* Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища / К.К. Эдельштейн // Тр. ИБВВ АН СССР. Л.:Наука,1968. Вып.18(21). С. 3 – 71.