

## ГЕОФИЗИКА

УДК 551.465.552

## О ВИХРЕ-ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЕ ПЛОТНОСТНОГО ПОТОКА

Б. И. Самолюбов, В. В. Кременецкий

(кафедра физики моря и вод суши)

Анализируются преобразования структуры придонного плотностного течения под влиянием вихре-волновых процессов. Выделяются квазистационарная, волновая и вихревая компоненты профиля скорости. Получено дисперсионное соотношение для внутренней волны в течении, стратифицированном взвесью. Выявлены возмущения скорости вихревой природы. Разработана и проверена по данным натурных измерений методика аналитического описания профиля скорости течения с учетом влияния на него вихре-волновых процессов.

## 1. Введение

Вихре-волновые процессы в придонных плотностных потоках развиваются при взаимодействии осредненного течения, внутренних волн и турбулентных вихреобразований. Такие процессы приводят к увеличению транспортирующей, эрозионной способности и дальности действия течений, загрязнению гидросферы и разрушению подводных сооружений. На профилях скорости  $U$  появляются серии возмущений в виде мигрирующих максимумов и областей локальной стабилизации (рис. 1).

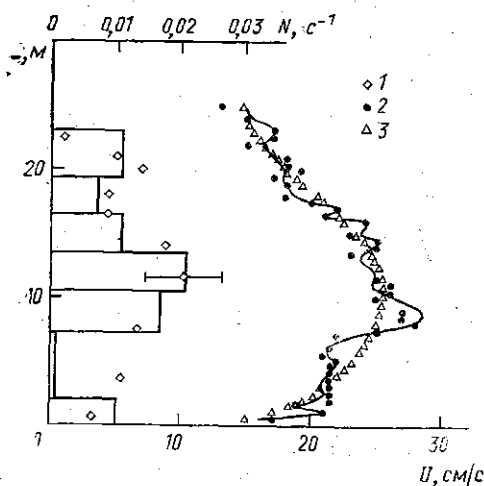


Рис. 1. Вертикальные распределения частоты Вайселя—Брента  $N$ , рассчитанной по профилю плотности жидкости (гистограмма) и теоретической, найденной по дисперсионному соотношению (4) (значки 1), скорости течения  $U$  по данным измерений (2) и по СГО-модели  $U^0$  (3). Кривая  $U(z)$  — теоретическая с учетом вихре-волновых процессов

В работах [1, 2] выявлена эволюция этих возмущений при развитии внутренней волны на фоне квазистационарного течения с профилем скорости типа  $U^0$  на рис. 1. Цель данной работы — анализ зарегистрированных вихре-волновых процессов и разработка методов их описания.

Анализ отмеченных преобразований структуры течения включает их сравнение с суперпозицией элементарных волн (мод), распространяющихся вдоль по придонному потоку, а по нормали ко дну — стоячих, подобно внутренним волнам между двумя отражающими поверхностями [3]. При этом волновые

флуктуации скорости выражаются для плоского случая в простейшем виде \*):

\*): Это действительная функция, полученная суммированием обычных комплексно-сопряженных решений волнового уравнения.

$$\tilde{U} = \sum_{n=1}^{\bar{n}} (A_d)_n \sin [nk_z z - k_x(x - c_f t)], \quad (1)$$

где  $n=1, \dots, \bar{n}$  — номер моды,  $(A_d)_n$  — амплитуда флуктуаций,  $z$  — высота над уровнем дна,  $x$  — расстояние вдоль по потоку от зоны формирования течения,  $k_x$  и  $k_z$  — проекции волнового числа на оси  $x$  и  $z$ ,  $c_f$  — фазовая скорость. В течении с вынужденной внутренней волной значение  $k_x$  определяется условиями ее генерации (см. разд. 2), а  $k_z = k_z(N, U)$ , где  $N$  — частота Вайсяля—Брента. Располагая профилем возмущений  $U_d = U - U^0$  (рис. 2), можно, аппроксимируя его функцией

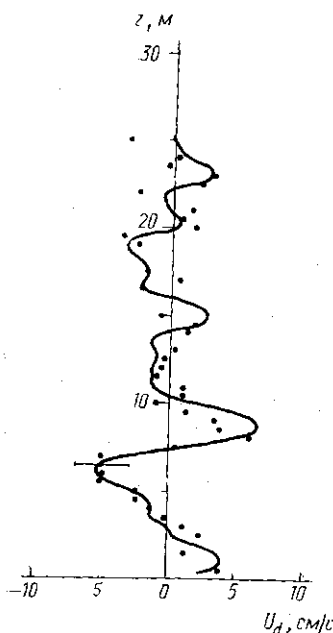


Рис. 2. Профиль возмущений скорости  $U_d = U - U^0$  (точки). Сплошной линией показана теоретическая кривая для волновой компоненты возмущений (1), рассчитанная по двум модам внутренней волны

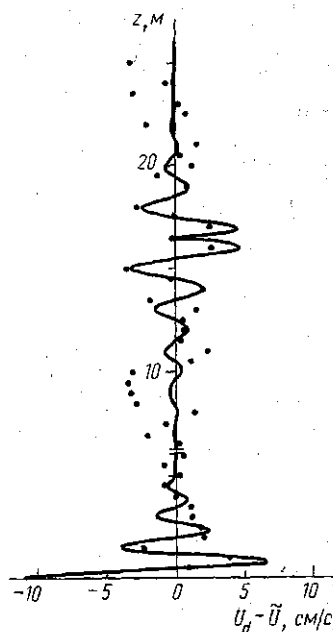


Рис. 3. Отклонения возмущений скорости от волновых флуктуаций скорости  $U_d - \tilde{U}$  (точки) и теоретические кривые для вихревой компоненты возмущений

(1), найти параметры  $(A_d)_n$ ,  $\varphi = k_x(x - c_f t)$ ,  $k_z$  и провести анализ их связей с характеристиками течения. В следующих ниже разделах после выделения волновой компоненты  $\tilde{U}$  (кривая на рис. 2) рассматриваются отклонения от нее  $U_d - \tilde{U}$  (рис. 3), связанные с другими механизмами энерго-массообмена.

## 2. Анализ результатов измерений

На рис. 1 показаны профили  $N$ ,  $U$ , полученные на Нурекском водохранилище при исследовании придонного плотностного потока, стратифицированного взвесью [1, 2, 4]. Толщина течения  $z_u = 15-30$  м, а длина 10–30 км. Средний уклон дна  $4 \cdot 10^{-3}$  на глубинах до 100 м. Средние по высоте  $z_u$  значения скорости течения  $\bar{U}$  и концентрации

взвеси  $\bar{S}$  не превышают 50 см/с и  $5 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> соответственно. Разности плотностей и температур воды  $T$  в потоке и над ним составляют  $(1-30) \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> и  $1 \div -6^\circ\text{C}$ . Размеры взвешенных частиц до 70 мкм. Внутренняя волна с периодом 2 ч ( $\pm 40\%$ ) вызвана флуктуациями расхода воды в зоне формирования течения. На разрезах и суточных станциях применялась градиентная и зондирующая аппаратура с точностями измерений: 3% для  $U=10-70$  см/с;  $0,02^\circ\text{C}$  для  $T$ ;  $(2 \div 5) \times 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup> и  $(0,5 \div 10) \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>3</sup> при  $S=(1 \div 500) \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>3</sup> для прямого и нефелометрического определения  $S$ . В 20-метровом слое длительность  $S$ ,  $T$ ,  $U$ -зондирования 12 мин при шаге 0,5 м.

На рис. 2 показаны эпюра возмущений  $U_d = U - U^0$  (точки) и ее аппроксимация волновой функцией. Профиль  $U^0$  (рис. 1) найден теоретически по модели из [5] в приближении стационарного горизонтально-однородного (СГО) течения. По оценкам, СГО-приближения справедливы в данном потоке на интервалах длины и времени 100 м и 13 мин соответственно [5].

По аппроксимации эпюры  $U_d(z)$  волновой функцией (1)  $\bar{U}$  при  $\tilde{n}=2$  и  $(A_d)_n = (A_d)_1/n$  (рис. 2) получены значения  $(A_d)_1$ ,  $\Phi$  и  $k_z$  и найдены их параметризации:

$$(A_d)_1 = 2,4\pi U/k_z z_u, \quad (2)$$

$$\Phi = (z_u/6\pi) (k_z)_a [(U - U^0)/\bar{U}], \quad (3)$$

$$k_z = 6,6N/[U - U^0(z_u)]. \quad (4)$$

В выражениях (2), (3), (4) значения  $U$  осреднены по интервалам  $\Delta z$ , идентичным шагу определения  $N$  (см. рис. 1). В (3)  $U^0$  — величина  $U$  на краях области существования волны, где  $\Phi=0$ , т. е. у дна ( $z \approx 0,05 z_u$ ) и на верхней границе слоя смещения ( $z \approx 0,9 z_u$ ). В первом случае  $(k_z)_a$  в (3) равно  $k_z$ , среднему в придонной области ( $z < z_m$ ), а во втором — в слое смещения ( $z_m \div z_u$ ) \*).

Аналогичный (4) вид дисперсионного соотношения в форме  $k_z \approx N(U - c_f)^{-1}(1 - 1/4 Ri)^{1/4}$  ( $Ri$  — число Ричардсона) найден в (3) для внутренней волны в окрестности критического слоя, где  $U \approx c_f$ . Согласно [3], уровень  $z$ , на котором  $U = c_f$ , соответствует границе волнового канала. По аналогии в (4)  $U^0(z_u) = c_f$ .

Среднеквадратичное отклонение значений  $N$ , оцененных по (4) с  $k_z$  из (1) при известных величинах  $U$  и  $U^0$ , от гистограммы на рис. 1 равно 25%.

Профиль возмущений  $U_d - \bar{U}$ , которые присутствуют в потоке наряду с волновыми, приведен на рис. 3 (точки). На профиле ярко выражены колебания с максимальными амплитудами в сдвиговых слоях у дна и в центре слоя смещения, затухающие по мере удаления от этих зон. Качественно такие флуктуации могут быть описаны как вихревые возмущения  $U_r$  (рис. 3), которые генерируются за счет сдвиговой неустойчивости в пограничном слое [6]:  $U_r = A_r \exp\{-k_e[z - z_e]\} \times \times \cos(k_r z + \varphi_r)$ , где  $A_r$ ,  $k_r$ ,  $\varphi_r$  — амплитуда при  $z = z_e$ , волновое число и фаза,  $k_e$  — коэффициент затухания, а  $z_e$  — уровень максимума амплитуды возмущений.

Параметры кривых  $U_r(z)$  на рис. 3 следующие:  $A_r = (3-5)$  см/с =  $= (3-5) U_r(z_e)$ ,  $k_r = (4 \pm 0,2) \text{ м}^{-1}$ ,  $k_e = (0,4-0,7) \text{ м}^{-1}$ . В придонном слое  $z_e = 0$  и  $U_r(z_e) = U_*$ . Здесь  $U_r$  — сдвиговая скорость, а  $U_*$  — динамичес-

\* Здесь  $z_m$  — ордината максимума на профиле скорости  $U^0$  на рис. 1.

кая. В слое смешения, где  $z_e=0,5$  ( $z_m+z_u$ )=16,5 м,  $\varphi_r=0$  при  $z < z_e$  и  $\varphi_r=\pi$  при  $z > z_e$ , что характерно для «двойного биения» в окрестности уровня  $z_e$  за счет поворота вихревой полосы [6].

Сравнение кривой  $U=U^o+U+U_r$  (рис. 1) с данными измерений свидетельствует об эффективности предлагаемой методики и целесообразности ее дальнейшей разработки для описания нестационарного плотностного потока.

### 3. Основные результаты

Выполнен анализ вертикальной структуры поля скорости плотностного потока. Выявлены квазистационарная, волновая и вихревая компоненты скорости.

Разработаны параметризации (2), (3) для расчета амплитуды и фазы волновой составляющей скорости.

Получено дисперсионное соотношение (4) для внутренней волны в плотностном потоке. Установлено, что вертикальная составляющая волнового числа пропорциональна отношению частоты Вайсяля—Брента к сдвигу средней скорости течения.

Обнаружены возмущения скорости вихревой природы у дна и в слое смешения, затухающие с удалением от этих зон. Профили возмущений согласуются с теоретическими для завихренности, генерируемой в неустойчивом сдвиговом слое. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 96-05-65856, 96-05-79081, 96-01-01118).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Самолюбов Б. И., Быстрова Н. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. № 1. С. 79 (Moscow University Phys. Bull. 1994. N 1. P. 77).
2. Самолюбов Б. И., Слуев М. В., Кременецкий В. В., Бейерле В. В. // Тез. докл. Междунар. конф. «Физические процессы на шельфе океана». Светлогорск, 1966. С. 69.
3. Монин А. С. Теоретические основы геофизической гидродинамики. Л., 1988.
4. Пыркин Ю. Г., Самолюбов Б. И. // Гидротехн. строительство. 1988. № 4. С. 48.
5. Самолюбов Б. И., Слуев М. В. // Метеорология и гидрология. 1996. № 1. С. 94.
6. Бетчов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. М., 1971.

Поступила в редакцию  
21.06.96