

чае 2 горизонтальная скорость течения на границе между ячейками становится равной нулю и при переходе через границу меняет знак (в случае 1 она максимальна на границе между ячейками).

Полученные данные объясняют причину, по которой в экспериментах всегда наблюдаются вторичные ячейки со вторым типом циркуляции. Как следует из (5), (6), образование вторичных ячеек, как правило, начинается у горизонтальных стенок бассейна. Поэтому граничные условия на них являются одним из факторов, оказывающих влияние на форму развивающихся возмущений. Возмущения, возникающие вблизи каждой из горизонтальных поверхностей в бассейне, должны удовлетворять четырем условиям для горизонтальной и вертикальной компонент скорости, температуры и солености. В частности, почти во всех проведенных экспериментах дно и верхняя крышка бассейна были теплоизолированы и на них выполнялись условия прилипания и непротекания для скорости и отсутствия потока соли. Этим условиям удовлетворяют только решения типа 2. Решение же типа 1 может быть реализовано, вероятно, лишь в идеализированных условиях бесконечных вертикальных щелей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Stommel H., Fedorov K. N. *Tellus*, 1967, 19, N 2, p. 306. [2] Pingree R. D. *Deep-Sea Res.*, 1971, 18, N 4, p. 841. [3] Корчашкин Н. Н., Лозовацкий И. Д. *Океанология*, 1983, 23, № 3, с. 367. [4] Huppert H. E., Turner J. S. J. *Fluid Mech.*, 1980, 100, N 2, p. 279. [5] Thorpe R. A. et al. *Ibid.*, 1969, 38, N 2, p. 375. [6] Некрасов В. Н. и др. *Изв. АН СССР. ФАО*, 1976, 12, № 3, с. 57. [7] Wirtz R. A. et al. *Geophys. Fluid Dyn.*, 1972, N 3, p. 265. [8] Hart J. E. J. *Fluid Mech.*, 1971, 49, N 2, p. 279. [9] Блинков В. М., Гусев А. М. *Изв. АН СССР. ФАО*, 1979, 15, № 3, с. 15. [10] Федоров К. Н. *Тонкая термохалинная структура вод океана*. Л.: Гидрометеиздат, 1976. [11] Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука, 1977.

Поступила в редакцию  
01.02.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1986, т. 27, № 2

УДК 551.511.6:532.516

### О КОГЕРЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ СКОРОСТИ В ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЯХ И ПЛОСКИХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СЛОЯХ СМЕШЕНИЯ

Е. П. Анисимова, А. А. Сперанская

(кафедра физики моря и вод суши)

Эксперименты и натурные наблюдения, выполненные авторами в последние годы, показали наличие отрывного течения за волновыми профилями. Исследовалось обтекание как неподвижных волновых профилей в аэродинамических трубах и гидродинамических каналах, так и слабоподвижных волновых профилей (песчаные гряды на дне реки) [1]. И наконец, отрывное течение было обнаружено за гребнями развивающихся ветровых волн на водохранилище и в эксперименте, выполненном в гидроаэроканале физического факультета МГУ [2].

Турбулентная структура отрывного течения исследовалась более подробно на примере обтекания единичного препятствия в форме полуцилиндра [3]. В экспериментах было выявлено наличие в отрывном течении за полуцилиндром своеобразного слоя смешения, вертикальные профили продольной составляющей средней скорости которого подобны соответствующим профилям в плоских турбулентных слоях смешения. Получено также качественное подобие вертикальных профилей дисперсий продольной компоненты пульсаций скорости в слоях смешения этих двух типов [3]. Вид функций спектральной плотности пульсаций скорости, рассчитанных для различных сечений области отрывного течения, реализующегося за волновыми профилями и за полуцилиндром, свидетельствует, что полю скорости в зоне смешения отрывного

течения присуща квазирегулярная форма движения [1, 3], характеризовать которую удобно с помощью числа Струхала. В рассмотренных отрывных течениях существуют возмущения скорости в некотором достаточно узком диапазоне частот, отвечающем числам Струхала от 0,013 до 0,020\*. Согласно экспериментальным исследованиям [4, 5], поле скорости имеет квазирегулярную структуру и в нестратифицированных по плотности плоских турбулентных слоях смешения.

На примере суспензионных потоков авторами настоящей работы проведено исследование плоского турбулентного слоя смешения, стратифицированного по плотности, который возникает на границе суспензионного потока, движущегося в неподвижной чистой воде.

Другими словами, исследован слой раздела между двумя жидкостями различной плотности, одна из которых обладает скоростью  $u_1 \neq 0$ , а другая покоится ( $u_2 = 0$ ). Условия проведения экспериментов изложены в [6].

По записям модуля пульсаций скорости в зоне смешения суспензионных потоков с различными исходными плотностями, движущихся в неподвижной чистой воде, были рассчитаны функции спектральной плотности пульсаций скорости (рис. 1). Из рис. 1 видно, что спектры пульсаций скорости в слое смешения имеют четкий максимум на частоте, не зависящей, в пределах точности расчета, от исходной плотности суспензии. Такой вид спектров пульсаций скорости говорит о генерации турбу-

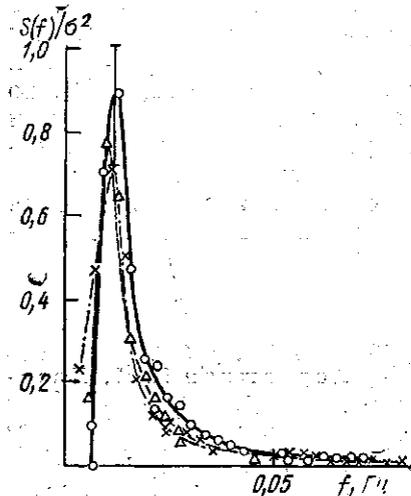


Рис. 1. Функции спектральной плотности пульсаций скорости, нормированные на дисперсию, в слое смешения суспензионных потоков различной исходной концентрации:  $\rho = 1,0070$  (O);  $1,0125$  ( $\Delta$ ) и  $1,0259$  г/см<sup>3</sup> (X)

лентности в узком интервале частот, т. е. о наличии в стратифицированных по плотности плоских турбулентных слоях смешения, так же как и в отрывных течениях, источника турбулентной энергии с некоторым характерным периодом. Автоколебательный характер поля скорости в стратифицированном по плотности турбулентном слое смешения наблюдался также авторами и при исследовании структуры подледного течения на озере Байкал [7].

Наличие квазирегулярных колебаний скорости в турбулентном слое смешения, сопровождающихся выбросом вихрей, а следовательно, и генерацией турбулентности, подтверждается визуальными исследованиями движения суспензионного потока. На рис. 2 приведены фотографии суспензионного потока, движущегося по наклонному дну лотка в неподвижной чистой воде. Фотографии сняты в последовательные моменты времени. На снимках хорошо видно зарождение и развитие в зоне смешения когерентных структур, напоминающих по форме волны с опрокидывающимися гребнями. При этом процесс развития их имеет пилообразный характер: сравнительно медленная фаза роста вихря сменяется быстрой нелинейной фазой его разрушения. На рис. 3 приведена фотография поверхности раздела суспензионного потока и чистой воды. По фотографии четко прослеживается волновая форма поверхности раздела.

Возникновение вихревых структур носит случайный характер, однако параметры, определяющие этот процесс, имеют статистически устойчивые средние значения, воспроизводимые в эксперименте, что подтверждается видом функций спектральной плотности пульсаций скорости, приведенных на рис. 1.

Рассчитаем числа Струхала, характерные для слоя смешения исследованных суспензионных потоков:

$$Sh = f_{\max} b / u_1, \quad (1)$$

\* В отрывном течении за полувалом диапазон чисел Струхала, отвечающих основному максимуму на функциях спектральной плотности пульсаций скорости, составляет 0,013—0,018. В отрывном течении за полуцилиндром обнаружены также возмущения скорости в диапазоне частот, отвечающем числам Струхала 0,026—0,031 [3]. Появление этого интервала частот, приблизительно кратного первому, скорее всего объясняется неустойчивостью первоначально образовавшихся структур и в настоящей статье не рассматривается.

где  $f_{\max}$  — частота преобладающего максимума на функциях спектральной плотности  $S(f)$  (см. рис. 1),  $b$  — найденная из эксперимента ширина слоя смещения в суспензионном потоке,  $u$  — максимальная скорость суспензионного потока. Определенные таким образом числа  $Sh$  при увеличении исходной плотности суспензии  $\rho$  закономерно падают:  $Sh=1,4 \cdot 10^{-2}$ ;  $1,0 \cdot 10^{-2}$  и  $0,6 \cdot 10^{-2}$  при  $\rho=1,0070$ ;  $1,0125$  и  $1,0259$  г/см<sup>3</sup> соответственно, причем для случая минимальной плотности ( $\rho=1,0070$  г/см<sup>3</sup>) рассчитанное по (1) число Струхала совпадает с нижней границей интервала значений  $Sh$ , рассчитанных для слоя смещения нестратифицированного по плотности отрывного течения за полуцилиндром.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о подобии механизма возникновения когерентных структур в плоских турбулентных слоях смещения и в слое смещения отрывного течения.

Выражаем большую благодарность Л. В. Поборчей, любезно предоставившей в наше распоряжение экспериментальные материалы по исследованию движения суспензионных потоков.

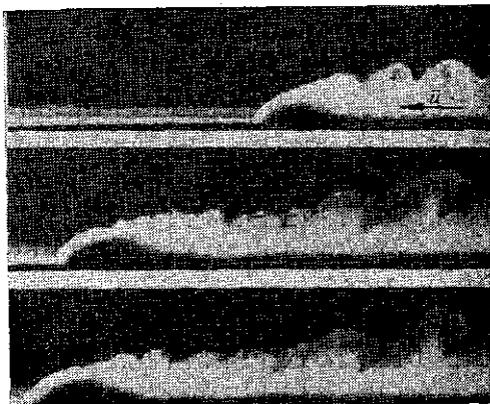


Рис. 2. Фотографии суспензионного потока, движущегося в неподвижной чистой воде



Рис. 3. Фотография поверхности раздела суспензионного потока и чистой воды

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Анисимова Е. П., Сперанская А. А., Тугеева М. С. Изв. АН СССР, ФАО, 1975, 11, с. 537. [2] Анисимова Е. П., Доброклонский С. В., Лесников Б. М., Сперанская А. А. Там же, 1978, 14, с. 445. [3] Анисимова Е. П., Сперанская А. А., Шапхаев С. Г. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1981, 22, № 3, с. 71. [4] Рошко А. Ракетная техника и космонавтика, 1976, 14, № 10, с. 8. [5] Winant C. D., Browand F. K. J. Fluid Mech., 1974, 63, N 2, p. 237. [6] Анисимова Е. П., Поборчая Л. В., Сперанская А. А. Изв. АН СССР, ФАО, 1978, 14, с. 1110. [7] Анисимова Е. П., Сперанская А. А. В кн.: Тез. Междунар. симпоз. по стратифицированным течениям. Новосибирск, 1972, с. 1.

Поступила в редакцию  
05.05.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1986, т. 27, № 2

УДК 551.510.534

## О ПЕРЕНОСЕ ОЗОНА ТЕЧЕНИЯМИ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ

М. С. Ракова, А. Х. Хргиан

(кафедра физики атмосферы)

Атмосферный озон, основной слой которого находится в стратосфере на высоте 20—24 км, участвует там, несомненно, в процессах горизонтального и вертикального переноса воздушных масс. Поле давления воздуха, создающее такой перенос, имеет форму циклонов, антициклонов либо так называемых длинных волн (волн Россби). Их некоторые свойства можно изучить, в частности, по изменениям количества озона, наблюдения за которым ведутся сейчас систематически в ряде (более 100) пунктов земного шара.