ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА «МГНОВЕННОЙ КАРТИНЫ» ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ НИЖНЕГО ДОНА НА ПРИМЕРЕ СУДОХОДНОГО РУСЛА

В.И. Денисов¹, В.В. Латун¹, Ю.Ю.Ткаченко²

¹Институт наук о Земле Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону

²Территориальный центр мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций
природного и техногенного характера, г. Краснодар
denisovgeo@yandex.ru, latun@yandex.ru, yuyut23@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся основные характеристики горизонтальных течений на речном участке Азово-Донского морского канала (АДМК) от Азова до выхода в Таганрогский залив. В результате обработки результатов измерений получены: вертикальные профили скоростей течений на 15 участках судоходного канала; вертикальные поперечные разрезы картины скоростей течений. Измерены характеристики водотоков: ширины, глубины, скоростей, площадей поперечного сечения и расходов воды. Для всех профилей построены графики средних величин скоростей для бровок судоходного канала и его оси. Измерены суммарные расходы воды, которые изменялись в течение двух дней от 770 м³/с до отрицательных величин – –14 м³/с. Уменьшение средней скорости течения при этом составило в 26 раз с 26 до 1 см/с. Площади сечений реки Дон находятся в пределах 828–1722 м². Изменение соотношений расход/площадь имеет тенденцию к уменьшению, что также связано с небольшим нагонным явлением, вызванным ветром южных направлений. Колебания скоростей течений на участках плёсов – перекаатов находятся в пределах 10–20 см/с.

Средние скорости на всех профилях измерений изменялись от 0,17 до 0,6 м/с. Из первичных измерений мгновенных скоростей следует, что диапазон скоростей значительно шире – от 0,01 до 1,5 м/с. На всех поперечных разрезах отмечается ячеистая структура потоков, в которых располагаются зоны струй с максимальными скоростями и участки воды незначительных по скорости движения. На малых горизонтальных и вертикальных участках величиной три – пять метров перепады скоростей течений достигают два и более порядка от единиц до 150 см/с.

При проведении гидрометрических работ использовался новейший акустический доплеровский измеритель параметров водного потока.

Ключевые слова: акустический доплеровский измеритель, скорости течения, вертикальный разрез, ширина, глубина, расход воды, площадь поперечного сечения.

Введение. В гидрологических исследованиях речных систем, морей наименее изученной характеристикой является скорость течений. Связано это с тем, что сам процесс наблюдений длительный, сложный, требующий больших затрат времени и средств. Исходя из общепринятых представлений о течениях в руслах рек [1, 2], известно, что эпюры скоростей течений представляются следующим образом. В вертикальной плоскости от поверхности до дна реки скорость течения убывает нелинейно, по «параболе» с максимальными значениями либо на поверхности воды, либо в подповерхностном слое. Наименьшие значения скоростей наблюдаются в придонном слое, который является слоем трения. В горизонтальной плоскости от берега до берега эпюра течений также графически выражается «параболическим» законом с минимальными значениями у берегов, которые являются естественными участками трения и максимальными величинами в наиболее глубокой части реки, близкой к середине.

Постановка задачи. В летне-осенний период полевых работ на АДМК в области Нижнего Дона

2013 года были проведены подробные исследования скоростей течений, позволившие выявить некоторые их особенности, не зафиксированные ранее. Аппаратура, позволившая предварительно изучить структуру потока, имеет очень малую инерционность (мс), малые масштабы измеряемых величин в трёх проекциях (десятки см), непрерывность измерения от берега до берега за несколько минут (2–5 минут). Данные, полученные в результате новых измерений малоинерционной доплеровской ультразвуковой аппаратурой, позволяют получить ряд гидрологических параметров практически мгновенных величин по сравнению с общепринятыми в гидрологии методами.

Целью статьи является определение основных гидрологических параметров речного потока методом Доплеровского измерителя течений на примере судоходного канала речной части АДМК и анализ полученных результатов.

Материалы и методы исследований. Горизонтальные течения на речном участке АДМК на протяжении 22 км до выхода в Таганрогский залив, были

измерены на 15 профилях (рис. 1) на участке от «0» км до 19 км выше г. Азов в период 17–20 мая 2013 года. Измерения на поперечных профилях выполнялись практически от левого до правого берега реки Дон.

Многоступенчатая математическая обработка результатов измерений позволила получить: вертикальные профили мгновенных скоростей течений на различных участках судоходного канала (на левой и правой бровках и на оси канала); вертикальные поперечные разрезы картины скоростей течений, которые формализованы с помощью программы Surfer 7.0. Кроме этого для всех исследованных профилей были построены графики средних величин скоростей для бровок канала и его оси.

Определение положения характерных точек на местности, отметку номеров станций и профилей, а также отсчёт расстояний выполнялись с помощью GPS навигатора Garmin Etrex. Поперечники и промерные точки наносились на спутниковые снимки в программе Google Earth, что позволило составить общее представление о характере мест-

ности и получить некоторые размерные характеристики.

В процессе гидрометрических работ фиксировалось фактическое состояние гидрографической и гидроморфологической обстановки, производились массовые измерения характеристик водотоков – ширины, глубины, скоростей, площадей поперечного сечения и расходов воды. Средние величины скоростей течений и глубины по бровкам и оси судоходного канала в период наблюдений приводятся в таблице 1.

В работе использовался новейший акустический доплеровский измеритель параметров водного потока – ADP № 602 (Acoustic Doppler Profiler). SonTek/YSI, San Diego, USA, позволяющий сразу получить широчайший спектр гидрометрических характеристик водотока, в частности, распределение скоростей и направлений течений, профиль распределения глубин по маршруту измерения и любому сечению (поверхность-дно) водотока и т.д. Прибор имеет сертификацию РФ.

Таблица 1.

Средние величины глубин и скоростей течений по бровкам и оси АДМК на 15 профилях

№ профиля	Средняя глубина	Левая бровка АДМК (зеленая)		Ось АДМК		Правая бровка АДМК (красная)	
		Глубина	Ср. скорость	Глубина	Ср. скорость	Глубина	Ср. скорость
1	-5,42	-6,08	0,60	-6,88	0,53	-5,54	0,53
2	-5,23	-12,10	0,45	-14,24	0,49	-8,49	0,42
3	-7,34	-11,99	0,49	-12,92	0,55	-11,16	0,36
4	-3,39	-5,25	0,49	-6,23	0,47	-5,21	0,45
5	-3,98	-5,44	0,44	-6,29	0,36	-5,17	0,43
6	-5,42	-6,76	0,30	-7,69	0,37	-5,92	0,38
7	-6,23	-7,41	0,30	-8,60	0,34	-7,84	0,26
8	-2,79	-5,36	0,20	-7,14	0,20	-6,03	0,24
9	-4,63	-7,70	0,18	-11,61	0,28	-8,01	0,19
10	-2,96	-5,89	0,17	-6,18	0,19	-6,00	0,19
11	-6,45	-7,98	0,28	-11,42	0,27	-7,88	0,21
12	-4,78	-6,90	0,24	-7,31	0,23	-6,87	0,23
13	-2,88	-6,06	0,24	-6,29	0,27	-6,08	0,37
14	-3,78	-6,11	0,30	-6,80	0,34	-5,94	0,24
15	-4,06	-5,57	0,27	-5,89	0,31	-5,60	0,26

Основные сводные характеристики, полученные с помощью измерителя течений, представлены в таблице 2. Для иллюстрации приведём графический материал только одного профиля номер 9.

Расходы воды, как и другие характеристики потока были измерены в течение двух дней – 17 и 20 мая

2013 года (таблица 1.). Расход воды на разных профилях реки Дон изменялся в моменты измерений от 770 м³/с до отрицательных величин – –14 м³/с. В период воздействия «низовки» вода поступала из залива в нижнюю часть Дона, формируя длинную нагонную (подпорную) волну, которая повышает уровень воды в реке.

Рис. 1. Схема гидрологических работ в речной части АДМК (судоходном канале р. Дон) и поперечные профили скоростей течений

Рис. 2. Экстремальный профиль глубин на профиле № 9 (левая сторона рисунка – левый берег р. Дон)

Рис. 3. Пространственное распределение скоростей течений на вертикальном разрезе профиля № 9

Таблица 2. Сводные данные о профилях гидрологических работ и некоторых характеристиках потока течения

№ Профиля	Суммарная площадь сечения, м ²	Ср.кв.откл., м ²	Суммарный расход, м ³ /с	Ср.кв.откл., м ³ /с	Расход/площадь, м/с	Ср.кв.откл. Расход/площадь, м/с	Скорость воды, м/с	Ср. кв.откл. Скорости воды, м/с	Скорость потока (течения), м/с	Ср. кв.откл. Скорости потока, м/с	Направление потока, град.	Температура воды, градус С.	Скорость ветра, м/с (Порыв)	Направление ветра, румбы
1	1625,94	8,35	770,297	1,552	0,474	0,003	1,619	0,204	0,506	0,001	163,12	21,96	3–5 (7)	ЮЮВ
2	2124,84	108,35	739,124	12,602	0,348	0,012	1,722	0,045	0,388	0,004	258,52	22,07	3–5 (7)	ЮЮВ
3	1894,08	22,76	719,902	11,556	0,38	0,011	1,671	0,181	0,452	0,007	333,22	21,98	3–5 (7)	Ю
4	1030,82	18,32	368,908	14,757	0,358	0,008	1,871	0,147	0,397	0,017	220,21	22,03	3–5 (7)	Ю
5	1063,73	45,05	361,707	11,787	0,34	0,003	1,73	0,026	0,362	0,003	257,61	22,27	3–5 (7)	Ю
6	1389,03	9,03	363,855	44,017	0,262	0,033	1,595	0,066	0,242	0,047	265,2	22,19	3–5 (6)	Ю
7	1451,2	21,52	333,692	9,309	0,23	0,01	1,809	0,015	0,251	0,02	296,53	22,24	4–6 (8)	Ю
8	1397,79	115,85	138,567	11,536	0,099	0	0,922	0,222	0,124	0,015	294,23	22,39	2–3 (5)	низовка
9	1203,63	0,5	69,667	12,83	0,058	0,011	0,867	0,084	0,087	0,014	250,25	21,97	3–5 (6)	низовка
10	1524,75	175,38	-13,67	21,244	0,009	0,012	0,791	0,107	0,012	0,007	254,6	21,87	3–5 (6)	низовка
11	1031,23	12,97	154,413	2,782	0,15	0,004	1,214	0,189	0,158	0,004	204,39	22,3	3–5 (6)	низовка
12	1394,43	16,58	154,01	4,179	0,11	0,002	1,25	0,109	0,125	0,005	202,96	22,31	3–5 (6)	низовка
13	1722,42	105,51	210,156	37,851	0,122	0,015	1,588	0,073	0,135	0,012	212,6	22,23	2–3 (5)	низовка
14	915,11	27,76	177,789	4,063	0,194	0,01	1,116	0,235	0,244	0,025	271,63	21,71	2–3 (5)	низовка
15	828,4	20,86	198,917	5,45	0,24	0,006	1,076	0,073	0,261	0,007	254,92	21,69	2–3 (5)	низовка

Уменьшение средней скорости течения при этом составило в 26 раз с 26 до 1 см/с. Площади сечений реки Дон находятся в пределах 828–1722 м². Изменение соотношений расход/площадь имеет тенденцию к уменьшению, что также связано с небольшим нагонным явлением, вызванным ветром южных направлений. Колебания скоростей течений на участках плёсов – перекатов находятся в пределах 10–20 см/с.

Средние скорости на всех профилях измерений изменялись от 0,17 до 0,6 м/с. Из первичных измерений мгновенных скоростей следует, что диапазон скоростей значительно шире – от 0,01 до 1,5 м/с.

В период работ на этих нижних профилях наблюдался ветер, дующий с залива – «низовка», который приводит к задержке стока речной воды, уменьшению расхода воды, подъёму уровня и уменьшению скоростей течений. Наиболее высокие скорости течений (средние величины составляли 0,3–0,6 м/с) наблюдались на профилях 1–7, что также в немалой степени связано с ветровой ситуацией. В период проведения работ на этих участках реки наблюдался ветер южных румбов – «верховка», дующий по течению реки, что приводило к увеличению суммарных расходов воды и росту скоростей движения воды.

Рис. 4. График суммарных расходов воды, м³/с на 15 профилях в момент измерений [9]

Выводы:

1. Современный multifunctional доплеровский ультразвуковой измеритель течений ADP № 602 (Acoustic Doppler Profiler). SonTek/YSI, San Diego, USA позволяет зафиксировать сложную, практически мгновенную картину движения воды в русле реки. Причем вероятнее всего, течения можно отнести к турбулентному типу потока, поскольку на малых расстояниях существуют резкие (на два порядка) перепады скоростей потока от 1 см/с до 150 см/с.

2. На поперечных разрезах прослеживается ячеистая структура потока, объяснение которой весьма неоднозначно. Наиболее вероятным объяснением также можно считать не ламинарный, а турбулентный характер потока. 3. Вместе с тем, на каждом профиле наблюдений видны характерные для него особенности: зоны струй с максимальными и минимальными значениями скоростей потоков могут располагаться как в подповерхностном, так и в придонном слоях.

4. На всех разрезах (профилях) можно отметить, что минимальные скорости течений характерны для мелководных участков и придонного

слоя воды толщиной 0,5–1 метр. Данное замечание подтверждает классические представления гидрологов и гидравликов о процессах трения жидкости о стены русла реки. На рисунках вертикальных профилей мгновенных скоростей течений, которые были выполнены для бровок и оси канала на каждом из 15 профилей наблюдений видны диапазоны скоростей течений по слоям и тенденции их изменений от поверхности ко дну. Можно утверждать, что на большей части этих графиков прослеживается тенденция уменьшения скоростей течений, т.е. вид эпюр скоростей при сильном осреднении будет близок к теоретическому.

5. Как правило, ядро струй с наибольшими скоростями течений отмечаются в подповерхностном слое воды и на участках с наибольшими глубинами.

6. Однако на глубоководных профилях 2, 3 и др. хорошо видно, что струи течений со скоростями 50–60 см/с чётко прослеживаются вплоть до дна русла реки. Отбор проб донных осадков показал, что во многих участках дна с большими глубинами наблюдались донные отложения, представляющие собой плотные коренные глины, которые, по-видимому, подвергаются размыву этими при-

жимающимися струями воды с высокими скоростями течений. Наблюдались участки с хорошо перемытым песком и ракушей, что также указывает на высокие скорости течений воды в данных местах русла.

7. Чтобы получить усреднённые характеристики течений необходимы многократные измерения с последующей математической обработкой результатов. Технически и технологически выполнить эти измерения несложно при наличии высокопроизво-

дительных современных приборов и увеличении средств для данных исследований.

8. Важным фактором высокой изменчивости скорости и направления течений в районах перекаатов, мелководий, сужений русла реки является прохождение судов. В период проведения гидрологических работ даже визуально хорошо было видно взмучивание донных осадков с глубин 4–6 метров, особенно при прохождении крупнотоннажных судов с максимальной осадкой.

Список литературы

1. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. Л.: Гидрометеоиздат, Л., 1977. 448 с.
2. Лебявский С. Введение в речную гидравлику (движение наносов и речное русло). Пер. с англ, Гидрометеиздат, Л., 1961. 230 с.

THE SPATIAL STRUCTURE OF THE FLOW OF THE LOWER DON ON THE EXAMPLE OF A NAVIGABLE CANAL

V.I. Denisov¹, V.V. Latun¹, Yu.Yu. Tkachenko²

Abstract. The article presents the main characteristics of horizontal flows on the river section of the Azov-don sea channel from Azov to the exit to the Taganrog Bay. As a result of processing of results of measurements: vertical profiles of the current velocities at 15 sections of the shipping channel; the vertical cross-sectional view of the pattern of the current velocities. The characteristics of watercourses: width, depth, velocities, cross-sectional areas and water flow rates were measured. The graphs of average speed of water in channel edges and its axis were constructed for all the profiles. The total water consumption was measured during two days. The results vary from 770 m³/s to negative value -14 m³/s. The average speed of flow reduced 26 times from 26 to 1 cm/s. Cross-sectional areas of the river Don range from 828 to 1722 m². The proportion change of consumption and sectional area has a decreasing trend connected to a modest surge phenomenon caused by the southern winds. Current speed fluctuates 10–20 cm/s at reach and ripple areas of the river.

Average speed at all profiles of measurements changes from 0,17 to 0,6 m/s. According to primary measurements of instantaneous speed, the range of speed is considerably wider, from 0,01 to 1,5 m/s. At all cross-sectional view there is a cellular structure of flows with stream zones of extreme speed as well as low-speed sections of water. At smaller horizontal and vertical sections 3 to 5 meters, velocity step reaches two and more orders, from a unit to 150 cm/s.

For hydrometric work the latest acoustic Doppler equipment measuring the parameters of water flow – ADP No. 602 (Acoustic Doppler Profiler) was used.

Keywords: acoustic Doppler meter, flow velocity, vertical section, width, depth, water flow, cross-sectional area.

References

1. Bykov V.D., Vasil'ev A.V. *Gidrometriya*. L.: Gidrometeoizdat, L., 1977. 448 s. (In Russian).
2. Lelyavskij S. *Vvedenie v rechnuyu gidravliku (dvizhenie nanosov i rechnoe ruslo)*. Per. s angl, Gidrometeoizdat, L., 1961. 230 s. (In Russian).