

Особенности турбулентного обмена вод в Камском и Воткинском водохранилищах и методы его оценки

А.Б.Китаев, Т.П.Девяткова

Пермский государственный университет

В настоящее время принято деление водообмена на внешний и внутренний. **Внешний водообмен** определяется компонентами водного баланса и под ним понимается замена вод, находящихся в водоеме, новыми водами, поступившими извне. При **внутреннем водообмене** происходит перемещение и смешение водных масс в самом водоеме. Он 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).

Между интенсивностью внешнего и внутреннего водообмена водоема имеется тесная взаимосвязь, поскольку обмен вод между районами, участками или слоями водной толщи зависит от горизонтальной составляющей внешнего водообмена, проявляющейся в водоеме в виде стокового течения. С интенсификацией этой составляющей увеличивается внутренний водообмен – проточность и турбулентное перемешивание водной массы. И наоборот, в тех водоемах, где вертикальная составляющая внешнего водообмена превалирует над горизонтальной, роль стокового течения ослабевает, возрастает значение конвекции, интенсивность которой непосредственно связана с вертикальной составляющей внешнего тепло – и водообмена.

Представление об интенсивности внутреннего водообмена, связанного с перемешиванием вод, дают значения коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена (A г/см·с). Для оценки коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена в практике наиболее часто используется подход, предложенный В.А.Знаменским [2].

Коэффициенты турбулентного обмена вод Камского и Воткинского водохранилищ определены по уравнениям, предложенным В.А.Знаменским [3,4], учитывающим морфометрические, гидравлические и энергетические характеристики водоемов (формулы 1-3):

$$A_x = 20,2 \nu \left(\frac{H}{\Delta} \right)^{0,375} \cdot Re^{0,5} = 20,2 \nu \left(\frac{Re}{Fr} \right)^{0,5} \cdot (I \cdot Re)^{0,5}, \quad (1)$$

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

$$A_z = 0,845 \nu \frac{\left(\frac{H}{\Delta} \right)^{1,13}}{Re^{0,5}} = 2,82 \nu \left(\frac{Re}{Fr} \right) \cdot \frac{I^{1,5}}{Fr^{0,5}}, \quad (3)$$

В первом варианте используются: средняя глубина (H), ширина (B), средняя высота выступов шероховатости дна (Δ) и числа Рейнольдса (Re); во втором – числа Рейнольдса и Фруда (Fr), уклон водной поверхности (I), глубина и ширина в створе. Для камских

водохранилищ использовался, в основном, второй вариант в связи с трудностью определения величины (Δ). Расчет выполнен для восьми основных створов Камского и пяти створов Воткинского водохранилищ за характерные по водности годы (табл. 1 – 4). Затруднение вызвало определение уклонов на нижних участках водохранилищ. Средний за расчетный период времени уклон водной поверхности принят равным среднегодовому уклону водохранилища (для Камского – от Пожвы до КамГЭС, для Воткинского – от Оханска до Галево). Полученные результаты показали, что во все периоды преобладает продольный обмен, и лишь в весенний период при наполнении водохранилищ вертикальная и поперечная составляющие могут превосходить по размерам продольную. Однако турбулентный обмен на отдельных участках резко различается, и по характеру пространственного распределения турбулентной активности на Камском водохранилище можно четко выделить три района:

- 1-й – от выклинивания подпора до озеровидного расширения;
- 2-й занимает центральную, широкую часть водоема;
- 3-й простирается от центральной части до плотины Камской ГЭС.

Первый район отличается уменьшением гидродинамической активности к концу участка (см.табл. 1–2). Минимальные значения вертикальной составляющей отмечаются зимой и летом (менее 1 г/см·с). Максимальные величины продольной составляющей имеют место в период зимней сработки водоема и в период его весеннего наполнения (1300 г/см·с). Наибольшая величина поперечного обмена в период наполнения водохранилища – до 2000 г/см·с.

Для второго района характерно возрастание турбулентного обмена во всех направлениях, особенно в поперечном (до 9000 г/см·с), что связано с возникновением активных циркуляционных зон при резком расширении водоема и с поступлением вод значительных притоков (рек Косьвы, Иньвы, Обвы). Продольная составляющая в этом районе незначительна (200-300 г/см·с), что согласуется с минимальными в этом районе скоростями течения, показателями внешнего водообмена и проточности.

В третьем районе (с постоянным подпором) величины коэффициентов турбулентного обмена уменьшаются по сравнению с их величиной в центральной части водоема, но постепенно увеличиваются по длине района к плотине Камской ГЭС: A_x – 150-300 г/см·с, A_y – 100-150 г/см·с, A_z – 0,5-10 г/см·с.

На Воткинском водохранилище выделяются два района:

- верхний – узкий, с более простой морфометрией и с уклоном водной поверхности;
- нижний – несколько расширенный, с заливами и с почти отсутствующим уклоном водной поверхности.

Для первого района (см. табл. 3 ,4) характерно преобладающее значение продольной составляющей турбулентного обмена, постепенно уменьшающейся к концу района. В нижнем отмечено возрастание вертикального и поперечного обмена, усиливающегося к плотине Воткинской ГЭС. Таким образом, распределение продольных коэффициентов турбулентного обмена аналогично распределению показателей внешнего водообмена и проточности [5], что связано с особенностями водного режима и морфометрии районов водохранилищ. Поперечный обмен обусловлен в первую очередь морфометрией водоемов, поэтому более значителен на Камском водохранилище, имеющем более сложную морфометрическую структуру. Вертикальный обмен по величине незначителен. Однако необходимо заметить, что при учете ветра доля вертикального турбулентного обмена должна существенно возрасти.

Для оценки роли ветрового перемешивания рассчитаны коэффициенты турбулентного обмена для безледоставного периода методом С.В.Доброклонского [1]. Его расчетная формула выглядит следующим образом:

$$A_{\tau} = \frac{\pi \chi^2 \rho}{18} \cdot \frac{h^2}{\tau} \cdot e^{-\frac{4\pi z}{h}} \quad (4)$$

где χ – постоянная Кармана, принятая равной 0,4; h – высота волны, τ – период волны, z – глубина водоема, λ – длина волны.

**Коэффициент турбулентного обмена вод (г/см*с) в Камском водохранилище в многоводном году(1965)
по методу В.А. Знаменского с использованием числа Фруда**

Створ	Показатель обмена	М е с я ц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Тюлькино	Az	3,41	10,3	17,7	10,9	0,10	0,15	0,03	0,08	0,04	0,14	0,98	1,37
	Ay	430	1300	2270	1320	11,0	17,0	3,00	8,84	5,00	15,0	105	152
	Ax	484	614	634	852	1105	795	204	336	211	427	713	404
Березники	Az	1,50	3,24	1,24	1,11	0,14	0,41	0,23	0,32	0,22	0,46	2,69	3,44
	Ay	800	300	105	97,0	57,0	233	115	169	115	241	1420	1680
	Ax	193	491	408	533	556	446	150	182	148	242	400	248
Быстрая	Az	0,23	0,47	0,31	0,67	0,02	0,10	0,23	0,07	0,10	0,09	0,16	0,27
	Ay	43,0	78,0	55,0	113,0	9,00	55,0	122,0	39,0	56,0	51,0	87,0	127,0
	Ax	142	173	160	293	331	268	137	109	122	133	140	120
Пожва	Az	0,15	0,10	0,07	0,52	0,03	0,25	0,42	0,18	0,03	0,25	0,42	0,64
	Ay	56,0	35,0	16,0	133	22,0	119	200	85,0	12,0	120	200	326
	Ax	94,0	87,0	102	155	282	370	191	153	171	187	191	160
Чермоз	Az	27,9	6,58	4,86	4,86	0,35	1,99	20,7	20,7	21,9	7,33	20,7	16,9
	Ay	21300	8500	6170	6200	412	2130	22100	22100	22400	7800	22300	18600
	Ax	354	148	122	122	191	268	285	285	285	285	285	271
Слудка	Az	1,59	0,92	0,77	0,28	0,05	0,32	4,23	4,23	4,23	4,23	4,23	3,82
	Ay	1240	850	660	240	36,0	173	2300	2300	2300	2300	2300	2170
	Ax	134	104	89,0	89,0	147	273	255	255	255	255	255	243

Продолжение табл.1

Створ	Показатель обмена	М е с я ц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Добрянка	Az	0,06	0,06	0,07	0,11	0,01	0,05	0,40	0,37	0,40	0,23	0,36	0,38
	Ay	26,0	23,0	15,0	23,0	2,00	13,0	112	102	112	63,0	101	111
	Ax	90,0	63,0	105	100	112	202	205	65,0	205	57,0	194	198
КамГЭС	Az	9,13	1,32	1,17	2,92	0,07	0,21	3,29	2,54	1,93	1,24	2,54	1,88
	Ay	2150	340	316	700	16,0	43,0	651	503	382	246	508	376
	Ax	223	212	186	203	271	353	328	383	279	101	383	275

**Коэффициент турбулентного обмена вод (г/см*с) в Камском водохранилище в маловодном году(1967)
по методу В.А. Знаменского с использованием числа Фруда**

Створ	Показатель обмена	М е с я ц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Тюлькино	Az	1,86	6,35	12,3	2,04	1,21	0,03	0,04	0,02	0,03	0,12	0,09	0,35
	Ay	250	888	1650	227	23,0	4,00	4,00	2,30	3,00	3,16	10,0	43,0
	Ax	339	465	638	1110	761	205	211	177	137	255	285	268
Березники	Az	3,31	9,99	3,23	0,27	0,41	0,22	0,27	0,22	0,17	0,85	0,51	1,30
	Ay	1560	1060	300	138	186	111	135	100	76,0	361	215	531
	Ax	204	569	501	302	420	148	142	135	106	195	219	206
Быстрая	Az	0,18	0,24	0,23	0,01	0,11	0,10	0,10	0,10	0,01	0,16	0,10	0,21
	Ay	58,0	43,0	40,0	1,00	43,0	55,0	55,0	52,0	2,40	61,0	38,0	66,0
	Ax	103	139	145	116	284	108	108	95,0	34,0	136	133	99,0
Пожва	Az	0,14	0,09	0,05	0,01	0,15	0,20	0,30	0,30	0,01	0,18	0,16	0,12
	Ay	99,0	35,0	16,0	0,50	83,0	97,0	142	137	5,20	94,0	80,0	86,0
	Ax	62,0	74,0	79,0	67,0	254	137	152	133	40,0	123	136	63,0
Чермоз	Az	1,13	0,71	0,56	0,07	0,38	1,88	1,88	1,69	1,51	1,52	1,52	1,39
	Ay	1340	902	722	91,0	406	1990	1970	1830	1720	1690	1700	1550
	Ax	74,0	64,0	57,0	67,0	122	95,0	95,0	90,0	86,0	86,0	86,0	82,0
Слудка	Az	0,15	0,12	0,08	0,09	0,07	0,42	0,41	0,39	0,37	0,23	0,23	0,2
	Ay	109	103	74,0	77,0	43,0	232	228	220	217	138	137	127
	Ax	94,0	77,0	32,0	76,0	115	128	126	123	120	116	116	109

Продолжение табл. 2

Створ	Показатель обмена	М е с я ц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Добрянка	Az	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,06	0,02
	Ay	5,00	2,00	3,00	1,00	3,00	11,0	11,0	19,0	19,0	19,0	19,0	8,40
	Ax	43,0	47,0	38,0	36,0	82,0	102	101	110	71,0	70,0	70,0	80,0
КамГЭС	Az	0,16	0,14	0,12	0,04	0,07	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17
	Ay	36,0	34,0	33,0	10,0	14,0	39,0	38,0	38,0	37,0	36,0	35,0	36,0
	Ax	101	96,0	88,0	106	175	167	165	165	162	161	152	160

Коэффициент турбулентного обмена вод (г/см*с) в Воткинском водохранилище в многоводном году(1965) по методу В.А. Знаменского с использованием числа Фруда

Створ	Показатель обмена	М е с я ц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Пермь	Az	0,07	0,03	0,01	0,01	0,18	0,13	0,03	0,03	0,02	0,03	0,05	0,06
	Ay	20,0	9,00	6,00	3,00	41,0	30,0	7,00	9,00	6,00	8,00	13,0	17,0
	Ax	220	133	105	95,0	793	594	158	198	164	193	236	233
Оханск	Az	0,75	1,46	3,03	2,60	0,42	0,55	0,58	0,69	0,51	1,21	1,04	1,12
	Ay	237	288	481	361	97,0	131	133	158	117	241	246	264
	Ax	439	475	618	703	973	835	360	448	383	543	473	473
Жулановка	Az	1,09	0,74	0,41	0,36	0,04	0,10	1,13	0,71	1,14	0,72	0,72	1,02
	Ay	204	151	93,0	82,0	7,00	18,0	207	131	207	130	131	183
	Ax	335	258	209	205	280	365	341	338	343	338	338	369
Калиновка	Az	10,6	10,9	10,1	6,70	0,53	0,97	13,5	10,8	10,7	10,7	10,6	10,5
	Ay	2120	2145	2050	1390	109	195	2680	2150	2150	2150	2140	2160
	Ax	614	553	467	498	529	561	616	620	616	616	614	611
Воткинская ГЭС	Az	6,80	5,70	5,10	9,60	0,82	1,46	14,8	14,5	14,8	13,7	14,5	14,5
	Ay	5020	4500	3390	6710	567	1070	10400	10400	10500	10400	10600	10500
	Ax	560	315	285	264	301	318	327	323	327	315	232	323

Таблица 4

Коэффициент турбулентного обмена вод (г/см³с) в Воткинском водохранилище в маловодном году(1967) по методу В.А. Знаменского с использованием числа Фруда

Створ	Показатель обмена	М е с я ц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Пермь	Az	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04
	Ay	13,0	14,0	6,00	0,40	4,00	6,00	6,00	6,00	4,50	7,00	5,00	12,0
	Ax	163	170	103	170	157	164	164	152	127	141	116	189
Оханск	Az	0,95	2,70	3,42	0,15	0,88	0,59	0,54	0,60	0,49	0,80	0,77	1,54
	Ay	315	525	564	24,0	183	133	122	127	109	181	162	317
	Ax	441	551	625	758	467	381	393	347	327	364	361	543
Жулановка	Az	0,74	0,36	0,36	0,28	0,21	0,49	0,49	0,50	0,60	0,57	0,56	0,44
	Ay	138	71,0	79,0	39,0	41,0	88,0	89,0	88,0	110	109	107	85,0
	Ax	257	234	228	383	251	275	275	275	281	275	271	260
Калиновка	Az	5,24	4,40	4,00	1,40	4,00	5,20	5,30	5,20	5,50	4,40	5,20	4,40
	Ay	1030	859	823	289	823	1050	1050	1060	1050	893	1020	873
	Ax	536	417	400	304	469	536	537	532	547	419	532	417
Воткинская ГЭС	Az	5,50	5,40	5,20	2,10	5,20	5,64	5,60	5,90	5,64	5,64	5,80	5,64
	Ay	3960	3770	3520	1330	3900	4110	4130	4150	4120	3990	3940	3860
	Ax	252	249	246	239	246	319	255	327	255	255	323	255

Расчетами выявлено, что воздействие волнения на водную поверхность исследуемых водоемов распространяется на глубину 4-8 м, а в некоторых случаях – практически до дна, достигая наибольшего развития в центральной части Камского и приплотинной части Воткинского водохранилища (на поверхности соответственно 220 и 280 г/см·с). Следует заметить, что различия в абсолютных величинах коэффициентов вертикального турбулентного обмена, вычисленных методами В.А.Знаменского и С.В.Доброклонского, обусловлены их различной физической сущностью, поэтому их соотношение позволяет оценить роль ветрового перемешивания весьма ориентировочно.

Для более полного и всестороннего анализа процессов водообмена внутри искусственных водоемов следует использовать различные методы в комплексе.

Библиографический список

1. *Доброклонский С.В.* Турбулентная вязкость в поверхностном слое моря и волнение / С.В.Доброклонский // Доклады АН СССР. 1947. Т.5. №7.
2. *Знаменский В.А.* Гидравлические сопротивления и турбулентный обмен при взаимодействии транзитного потока с плановыми водоворотами в водоемах / В.А. Знаменский // Труды ГГИ. 1969. Вып.173. С.86–99.
3. *Знаменский В.А.* Влияние гидролого-динамических факторов на изменение содержания химических веществ в водохранилище / В.А. Знаменский // Там же. 1977. Вып.246. С.58-77.
4. *Знаменский В.А.* Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды / В.А. Знаменский. Л.:Гидрометеиздат, 1981. 247с.
5. *Китаев А.Б.* Роль гидродинамических факторов в формировании гидрохимического режима долинных водохранилищ (на примере Камского каскада): автореф.дис...канд.геогр.наук / А.Б. Китаев. Пермь, 1983. 22с.