

П.Н. Журавлев, Н.К. Шелковников

Волновихревая структура движений на границе раздела двухслойной жидкости

Работа посвящена экспериментальному исследованию процессов, происходящих на границе раздела двухслойной жидкости в прямолинейном аэрогидроканале. Обнаружены так называемые «протуберанцы» (то есть выбросы соленой воды из нижнего слоя в верхний) и колеблющийся слой жидкости в области пикноклина. Слой возникал после прекращения действия ветра и распространялся в противоположном ему направлении. Эти процессы способствовали вертикальному обмену в стратифицированной жидкости.

Как известно, процессы вертикального обмена играют важную роль в формировании динамического и теплового режимов океана, исследование которых в морских условиях сопряжено с рядом технических трудностей. Поэтому для более детального изучения механизмов вертикального обмена в стратифицированной жидкости часто обращаются к лабораторным экспериментам. В частности, предпринимаются попытки исследования процесса вовлечения на границе раздела слоев разной плотности.

Лабораторные исследования процессов в стратифицированной жидкости начались с экспериментов скандинавского ученого Сандстрема в 1908 г. [1]. В этих экспериментах изучались движения, возбуждаемые ветром в двухслойной жидкости. Было обнаружено, что границы пресной и соленой воды наклонены в разные стороны, причем наклон увеличивался с уменьшением разности плотностей жидкостей. Граница раздела оказывалась устойчивой, жидкость верхнего слоя скользила почти без трения по нижнему слою. Существенно, что в этих опытах наблюдалась установившаяся картина циркуляции несмешивающихся жидкостей.

В последнее время для объяснения механизма обмена через границу раздела слоев с разной плотностью привлекается гипотеза неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Согласно этой гипотезе, при малом скачке плотности между слоями имеет место соотношение:

$$k > k_c = \frac{2g \frac{\Delta \rho}{\rho}}{(\Delta U)^2},$$

где $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ – разность плотности между слоями; $\rho = \sqrt{\rho_1 \rho_2}$; $k_c = 2\pi / \lambda_c$; k_c , λ_c – критические волновое число и длина волны; ΔU – разность скоростей между слоями. Отсюда следует, что волны, длина которых меньше $2\pi / k_c$, неустойчивы и это приводит к образованию выбросов. Однако, по мнению автора [2], условия действия этого механизма при малых градиентах плотности выполняются не всегда.

В [3] моделировалось перемешивание при помощи колеблющейся решетки в глубоком прямоугольном резервуаре, заполненном двухслойной

жидкостью. Была получена зависимость скорости вовлечения $u_e = \Delta h / \Delta t$ (h – толщина верхнего квазиоднородного слоя) от потокового числа Ричардсона

$$Ri_0 = \frac{gD\Delta\rho}{\rho u_*^2}. \text{ Здесь } D - \text{ толщина перемешанного слоя; } u_* = \sqrt{\tau/\rho} - \text{ динамическая скорость, где } \tau - \text{ напряжение трения.}$$

В работе [4] использован кольцевой канал, в котором касательное напряжение на верхней границе создавалось при помощи движущегося экрана, частично погруженного в жидкость. В результате этих исследований показано, что безразмерная скорость вовлечения u_e/u_* обратно пропорциональна Ri_0 . Таким образом, была получена связь между скоростью роста толщины перемешанного слоя и его устойчивостью. В случае непрерывной стратификации скорость опускания границы раздела приблизительно в два раза меньше.

Позднее удалось обнаружить максимумы в спектрах пульсаций гидрофизических полей в океане, соответствующие колебаниям с периодами 3–4 мин [5]. Эти колебания интерпретировались как короткие внутренние волны в среднем течении, достигающие локальной неустойчивости типа Кельвина–Гельмгольца. Таким образом, их можно рассматривать как источники вихреволновой турбулентности. Аналогичный механизм разрушения пакетов внутренних волн с периодами ~ 5 мин приводил, по мнению автора работы [6], к образованию временных апертур, через которые мог происходить обмен импульсом и теплом между верхним перемешанным и нижележащими слоями.

В работе [7] процесс вовлечения в двухслойной жидкости исследовался в прямолинейном аэрогидроканале. Под действием ветра генерировались дрейфовое течение и поверхностные волны. В нижней части перемешанного слоя формировалось компенсационное противотечение. На границе раздела были обнаружены «протуберанцы», то есть солитонообразные выбросы соленой воды в верхний пресный слой. Предполагалось, что эти выбросы аналогичны придонному колеблющемуся вязкому подслою.

Как видно из краткого обзора, исследование процессов на границе раздела двухслойной жидкости и их влияния на вертикальный обмен между слоями является важной задачей, требующей дальнейшего изучения. В связи с этим в данной работе предпринята попытка более детального экспериментального исследования механизмов, приводящих к перемешиванию на границе раздела слоев. А именно, механизма зарождения «протуберанцев» и их роли в вертикальном обмене между слоями, а также влияния на динамику ветровых сгонно-нагонных течений в двухслойной жидкости.

Для изучения процессов на границе раздела слоев, приводящих к вертикальному обмену, и объяснения явления «протуберанцев» нами были проведены эксперименты в прямолинейном аэрогидроканале сечением 15×15 см и длиной 350 см. Для создания воздушного потока использовался вентилятор, который нагнетал воздух через специальный короб в пространство между поверхностью воды и крышкой канала. Изменением наклона короба задавался угол входа воздуха в канал. Вентилятор позволял регулировать скорость потока воздуха, направляемого через рукава в канал, от 4 до $16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для измерения солености использовался кондуктометрический метод. Профили электропроводности определялись при помощи датчика, который представлял собой два стальных стержня диаметром 1 мм, расположенных на удалении ~ 5 мм друг от друга. При этом электрическое взаимодействие с водой имели два точечных платиновых контакта, величина зазора между которыми составляла 2 мм. Датчик включался в цепь переменного тока, и далее модулированный по амплитуде сигнал подавался через блок сопряжения на АЦП-плату компьютера. Тарировка производилась абсолютным методом, то есть по изменению падения напряжения на входе АЦП в зависимости от концентрации солевого раствора.

Скорость течения измерялась с помощью видеосъемки. Точность измерений составляла $\pm 0,2$ см $\cdot$ с $^{-1}$.

В результате проведенных экспериментов условно выделено несколько этапов развития неустойчивости на границе раздела двухслойной жидкости, в частности:

1. Образование квазисинусоидальных колебаний над слоем скачка плотности.

2. Появление «протуберанцев».

3. Стабилизация (выравнивание) нижней границы верхнего квазиоднородного слоя (ВКС).

При значениях скорости ветрового потока 4 – 6 м $\cdot$ с $^{-1}$ наблюдались все три этапа, причем имело место периодическое повторение второго и третьего этапов до момента стационарирования процесса перемешивания, при котором «протуберанцы» и вихри не наблюдались.

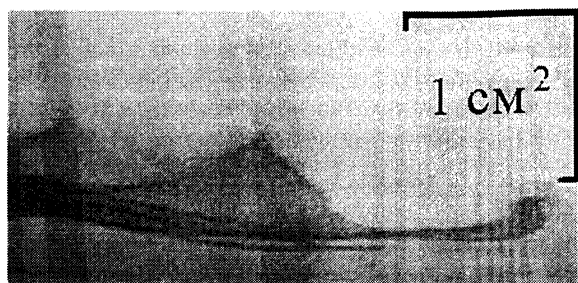
На рис. 1, *а* представлены фотографии верхнего слоя жидкости, на которых видны волновые движения на границе раздела между слоями и два «протуберанца». Фотография «протуберанцев» качественно напоминает действующие вулканы с выбросом пепла в атмосферу. Она получена обычной видеосъемкой с использованием красителя. Ниже подкрашенного слоя находился слой скачка плотности, так что краситель позволял наблюдать колебания в верхнем слабоосолоненном слое. Амплитуда «протуберанцев» составляла 1/4 всей толщины жидкости.

На рис. 1, *б* видно большое количество «протуберанцев», вихрей и пограничных слоев, именно на этом этапе происходил наиболее интенсивный обмен между слоями. Высота «протуберанцев» часто превышала 1/4 всей толщины жидкости. Скорость ветрового потока составляла 4 м $\cdot$ с $^{-1}$.

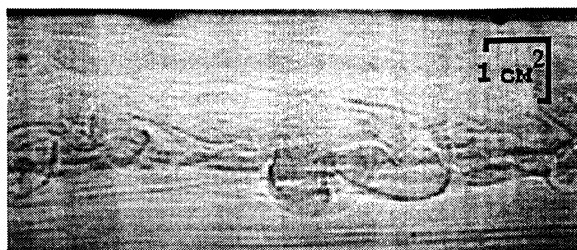
Второй и третий этапы, отмеченные выше (то есть появление и исчезновение «протуберанцев»), повторялись в течение эксперимента несколько раз, и по завершении последнего цикла наступал процесс стабилизации пикноклина, что видно на рис. 1, *в*.

Длительность описанных выше этапов зависела от скорости ветра, при увеличении которого первый этап (рис. 1, *а*) протекал быстрее, а продолжительность второго (рис. 1, *б*) увеличивалась. Рост длительности второго этапа можно объяснить тем, что при сильном ветре колебания поверхностного слоя быстрее проникали в более плотные слои, в то время как при слабом ветре снималась лишь «поземка» со слоя скачка плотности. При увеличении скорости ветрового потока изменялись не только глубина проникновения турбу-

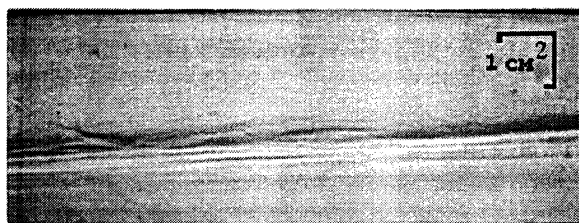
лентных пульсаций, но и интервал времени от момента включения ветра до возникновения периодических движений над слоем скачка плотности. А именно, чем сильнее ветер, тем меньше времени требовалось для образования этих движений над пикноклином.



a



б



в

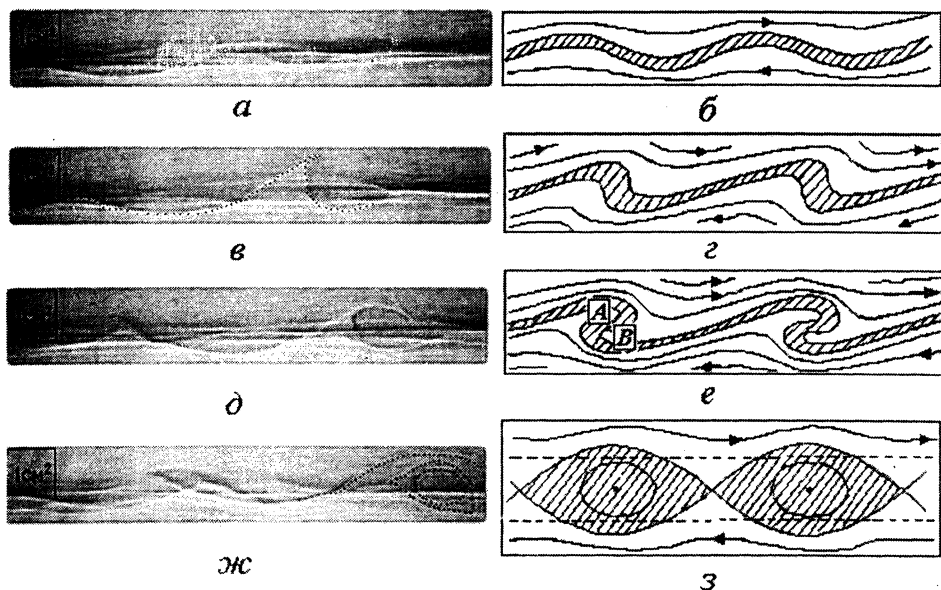
Р и с. 1. Процессы, происходящие на границе раздела двухслойной жидкости: *a* – первый этап: волнообразные движения над пикноклином и «протуберанцы»; *б* – второй этап: появление большого числа «протуберанцев» и вихрей; *в* – третий этап: выглаживание нижней границы ВКС. Скорость ветра – $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

Представляется интересным сопоставить наши экспериментальные данные с результатами численных расчетов, полученных в [2]. Согласно [2], в слое смешения стратифицированного течения имеют место следующие этапы развития неустойчивости:

- образование синусоидальных волн, так называемых колебаний вихревого слоя (рис. 2, *а*);
- укручивание волнообразных движений (рис. 2, *з*);
- значительное закручивание вихря, при котором, по выражению автора работы [2], образуется нечто вроде «рулета» с вращением (рис. 2, *е*). Особен-

но сильно эта тенденция проявляется, когда разность плотностей мала, а сдвиг скорости велик. На этой стадии в точке *A* оказывается жидкость, обладающая большей плотностью, чем в точке *B*, и следовательно, в свернувшихся вихрях жидкость оказывается в неустойчивом состоянии и начинает перемешиваться;

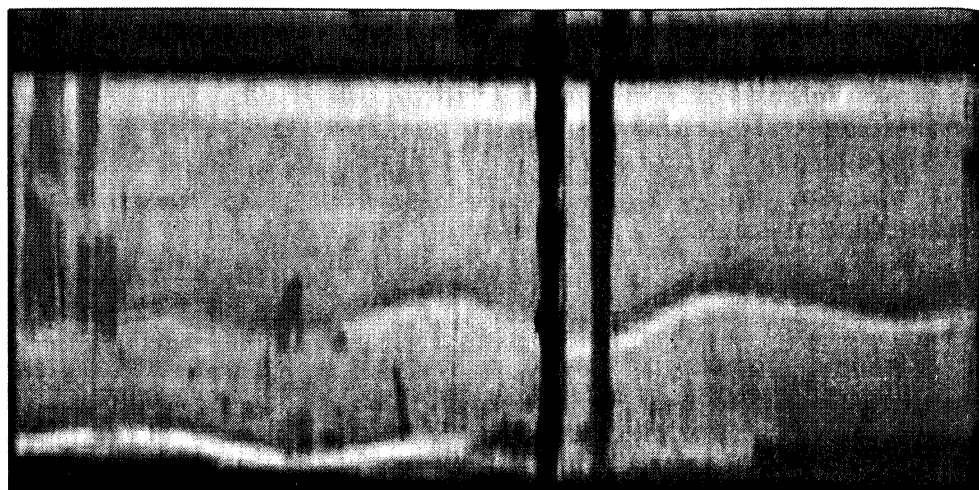
– формирование структуры, в которой перемешанная жидкость собирается в отдельные ролики (так называемые «кошачьи глаза»), причем выше и ниже их продолжается волновое движение (рис. 2, з).



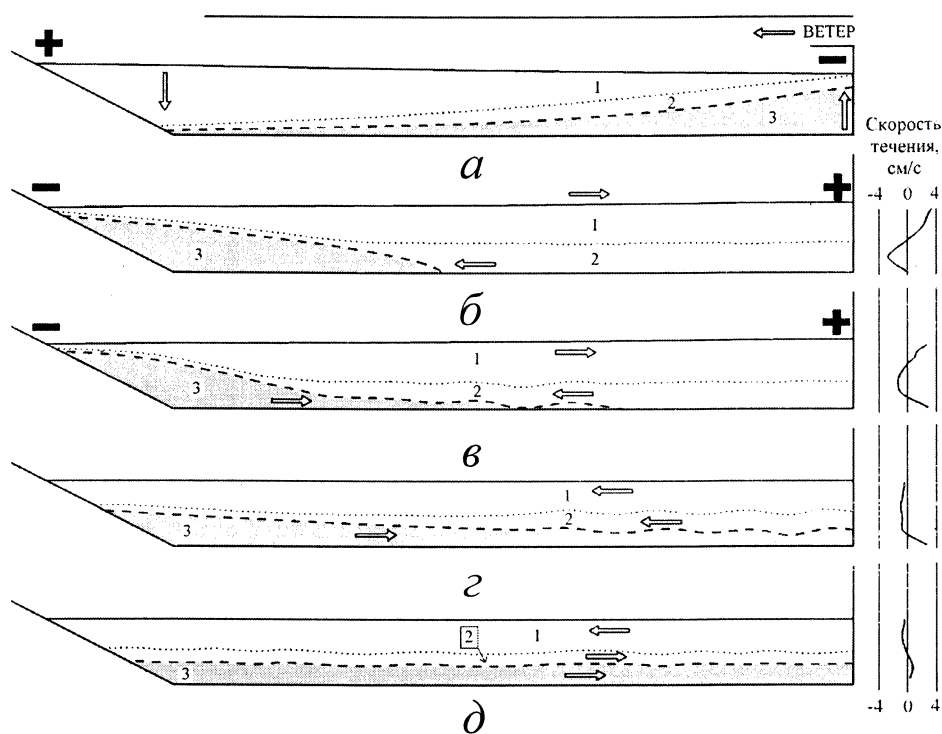
Р и с. 2. Образование структуры «кошачьи глаза» после прекращения действия ветра по результатам лабораторных (*а, в, д, жс*) и вычислительных (*б, г, е, з*) [3] экспериментов. Шаг по времени между фоторегистрациями *а, в* и *д* равен 1,2 с, между *д* и *жс* – 2,4 с

Все эти этапы наблюдались в нашем эксперименте после выключения ветра, при образовании течений, вызванных нагонами пресной и соленой воды. В таких условиях поле скоростей в слоях, движущихся в разных направлениях, отличается от структуры течений, образованных воздействием поля ветра. Из сопоставления фотографий, полученных в [2] (рис. 2, *б, г, е, з*), и наших данных (рис. 2, *а, в, д, жс*) видно, что имеет место качественное совпадение результатов на всех этапах развития неустойчивости на границе раздела двухслойной жидкости. На рис. 2, *д* виден процесс закручивания заостренной внутренней волны по направлению течения в верхнем слое. В процессе образования структуры «кошачьи глаза» (рис. 2, *жс*) внутри нее находилась жидкость, обладающая меньшей плотностью, чем снаружи, что приводило к неустойчивости образовавшейся структуры и способствовало развитию процесса перемешивания.

Во время наших экспериментов наблюдалось появление колеблющегося слоя, который поднимался от дна к пикноклину (рис. 3, колебания распространялись справа налево на расстояние $1/2$ длины канала). Количество волн в колеблющемся слое – 6, средний период волн – 5 с.



Р и с. 3. Колебания стратифицированных слоев после прекращения действия ветра



Р и с. 4. Развитие колебаний в придонном слое бассейна после прекращения действия ветра. Выделены: 1 – слой пресной (слабоосолоненной) воды; 2 – осолоненная прослойка; 3 – слой соленой воды

Для качественного описания наблюдаемого явления воспользуемся рис. 4, из которого видно, что под действием ветра формировывались три слоя с различной плотностью: слабоосолоненный верхний слой, переходный слой с большим градиентом солености и нижний слой с неперемешанной со-

ленной жидкостью. Под действием ветра в левой половине канала создавался нагон пресной воды. Это приводило к возникновению градиентного противотечения на верхней границе скачка плотности. Таким образом, в начале канала наблюдался подъем соленой воды и происходило замыкание циркуляционной ячейки. После выключения ветра пресный слой начинал движение в направлении источника ветра (правая половина канала), а соленый слой перемещался в противоположном направлении (рис. 4, б). Когда соленый слой достигал максимального угла наклона, направление его движения изменялось на противоположное. При этом часть соленого слоя, стремясь в правую половину канала, встречалась со своим «хвостом», который двигался в противоположном направлении. После столкновения струя соленого слоя приобретала волнообразные колебания на границе с промежуточным слоем (рис. 4, в). Подобные волновые движения при обтекании стратифицированным течением барьера, расположенного на дне (рис. 5), описаны в [8]. В нашем случае по мере распространения по дну соленый слой вытеснял более легкий (промежуточный) слой вверх, распространяясь до вертикальной стенки в правой половине канала (рис. 4, г). После отражения соленая жидкость продолжала заполнять нижний слой, что приводило к подъему границы между соленым слоем и осолоненной прослойкой. Колебания на границе этих слоев постепенно затухали.



Рис. 5. Течение (справа налево) над барьером в канале [8]

В заключение сформулируем основные выводы данной работы.

1. Выявлен дополнительный механизм вертикального обмена в двух-слойной жидкости в виде большого количества выбросов соленой воды из нижнего слоя в верхний («протуберанцев»), возникающих на границе раздела между слоями при скоростях ветра $4-6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Показано, что активное образование «протуберанцев» происходит при максимальных градиентах числа Ричардсона Ri_0 , значения которого изменялись от 10 до 30. Появление и исчезновение «протуберанцев» при вышеописанных условиях носит периодический характер, а при $Ri_0 < 5$ поверхность раздела сглаживается, «протуберанцы» и вихри не наблюдаются.

3. Показано, что при выключении ветра происходит возвращение системы в равновесное состояние с возникновением противотечений и неустойчи-

вости на границе раздела, что приводит к появлению колеблющегося слоя толщиной $1/4$ глубины всей жидкости; он захватывал более $1/2$ длины канала. Волновые движения этого слоя возникают при набегании придонных слоев (соленого и осолоненного) друг на друга.

4. Наблюдаются так называемые «кошачьи глаза», для которых характерно наличие неустойчивости, приводящей к вертикальному обмену между слоями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sandstrom W.* Dynamische versuche mit Meereswasser // *Ann. d. Hydr. und Marit. Met.* – 1908. – С. 6.
2. *Скореп Р.* Аэрогидродинамика окружающей среды. – М.: Мир, 1980. – С. 250–269.
3. *Turner J. S., Kraus E. B.* A one-dimensional model of the seasonal thermocline. I. A laboratory experiment and its interpretation // *Tellus*. – 1967. – 19, № 1. – Р. 88–97.
4. *Kantha L. N., Phillips O. M., Azad R. S.* On turbulent entrainment at a stable density interface // *J. Fluid Mech.* – 1977. – 79, № 4. – Р. 753–768.
5. *Коротяев Г. К., Пантелеев Н. А.* Экспериментальные исследования гидродинамической неустойчивости в океане // *Океанология*. – 1977. – 17, вып. 6. – С. 941–953.
6. *Вудс Дж.* Исследование некоторых физических процессов, связанных с вертикальным потоком тепла через верхний слой океана // *Формирование, структура и флуктуации верхнего термоклина в океане*. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – С. 79–88.
7. *Шелковников Н. К., Алявдин Г. И.* Экспериментальное исследование процесса вовлечения в двуслойной жидкости // *Океанология*. – 1982. – 22, вып. 2. – С. 196–203.
8. *Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкостях. – М.: Мир, 1977. – С. 72–73.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
Москва

Материал поступил
в редакцию 27.01.05

ABSTRACT Mixing processes taking place on the interface of a two-layer stratified fluid in a rectangular water channel are experimentally investigated. Protuberances (i.e. salt water kicks from the lower layer into the upper one) and the oscillating fluid layer in the pycnocline area are revealed. The layer appears after wind blowing stops and propagates in the direction opposite to it. These processes promote vertical exchange in the stratified fluid.