

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 — 1973

УДК 551.551.2 : 551.465.752

Е. П. АНИСИМОВА, А. С. ОРЛОВ, А. А. СПЕРАДСКАЯ

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ ПРИВОДНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА

Приведены результаты натурных исследований и лабораторных экспериментов, посвященных изучению структуры поля скорости над водной поверхностью, покрытой прогрессивными волнами. Приведен вертикальный ход тангенциального напряжения трения в воздухе над взволнованной водной поверхностью. Показана аналогия кинематики воздушного потока в приводном слое в отсутствие внешнего ветрового потока с кинематикой в волне. Измерения характеристик поля скорости выполнены с помощью термоанемометра и методом визуализации с фотосъемкой.

Процесс микровзаимодействия водоема с прилегающими слоями воздуха является важным аспектом взаимодействия атмосферы и водоема в целом.

Закономерности, найденные для пристеночной турбулентности, не могут быть использованы при описании поля скорости слоя воздуха в непосредственной близости от воды, так как воздушный поток над водоемом обладает особенностями, связанными прежде всего с наличием подвижной, легко меняющей свою форму подстилающей поверхности. Важной задачей физики приводного слоя является количественное описание процесса энергообмена между поверхностью водоема и воздушным потоком. Решение этой задачи в свою очередь тесно связано с выяснением специфики вертикального хода тангенциального напряжения в приводном слое.

В ряде работ [1, 2, 3], где исследуется приводный слой при наличии зыби на поверхности воды, упоминается о наблюдающемся отклонении профиля средней скорости ветра от логарифмического закона. В этом случае величина тангенциального напряжения $\tau = -\rho u'w'$ не должна быть постоянной по вертикали.

В данной работе вертикальный профиль тангенциального напряжения измерялся прямым инструментальным методом в приводном слое озера Севан. В качестве измерительной аппаратуры использовался термоанемометр, постоянная времени которого позволяла регистрировать пульсации скорости ветра с частотами до 12 *гц*. Измерения проводились на горизонтах 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125 и 150 *см*. За нулевой горизонт принимали уровень гребня волн с наибольшей амплитудой. Одновременно с помощью контактных анемометров велись наблюдения за средней скоростью ветра на высотах от 0,5 до 12 *м*. Измерения

проводились в условиях небольших средних скоростей ветра (до 3 м/сек). Во время измерений на поверхности озера наблюдалась зыбь, покрытая рябью, вызванной местным ветром.

Начиная с горизонта 0,5 м и выше вертикальный профиль средней скорости ветра удовлетворял логарифмическому закону (стратификация плотности в атмосфере была близка к безразличной). Ниже 0,5 м измерение средней скорости ветра не производилось.

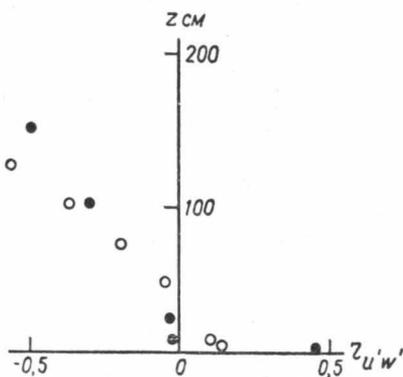


Рис. 1

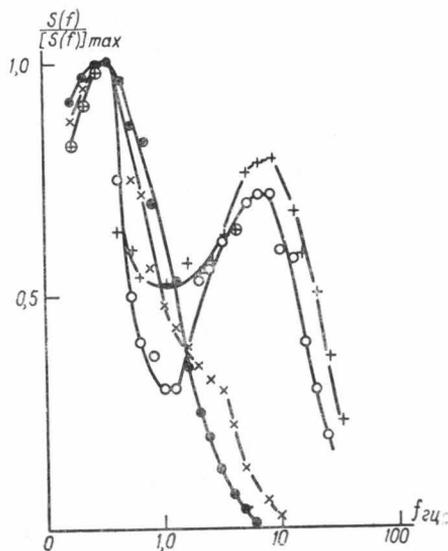


Рис. 2

Измерения показали, что вблизи воды турбулентный поток количества движения $\tau_{\text{турб}}$ был направлен от воды к воздуху. На некоторой высоте $\tau_{\text{турб}}$ переходил через нуль и менял знак, затем наблюдалось возрастание величины потока количества движения. Значения турбулентных потоков количества движения, определенные по пульсациям скорости на горизонтах 125 и 150 см, имели тот же порядок, что и значения τ , рассчитанные по логарифмическим профилям средней скорости. Таким образом, измерения, проведенные на Севане, охватывали диапазон пульсаций скорости ветра, существенный для турбулентного трения. На рис. 1 приведены коэффициенты корреляции между продольной и вертикальной составляющими пульсаций скорости воздушного потока для двух серий измерений. Положительное значение коэффициента корреляции $r_{u'w'} = \frac{\overline{u'w'}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \sqrt{\overline{w'^2}}}$ в непосредственной близости

от водной поверхности выражено достаточно четко. При большей средней скорости ветра величина $r_{u'w'}$ переходит через нуль на более высоком горизонте. По-видимому, высота, на которой $\tau_{\text{турб}}$ равно нулю, определяется соотношением между характеристиками волнения и поля скорости над водоемом.

Своеобразный вертикальный ход тангенциального напряжения, полученный при наличии зыби на поверхности озера, обусловливается специфическими особенностями воздушного потока в этом случае. В условиях слабого ветра над зыбью энергия волновых возмущений, по-видимому, способна частично переходить в энергию среднего движе-

ния воздуха. При этом над зыбью может наблюдаться слой «ускоренного переноса» [1, 4]. Как уже упоминалось, в период измерений на озере Севан нам не удалось наблюдать отклонения вертикального профиля средней скорости ветра в приводном слое от логарифмического закона. По всей видимости, слой «ускоренного переноса» в данном случае находился ниже 0,5 м.

Измерения, проведенные в приводном слое озера, позволили рассчитать спектральные функции продольной составляющей пульсаций скорости ветра на различных горизонтах. Примеры полученных спектральных функций приведены на рис. 2. На графиках прослеживается влияние волн — спектральные кривые имеют два максимума: на частоте зыби (0,34 гц) и на частоте ветровой волны (слабая рябь ~ 8 гц). С удалением от воды максимум, соответствующий частоте ветровой волны, убывает, и на горизонте 100 см уже не прослеживается. Максимум же, соответствующий частоте зыби, сохраняется на всех четырех горизонтах.

В процессе изучения на экспериментальной установке динамического взаимодействия воздушного потока с водной поверхностью, покрытой ветровыми волнами, проводились измерения средней величины и пульсаций скорости ветра на различных горизонтах и элементов волн на поверхности воды [5]. Продольная и вертикальная составляющие пульсаций скорости ветра исследовались в диапазоне частот наблюдавшихся ветровых волн, так как именно на этих частотах скорее всего должно проявиться влияние волн на структуру приводного слоя.

Над ветровыми волнами профиль средней скорости ветра удовлетворял логарифмическому закону вплоть до вершин волны (рис. 3). Результаты расчетов показали, что на кривой спектральной плотности пульсаций скорости воздушного потока наблюдается максимум на частоте, соответствующей частоте максимума в спектре волнения [6]. При этом относительная доля энергии, приходящаяся на частоты, совпадающие с частотой преобладающего волнения, убывает с удалением от подстилающей поверхности.

По полученным в эксперименте материалам был рассчитан коэффициент корреляции вертикальной и продольной составляющих пульсаций скорости ветра $r_{u'w'}$. Коэффициент $r_{u'w'}$ монотонно изменяется с высотой. Следовательно, и поток количества движения, определяемый пульсациями скорости исследованных частот, будет непостоянен по высоте.

Полученное в эксперименте над ветровыми волнами сочетание логарифмического профиля средней скорости с непостоянным значением тангенциального напряжения по вертикали является парадоксальным результатом. Этот факт можно, по-видимому, объяснить следующим образом. Логарифмический профиль средней скорости ветра, полученный в эксперименте, формируется под воздействием турбулентных вихрей всех имеющихся в данном потоке масштабов. В то же время для исследования влияния волнения на структуру приводного слоя воздуха наблюдения за пульсациями скорости проводились в ограниченном интервале частот. Таким образом, было измерено не суммарное напряжение трения, а лишь часть его, определяемая колебаниями скорости исследованного диапазона частот. Поле скорости воздушного потока в непосредственной близости от взволнованной поверхности воды обладает, по-видимому, характерными чертами, присущими полю скорости в море в слое ветрового волнения [7]. Вблизи границы раздела вода — воздух в диапазоне частот, соответствующем ветровому волнению, поток количества движения направлен от воды к

воздуху, т. е. преобладает напряжение трения, возникающее в результате возмущения воздушного потока волновым движением на поверхности воды. С удалением от водной поверхности тангенциальное напряжение, индуцированное волновым движением, убывает.

Баланс тангенциального напряжения в воздухе над ветровой волной, когда профиль ветра удовлетворяет логарифмическому закону, может быть представлен в виде [8]:

$$\tau_w + \tau_{\text{турб}} + \tau_v = \tau = \text{const}, \quad (1)$$

где τ_w — тангенциальное напряжение, индуцированное волнами, $\tau_{\text{турб}}$ — турбулентное трение, τ_v — вязкое напряжение, τ — суммарное танген-

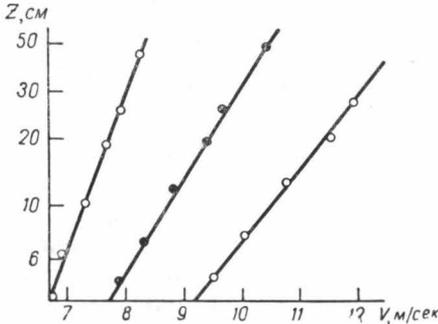


Рис. 3

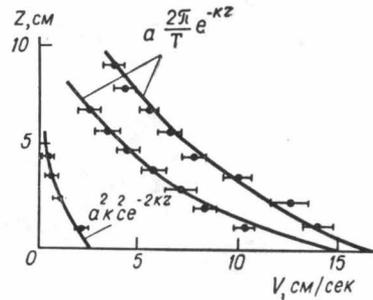


Рис. 4

циальное напряжение. Величина τ_v играет существенную роль лишь в тонком слое у поверхности воды (порядка 1 мм [9]), который в нашем случае не исследовался. Тогда можно считать

$$\tau_w + \tau_{\text{турб}} = \tau = \text{const}^1. \quad (2)$$

Тангенциальное напряжение, индуцированное волновыми возмущениями, убывает по абсолютной величине с удалением от поверхности раздела вода — воздух и знак τ_w , как это следует из результатов эксперимента, противоположен знаку $\tau_{\text{турб}}$. Таким образом, если выполняется условие (2), над ветровыми волнами величина $\tau_{\text{турб}}$ должна расти по направлению к поверхности воды.

Приведенные выше данные свидетельствуют о большой сложности динамических процессов, протекающих в приводном слое воздуха. Представляется необходимым исследование особенностей взаимодействия воздушного потока со взволнованной водной поверхностью в наиболее простых условиях.

Для изучения механизма движения частиц воздуха над взволнованной водной поверхностью в отсутствие внешнего ветрового потока были поставлены лабораторные эксперименты в малом аэрогидроканале, где волна создавалась волнопродуктором и была близка к синусоидальной. Параметры волн измерялись струнным волнографом [5].

Поле скорости в воздухе над волнами первоначально исследовалось с помощью термоанемометра, датчик которого устанавливался на координатнике и мог перемещаться в вертикальном направлении. Сиг-

¹ Поскольку логарифмический профиль является достаточно грубой и малочувствительной характеристикой потока, он может иметь место и в том случае, когда соотношение (2) выполняется лишь приближенно.

нал с термоанемометра, записанный на ленту осциллографа, представлял собой некоторое среднее отклонение, на которое накладывались колебания. Значения скорости, соответствующие величине среднего сигнала с термоанемометра, полученные на разных горизонтах, совпали с величинами модуля орбитальной скорости, рассчитанными по формуле

$$V = a \frac{2\pi}{T} e^{-kz}, \quad (3)$$

где a — амплитуда волны, T — период волны, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число, z — уровень измерений, отсчитанный от невозмущенной поверхности воды.

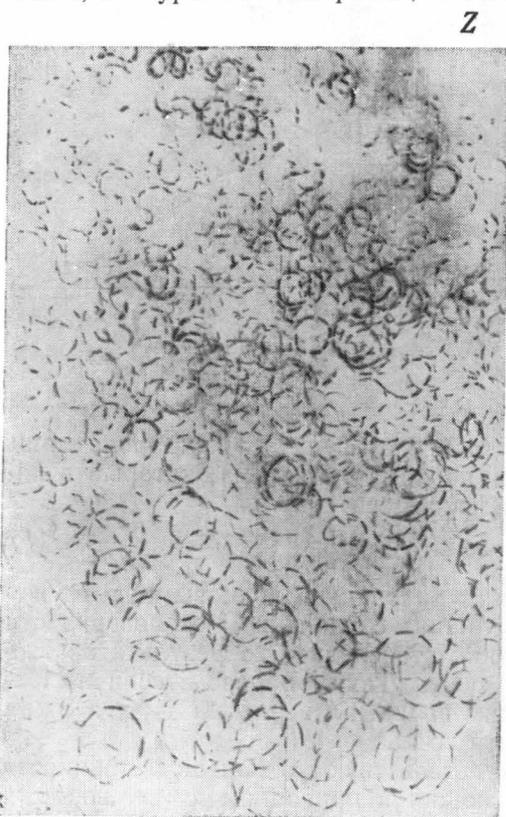


Рис. 5

Результаты измерений и расчета для двух режимов волнения представлены на рис. 4.

Колебаний показаний термоанемометра около некоторого среднего значения могут определяться, с одной стороны, тем, что датчик установлен неподвижно относительно лотка и, следовательно, расстояние между датчиком и поверхностью воды меняется с периодом волны. С другой стороны, колебания показаний термоанемометра могут быть вызваны наличием горизонтального переноса волнового происхождения. Обработка осциллографных лент показала, что величина скорости, соответствующая отклонениям показаний термоанемометра от среднего значения, на порядок меньше значения модуля орбитальной скорости на том же горизонте. Таким образом, если в приводном слое в отсутствие внешнего ветрового потока существует поступательный перенос, вызываемый наличием бегущих волн на поверхности воды, то скорость его должна быть во всяком случае на порядок меньше скорости орбитального движения.

Для решения вопроса о существовании и величине горизонтального переноса в воздухе над прогрессивными волнами был применен метод визуализации движения воздушного потока с фотосъемкой, который позволил получить траектории движения частиц в приводном слое воздуха. В качестве пассивного индикатора использовалась алюминиевая пыль, диаметры частиц которой не превышали 10 мкм.

По полученным снимкам траекторий частиц алюминиевой пыли был определен характер движения в воздухе над бегущей волной в отсутствие внешнего ветрового потока и рассчитан вертикальный про-

филь модуля скорости этого движения. Движение над взволнованной поверхностью воды носит потенциальный характер, траектории частиц имеют вид кривых, близких к циклоидам, радиусы которых убывают с высотой по экспоненциальному закону (рис. 5). Абсолютные значения модуля скорости движения частиц воздуха, полученные с помощью фотосъемки, хорошо согласуются с рассчитанными по формуле (3) значениями модуля орбитальной скорости.

Из рассмотрения траекторий движения частиц в приводном слое следует, что на орбитальное движение накладывается горизонтальный перенос, величина которого также убывает с высотой. Полученные фотографии позволили определить величину поступательного переноса на различных расстояниях от невозмущенной поверхности воды. На рис. 4 представлен профиль скорости горизонтального переноса для одного из режимов волнения. Там же сплошной кривой приведен профиль скорости Стокса, рассчитанный по формуле

$$V_{\text{ст}} = a^2 k^2 c e^{2kz}, \quad (4)$$

где c — фазовая скорость волны. Непосредственно измеренные значения переносной скорости удовлетворительно согласуются с расчетными значениями, полученными по формуле (4).

Приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что движение частиц воздуха над синусоидальными волнами в отсутствие внешнего ветрового потока может быть описано уравнениями вида

$$\xi = a e^{-kz} \sin \frac{2\pi}{T} t + a^2 k^2 c t e^{-2kz}, \quad (5)$$

$$\eta = a e^{-kz} \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

где t — время.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Вертикальный профиль тангенциального напряжения, измеренный в приводном слое над зыбью, свидетельствует об отклонении профиля средней скорости ветра от логарифмического закона в слое, непосредственно примыкающем к водной поверхности, которое подтверждается рядом исследований [1, 7, 8].

Тангенциальное напряжение, возникающее в результате существования волновых возмущений в приводном слое воздуха (τ_w), направлено от воды в воздух и убывает с удалением от водной поверхности.

Применение метода термоанемометрии и метода визуализации с фотосъемкой позволило показать, что над прогрессивными волнами, распространяющимися по поверхности жидкости, в отсутствие внешнего ветрового потока имеет место орбитальное движение частиц воздуха, подобное движению частиц воды в волне. Над подошвой волны на поверхности воды располагается вершина волны в воздухе. Помимо орбитального движения в приводном слое над зыбью существует поступательный перенос частиц воздуха, величина которого в пределах точности эксперимента удовлетворительно согласуется с расчетом, проведенным по формуле для «волнового течения» Стокса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В. В., Сизов А. А., Христофоров Г. Н. Некоторые результаты исследования структуры пограничных слоев атмосферы и океана. В сб.: «Проблемы Мирового океана». Изд-во МГУ, 1970.

2. Науменко М. Ф., Сизов А. А., Чиграков К. И. и др. Исследования в Атлантическом океане «Экспресс-информация», № 1, 1965.
3. Сизов А. А. Экспериментальное исследование структуры воздушного потока в подслое волнового взаимодействия. Диссертация, 1970.
4. Ефимов В. В. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 6, № 10, 1970.
5. Кононкова Г. Е., Никитина Е. А., Поборчая Л. В., Сперанская А. А. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 5, № 5, 1969.
6. Кононкова Г. Е., Никитина Е. А., Поборчая Л. В., Сперанская А. А. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 7, № 1, 1971.
7. Ефимов В. В., Христофоров Г. Н. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 5, № 10, 1969.
8. Филлипс О. Динамика верхнего слоя океана. М., «Мир», 1970.
9. Китайгородский С. А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л., Гидрометиздат, 1970.

Поступила в редакцию
3.8 1971 г.

Кафедра
физики моря