

УДК 532.517

А. А. Кузнецов
Ю. Г. Пыркин
Л. В. Соколов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИДОННОГО
ПЛОТНОСТНОГО ПОТОКА В НАТУРНЫХ
УСЛОВИЯХ

Приводятся результаты комплексных исследований придонного плотностного потока в природных условиях. Получены вертикальные профили плотности, мутности, средней скорости, интенсивностей пульсаций двух составляющих скорости течения, а также турбулентного напряжения трения. Делается вывод о сходстве механизмов течения около дна и «жидкой» границы придонного плотностного потока. Сравнение полученных данных с результатами других авторов показывает, что при их качественном сходстве имеются существенные количественные расхождения в значениях основных турбулентных характеристик.

Теория движения стратифицированных по плотности жидкостей в поле силы тяжести — раздел гидродинамики, быстро развивающийся в последнее время. Частным случаем стратифицированных течений являются придонные плотностные потоки, стратификация по плотности которых определяется либо разностью температур между потоком и окружающей водной средой, либо присутствием в потоке твердых взвешенных частиц (в этом случае поток называется суспензионным), либо совместным влиянием этих двух факторов.

Важность экспериментального изучения придонных плотностных потоков обусловливается как необходимостью решения ряда практических задач, связанных, например, с прогнозированием заиливания водохранилищ и каналов, так и недостатком фактических данных, необходимых для построения математических моделей этих потоков.

В настоящее время существует довольно обширная литература, посвященная исследованию придонных плотностных потоков (см. обзорные работы [1 и 2]), однако все еще мало работ, посвященных экспериментальному определению основных осредненных и турбулентных характеристик таких потоков. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию характеристик турбулентности придонного плотностного потока. Наблюдения проводились на водохранилище Нурекской ГЭС, где существует устойчивый придонный плотностный поток [3].

Средняя скорость измерялась вертушкой, снабженной датчиком индукционного типа. Скорость трогания вертушки — 2 см/с. Концентрация взвешенных частиц измерялась фотоэлектрическим прозрачномером [4]. Для измерения температуры среды использовался высокоомный термистр МТ-54. Точность измерения температуры — 0,1°C. Регистрация пульсаций вертикальной и горизонтальной составляющих скорости течения велась V-образным термогидрометром. Возможность использования такого термогидрометра в воде, содержащей мелкие твердые взвешенные частицы, обсуждается в работе [5].

Измерения проводились с понтона, установленного на трех якорях. Глубина водохранилища в точке измерения составляла 45 м. Датчики

средней скорости и пульсаций скорости течения были укреплены на специальной мачте, которая опускалась за борт при помощи кранбалки с лебедкой. Для ориентации датчика пульсаций скорости по направлению течения мачта была снабжена стабилизатором площадью

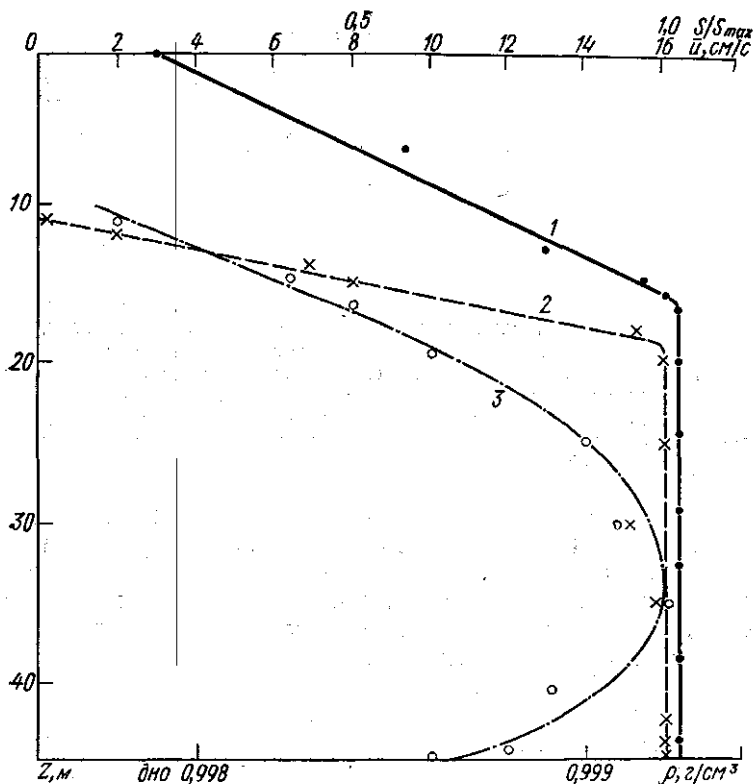


Рис. 1. Распределение плотности (1), мутности (2) и средней скорости (3) по глубине

~1 м². Проведение измерений в штиль, при полном отсутствии ветра и волн, позволило избежать колебаний установки. Прозрачномер опускался отдельно на тросе. Профили (от поверхности до дна) мутности и температуры снимались ежедневно. Время снятия каждого профиля — 5 мин. Записи средней скорости и пульсаций скорости производились в течение 10 мин на каждом из 11 горизонтов (10, 12, 14, 16, 25, 30, 35, 40, 44 и 44,5 м от поверхности). Время снятия вертикального профиля составляло 2 часа.

Полученные осциллограммы пульсаций обрабатывались по методике, описанной в работе [6]. Шаг дискретности при оцифровке данных равнялся $\Delta t = 0,33$ с. Соответствующая частота Найквиста составляет $f_N = 1/2\Delta t \approx 1,5$ Гц. Следовательно, диапазон исследуемых частот был ограничен со стороны высоких частот условием $f \leq 1,5$ Гц. Обработка данных производилась на ЭВМ БЭСМ-4М.

В точке измерения глубина водохранилища составляла 45 м. Будем считать верхней границей потока горизонт 16 м, где резко изменяется закон распределения плотности.

При этом толщина придонного плотностного потока составляла около 35 м; из них 6 м — это слой смешения. Стратификация по плот-

ности определяется в основном ходом температуры. Влияние взвешенных частиц на изменение плотности было на порядок меньше. Профиль плотности представлен на рис. 1. Мутность постоянна от дна до глубины 20 м и затем линейно уменьшается. Один из полученных профилей средней скорости также представлен на рис. 1. Он имеет вид, типичный для придонных плотностных потоков. Скорость растет от нуля на дне до максимума, расположенного на относительной глубине. $z_m/H \approx 0,35$, где $H=29$ м — толщина потока, z_m — расстояние от дна до уровня U_{\max} . Затем скорость уменьшается, составляя на границе со слоем смещения $\bar{U}_{\text{гр}} \approx \frac{1}{2} U_{\max}$. В слое смещения скорость падает до величины ниже скорости трогания вертушки.

Статистическое исследование на стационарность и нормальность пульсаций скорости показало, во-первых, что на ряде записей имеется перемежаемость режимов турбулентности, во-вторых, что имеется нестационарность дисперсии и, в-третьих, что эксцесс почти везде положителен, причем вблизи верхней и нижней границ придонного плотностного потока он имеет наибольшее значение (см. табл. 1).

Таблица 1

$z, \text{ м}$	10	14	16	20	25	30	35	40	44	44,5
Ex_u'	0,1	-0,6	15,7	5,9	1,5	1,2	0,5	6,2	9,4	1,5
Ex_w'	8,7	2,5	1,7	11,8	3,0	3,0	4,8	1,7	8,9	8,0

Отклонение эксцесса от нуля в придонной области руслового потока было отмечено также в [7].

Результаты расчета интенсивностей турбулентности для двух составляющих скорости представлены на рис. 2, а. Вблизи дна и верхней границы придонного плотностного потока их значения имеют хорошо выраженные максимумы. На оси потока наблюдаются минимальные значения $\sqrt{u'^2}$ (1) и $\sqrt{w'^2}$ (2).

Для отфильтровывания низкочастотных составляющих пульсаций использовался фильтр типа «скользящее среднее» [6]. Минимальная частота фильтра $f_{\min}=0,03$ Гц определялась из условия $f_{\min}=10/T$ (где $T=5$ мин — длина реализации, поступающая в обработку).

Полученные в результате такой обработки данные (рис. 2, б) показывают, что вид кривых распределения интенсивностей турбулентности сохраняется, но абсолютные значения уменьшаются более чем в 2 раза. Это свидетельствует о большом влиянии частот $f < f_{\min}$ на значение интенсивности турбулентности.

Было также рассчитано распределение по глубине турбулентного напряжения трения $\tau_{\text{турб}} = -\rho u'w'$. На рис. 3 (кривая 1) представлено распределение $|\tau_{\text{турб}}|$ в зависимости от z . Максимальные абсолютные значения $\tau_{\text{турб}}$ наблюдаются как у дна, так и несколько ниже верхней границы потока. На оси потока наблюдается минимум $\tau_{\text{турб}}$. При применении фильтра «скользящее среднее» вид кривой распределения $|\tau_{\text{турб}}|$ сохраняется (рис. 3, кривая 2), хотя абсолютные значения сильно уменьшаются. Следует отметить, что отношения значений $\tau_{\text{турб}}$, полученных без применения фильтра и с ним, сильно различаются по глубине. Вблизи границ потока, в областях максимальных значений

$\tau_{\text{турб}}$, эти отношения много меньше, чем на оси потока. Так, на глубине 20 м отношение $\frac{\tau_{\text{турб с фильтром}}}{\tau_{\text{турб без фильтра}}}$ составляет 0,07, на глубине 44 м —

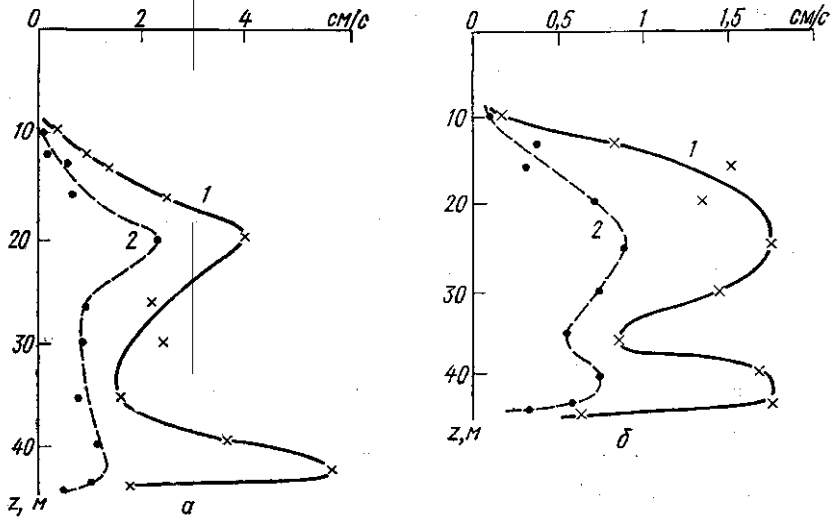


Рис. 2. Распределение интенсивностей продольной ($1 - \sqrt{u'^2}$) и вертикальной ($2 - \sqrt{w'^2}$) составляющих пульсаций скорости по глубине

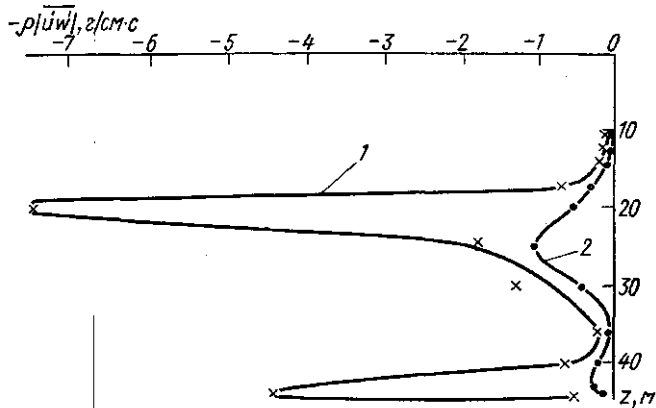


Рис. 3. Распределение напряжения турбулентного трения по глубине

0,03, а на оси потока — 0,5. Это свидетельствует о гораздо большем влиянии низких частот на $\tau_{\text{турб}}$ вблизи границ потока по сравнению с его центром.

Расчет диссипации ($\nu \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2$) и производства ($\overline{u'w'} \frac{d\bar{u}}{dz}$) турбулентной энергии показывает определяющее влияние границ придонного плотностного потока на формирование турбулентной структуры потока в целом. Из сравнения результатов, полученных в нашей работе, с данными Е. П. Анисимовой и А. А. Сперанской [8] (изучавшими подледное течение на о. Байкал) и Б. Георгиева [9] (изучавшего при-

донный поток соленой воды в лабораторных условиях) можно сделать некоторые выводы.

1. Качественно наши данные хорошо согласуются с [8 и 9].

2. Наши расчеты подтверждают заключение указанных авторов о сходстве механизма движения жидкостей у твердой и «жидкой» границ и об «огромном значении пограничных слоев течения в формировании турбулентной структуры потока в целом» [8].

3. Имеется существенное расхождение в количественных оценках турбулентных характеристик. Иллюстрацией этого служит табл. 2, где приведены значения нормированных на максимальную скорость $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{w'^2}$ и $|\tau_{турб}|$ в характерных точках потока.

Таблица 2

		Верхний максимум	Значение на оси потока	Нижний максимум
$\frac{\sqrt{u'^2}}{u_{\max}}$	По данным [8]	0,14	0,04	0,17
	По данным [9]	0,16	0,09	0,18
	Наши измерения	0,26	0,11	0,35
$\frac{\sqrt{w'^2}}{u_{\max}}$	По данным [8]	0,02	0,003	0,05
	По данным [9]	0,11	0,04	0,13
	Наши измерения	0,14	0,06	0,10
$\frac{ \tau_{турб} }{u_{\max}^2}$	По данным [8]	0,0006	0,00006	0,0011
	По данным [9]	0,003	0,0005	0,004
	Наши измерения	0,029	0,0005	0,018

Из таблицы видно, что значение $\frac{\sqrt{u'^2}}{u_{\max}}$ имеет один и тот же порядок у всех авторов; значение $\frac{\sqrt{w'^2}}{u_{\max}}$, по данным [8], на порядок меньше значений этой величины, полученных в [9] и нами; значение $\tau_{турб}^* = \frac{|\tau_{турб}|}{u_{\max}^2}$ на порядок различается у разных авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лонгинов В. В. Очерки литодинамики океана. М., «Наука», 1973.
2. Васильев О. Ф., Квон В. И., Лыткин Ю. М., Розовский И. Л. Стратифицирование течения, т. 8. Гидромеханика. М., 1975.
3. Михайлова Н. А. и др. «Гидротехническое строительство», 1976, № 1.
4. Анучин В. Н., Петров В. П., Пыркин Ю. Г., Самолюбов Б. И., Степунин П. М. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. физ., астрон.», 1975, 16, № 4.
5. Кузнецов А. А. и др. В сб.: О влиянии взвешенных в воде глинистых частиц на работу V-образного термогидрометра. М., 1976.
6. Михайлова Н. А., Харченко И. П. Лабораторные и натурные исследования турбулентности русловых потоков в низкочастотной области спектра. Деп. ВИНТИ, № 13—13—76, 1976.
7. Гринвальд Д. И. Турбулентность русловых потоков. Л., 1974.
8. Анисимова Е. П., Сперанская А. А. Межд. симпозиум по стратифицированным течениям (тезисы докладов). Новосибирск, 1972.
9. Georgiev B. V. Some experimental investigation on turbulent characteristics of stratified flows. Intern. Symp. of stratif. flows. Novosibirsk, 1972.

Поступила в редакцию
1.3 1977 г.

Кафедра физики моря и вод суши