

## Лабораторное исследование динамики двухслойной жидкости при ветровом нагоне в прямолинейном канале

© 2017 С.Ф. Доценко<sup>1</sup>, Н.К. Шелковников<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2016 г.

Представлены результаты лабораторных экспериментов в прямолинейном аэрогидроканале прямоугольного сечения, заполненном двухслойной (пресная – соленая) жидкостью. Генератор возмущений – воздушный поток, поступающий в область над каналом. Рассмотрена динамика двухслойной жидкости в канале с горизонтальным плоским дном без препятствий на дне и при наличии донного препятствия конечной ширины. Показано, что в прямолинейном канале при нагоне одним из возможных механизмов обмена на границе пресного и соленого слоев могут быть выбросы соленой воды в пресноводный верхний слой, которые генерируются в результате неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. При последующем сгоне возможно появление волнообразных движений на границе раздела. Кроме этого, при сгонах может образовываться колеблющийся слой – слой максимального градиента плотности, колебания которого распространяются в вышележащие слои.

Наличие донного препятствия усложняет структуру движений двухслойной жидкости и, в частности, приводит к возникновению слоев смешения и турбулизации потока за препятствием, образованию над ним волнообразных возмущений, резкому изменению положения границы раздела, возникновению крупных вихрей с горизонтальной осью. Обнаружено, что горизонтальная составляющая скорости течения имеет максимум, вершина которого сдвинута вверх по течению от препятствия.

**Ключевые слова:** волны в жидкости, сгонно-нагонные процессы, двухслойная жидкость, вертикальный обмен, обтекание неровностей дна, лабораторное моделирование.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-5-21

**Введение.** Освоение Мирового океана сопровождается активным использованием его континентального шельфа. Хотя площадь шельфа составляет всего 7,2 % всей площади Мирового океана, доля разрабатываемых на нем минеральных ресурсов значительна. Так, с морского дна извлекается 20 % объема мировой добычи нефти и 15 % добычи газа. Рыбный промысел, геологоразведочные работы и разработка полезных ископаемых также ведутся в основном в зоне шельфа [1].

Характерная черта динамики вод на шельфе – сгонно-нагонные колебания поверхности жидкости, характеризующиеся попеременными подъемами и опусканиями уровня на противоположных границах бассейна в зависимости от направления ветра. Пространственно-временная структура данных колебаний определяется многими факторами, включая форму береговой черты, уклоны и особенности батиметрии дна, метеорологические воздействия, географическое положение шельфа, его ширину и другие

характеристики, которые приводят к усложнению происходящих на шельфе процессов и их прогноза [2].

Вызванная ветром сгонно-нагонная циркуляция способствует перераспределению водных масс не только в горизонтальном направлении, но и по вертикали, что инициирует обмен вод прибрежной зоны с открытой частью Мирового океана. Важным проявлением сгонно-нагонных движений являются смещения сезонного пикноклина на шельфе моря. В зависимости от интенсивности вертикальной циркуляции структура и глубина залегания сезонного термоклина изменяются, что приводит к увеличению или уменьшению толщины верхнего квазиоднородного слоя.

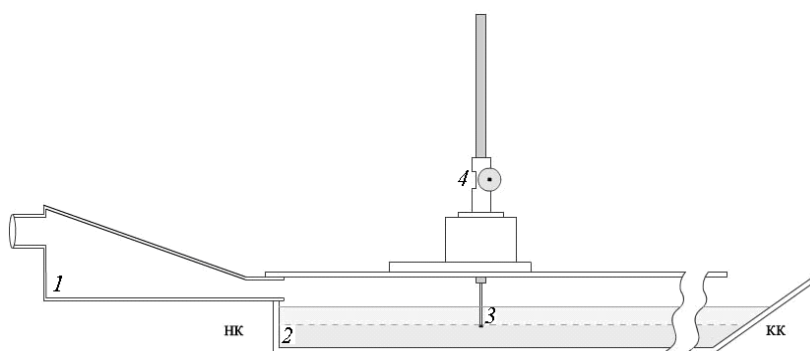
Результаты теоретических исследований и данные инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что при развитии градиентных и дрейфовых течений, эволюции низкочастотных поверхностных и внутренних волн в зонах с резкими изменениями рельефа дна возможны явления, присущие исключительно этим районам. В частности, к таким явлениям можно отнести трансформацию, захват, отражение от неровностей дна и рассеяние волн, интенсивные вертикальные движения водных масс, резкие изменения глубины залегания сезонного пикноклина и др. [3, 4]. Исследование этих процессов в натуральных условиях требует специальной организации измерений, что осуществляется при помощи лабораторных экспериментов [5, 6].

Целью данной работы является экспериментальное (лабораторное) изучение динамических процессов в канале, заполненном стратифицированной жидкостью. В описанных ниже экспериментах особое внимание уделяется изучению механизмов обмена между слоями двухслойной жидкости.

**Схема лабораторной установки.** Эксперименты проводились в прямолинейном аэрогидроканале  $15 \times 15 \times 280$  (330) см (рис. 1). Прозрачные стенки позволяли наблюдать процесс распространения волны вдоль канала, вести видео и фотосъемку. Воздушный поток создавался вентилятором, который нагнетал воздух между поверхностью воды и крышкой канала через специальный короб. Изменение наклона короба позволяло задавать нужный угол входа воздушного потока в канал. Вентилятор соединялся с коробом при помощи гибких рукавов из гофрированного алюминия. Вентилятор имел устройство (заслонки), которое позволяло регулировать поток воздуха через рукава в канал. Благодаря этому можно было изменять скорость ветра на выходе из короба от 3 до  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Профиль скорости воздушного потока в канале измерялся при различных скоростях на входе в канал с помощью цифрового анемометра с выносной крыльчаткой.

Измерение распределения солености выполнялось датчиком электропроводности, положение которого схематически показано на рис. 1. Датчик представлял собой два стальных стержня диаметром 1 мм и длиной 10 см, расположенных на расстоянии 5 мм друг от друга. Стержни были изолированы, а в их нижней части имелись напайки, выполненные из платиновой проволоки диаметром 1 мм и ориентированные торцами

друг к другу. Электрический контакт с водой имели лишь эти две торцевые площадки, величина зазора между которыми составляла 2 мм.



**Рис. 1.** Схема лабораторной установки: 1 – короб; 2 – аэрогидроканал 15 × 15 × 350 см; 3 – датчик солёности; 4 – микрометрическая шкала; НК – начало канала; КК – конец канала

Для измерения солёности использовался кондуктометрический метод (измерение солёности по электропроводности солевого раствора). Датчик включался в цепь переменного тока, и далее промодулированный по амплитуде сигнал подавался через блок сопряжения на плату АЦП компьютера. Попадание датчика в слой, обладающий большей солёностью, приводило к уменьшению электрического сопротивления между платиновыми контактами датчика и, как следствие, к уменьшению падения напряжения на входе платы АЦП. Тарировка датчика производилась абсолютным методом, таким образом позволяя получать изменения падения напряжения на входе платы в зависимости от концентрации солевого раствора. Тарировка проводилась сначала в водопроводной воде, потом в растворе, солёность которого повышалась до 20 ‰ с шагом 2 ‰. Точность приготовления солевых растворов при проведении тарировки составляла ~ 3 %.

В общем случае зависимость электропроводности жидкости  $R$  от глубины является нелинейной функцией. Поэтому измерительная система вносит некоторые нелинейные искажения в измеряемый сигнал. Нелинейная зависимость напряжения от глубины погружения датчика солёности аппроксимировалась с помощью полинома 4-й степени. Величина ошибки аппроксимации не превышала 5 %. Профили солёности снимались после затухания течения в лабораторном канале по завершении каждого цикла воздействия на жидкость потока воздуха. Вышеописанная процедура позволяет измерять изменения толщины верхнего квазиоднородного слоя и скачок плотности.

В экспериментах, посвященных исследованию влияния неровностей дна на процессы в двухслойной жидкости, использовались размещенные горизонтально на дне полукруглые цилиндры с радиусами основания  $r = 1,3$  см и  $r = 2,5$  см. Цилиндры устанавливались на расстоянии 80 см от начала канала НК (место подачи потока воздуха, см. рис. 1).

Основным источником данных о динамическом процессе являлась видеосъемка. Скорость дрейфа на поверхности и внутри жидкости измерялась посредством наблюдения за движением шариков из полистерола,

обладающих нейтральной плавучестью, которые, в зависимости от своих размеров, распределялись по всей глубине жидкости. Точность измерений составляла ~ 10 %. Видеосъемка позволяла получать качественные видеозаписи, которые в дальнейшем использовались для определения количественных характеристик наблюдаемых процессов.

**Динамика двухслойной жидкости в случае горизонтального дна.** Были проведены экспериментальные исследования особенностей динамических процессов, происходящих под действием нагонного ветра в прямолинейном канале с плоским дном как без препятствия на дне, так и при наличии донного препятствия с учетом его влияния на движение стратифицированной жидкости.

Выполнена серия наблюдений над двухслойной жидкостью в различных условиях экспериментов, включая изменения длины канала, размеров препятствия и скорости ветра от  $3,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  до  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

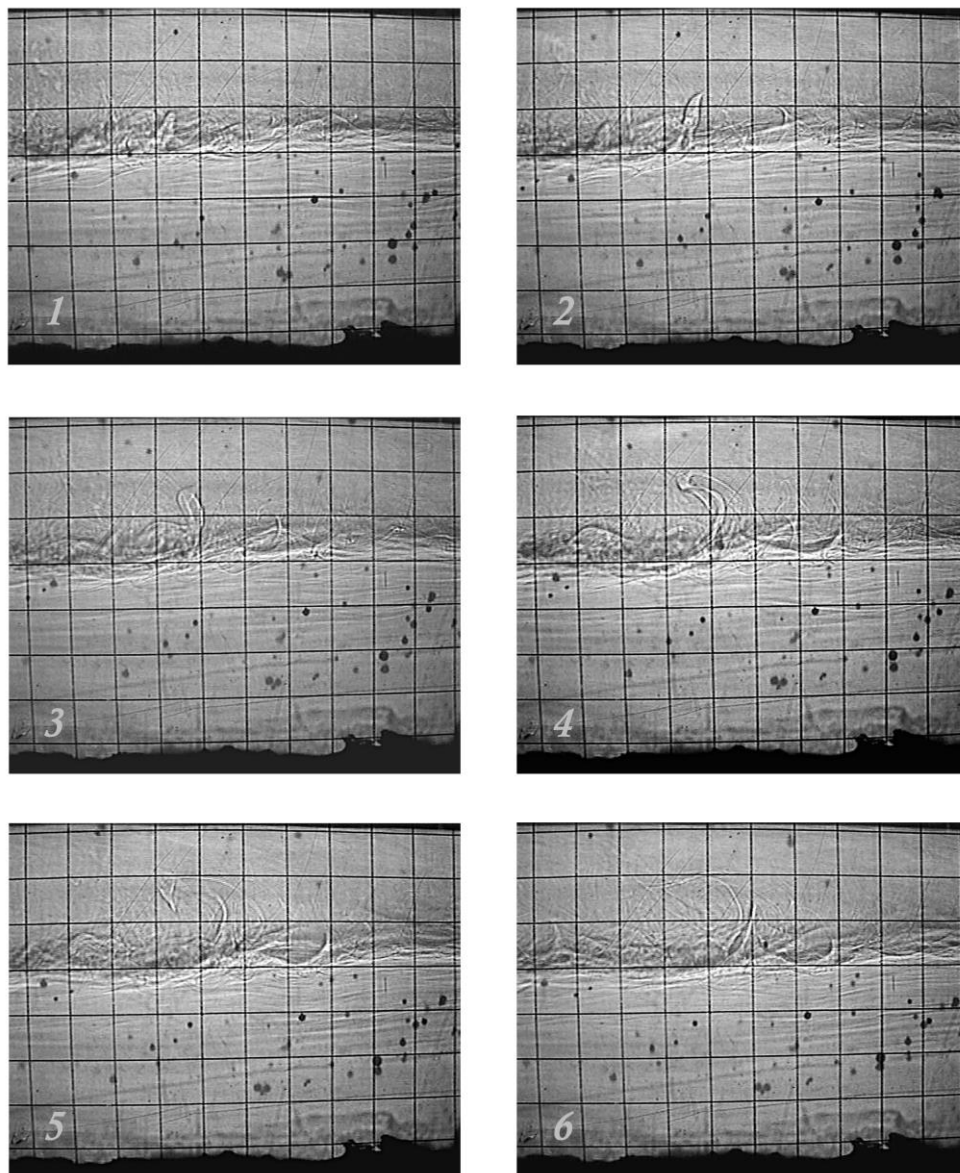
Канал наполнялся сначала соленой, затем пресной водой. Для предотвращения перемешивания с соленой водой заливка пресной воды производилась с помощью системы гибких тонких шлангов, прикрепленных к наклонной поверхности, на которую укладывался бумажный лист. Выходящая вода плавно стекала с него на поверхность соленой воды. Плавающий лист поднимался по мере наполнения канала, и в результате в канале создавалась плотностная структура, состоящая из двух квазиоднородных слоев (верхнего пресного и нижнего соленого), и переходного слоя между ними. Общая глубина заполнения канала составляла 8 см, начальная толщина соленого слоя (20 ‰) – 4 см. После заполнения канала включался вентилятор, нагнетающий поток воздуха в пространство между поверхностью воды и крышкой канала. Воздействие ветра на поверхность воды продолжалось заданное время, затем вентилятор выключался. Далее при помощи датчика электропроводности измерялось вертикальное распределение солености.

На протяжении лабораторного эксперимента, с момента включения вентилятора и до затухания течений в жидкости, процессы, происходящие в канале, регистрировались видеокамерой в визуальном окне шириной 10 см на расстоянии 80 см от начала канала.

При действии ветрового потока создавался нагон пресной воды в конце канала, противоположном от точки входа ветра. Дрейфовое течение, возникшее в результате нагона, вызывало компенсационное противотечение. В результате этого происходило понижение границы раздела слоев в конце канала КК (см. рис. 1) и повышение границы – в начале канала НК.

Во время ветрового воздействия наблюдалось возникновение «протуберанцев», то есть выбросов воды из нижнего соленого в верхний пресноводный слой (рис. 2). Этот процесс происходит в результате неустойчивости Кельвина – Гельмгольца и характеризуется увеличением амплитуды волнообразных колебаний. Согласно работе [7] в слое смешения стратифицированного течения скорость обтекания над гребнем и под впадиной выше, чем под гребнем и над впадиной. Поскольку в областях с меньшей скоростью давление выше, то непосредственно над вершинами гребней образуются зоны пониженного давления, что сопровождается формированием выбросов.

Таким образом, образование «протуберанцев» является одним из возможных механизмов обмена энергией между слоями как по направлению вверх, так и по направлению вниз. Этот процесс в итоге приводит к осолонению верхнего слоя жидкости и увеличению толщины верхнего квазиоднородного слоя. Существование вертикального обмена за счет формирования «протуберанцев» подтверждено в экспериментах и отчетливо видно на рис. 2.

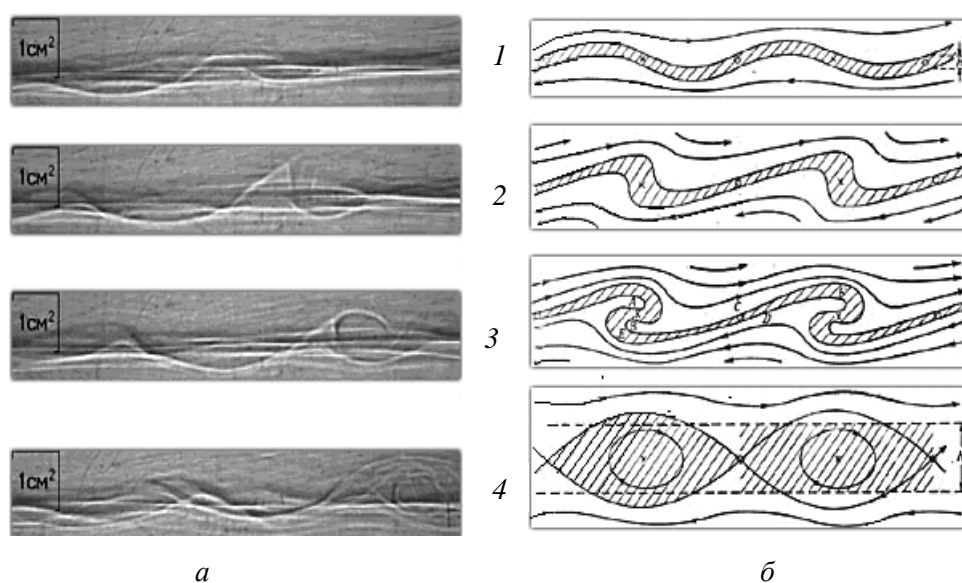


**Рис. 2.** Процесс зарождения и последующего развития «протуберанца». Промежуток времени между последовательными кадрами равен 0,4 с

По данным проведенных экспериментов, при нагонном ветре время жизни одного протуберанца составляет  $\sim 2$  с, горизонтальная скорость его распространения –  $0,5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ , высота выброса жидкости –  $2,5 \text{ см}$ , что составляет около 30 % от полной глубины всего слоя жидкости.

За время воздействия ветра формируются три слоя с различными распределениями солености: верхний слой с почти пресной водой, переходный слой с большим градиентом солености и нижний слой с неперемешанной соленой водой.

После прекращения воздействия ветра образуются возвратные течения, вызванные нагонами пресной и соленой воды. В таких условиях поле скорости в слоях, движущихся в разных направлениях, отличается от рассмотренной выше структуры течений, образованной воздействием ветра. Отличие заключается в том, что при отсутствии ветра слой скачка плотности и скорости течения в два раза толще, чем при воздействии ветра. В результате любое возмущение, которое образовалось в слое скачка, закручивалось в направлении течения на поверхности жидкости.



**Рис. 3.** Формирование «протуберанца» после прекращения действия ветра: *a* – экспериментальные результаты (шаг по времени между кадрами 1 – 3 равен 1,2 с, между кадрами 3 и 4 – 2,8 с); *б* – численное моделирование [7]

Согласно работе [7], в слое смешения стратифицированного течения наблюдаются следующие этапы развития неустойчивости (рис. 3):

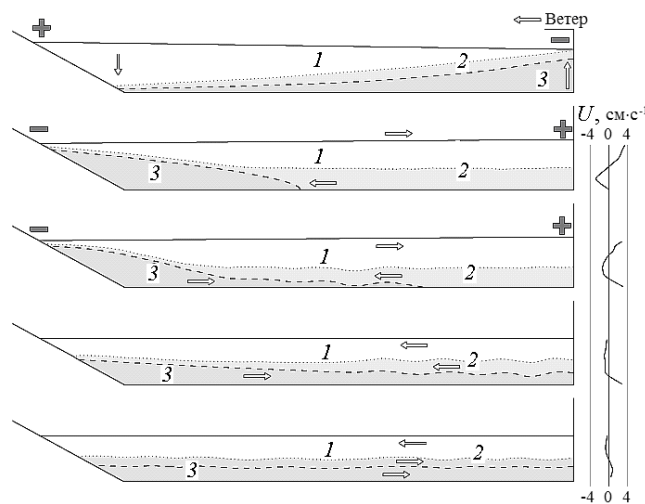
- образование синусоидальных волн на границе раздела двухслойной жидкости, так называемые колебания вихревого слоя;
- увеличение крутизны волнообразных движений на границе раздела, обусловленное растяжением вихревого слоя в восходящих узлах и увеличением завихренности в нисходящих узлах;

– закручивание вихрей с образованием «фрулета» с вращением. Особенно сильно эта тенденция проявляется при малой разности плотностей и больших сдвигах скорости. 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. Если плотности слоев сильно различаются, то перемешивание начинается сразу после второго этапа развития неустойчивости;

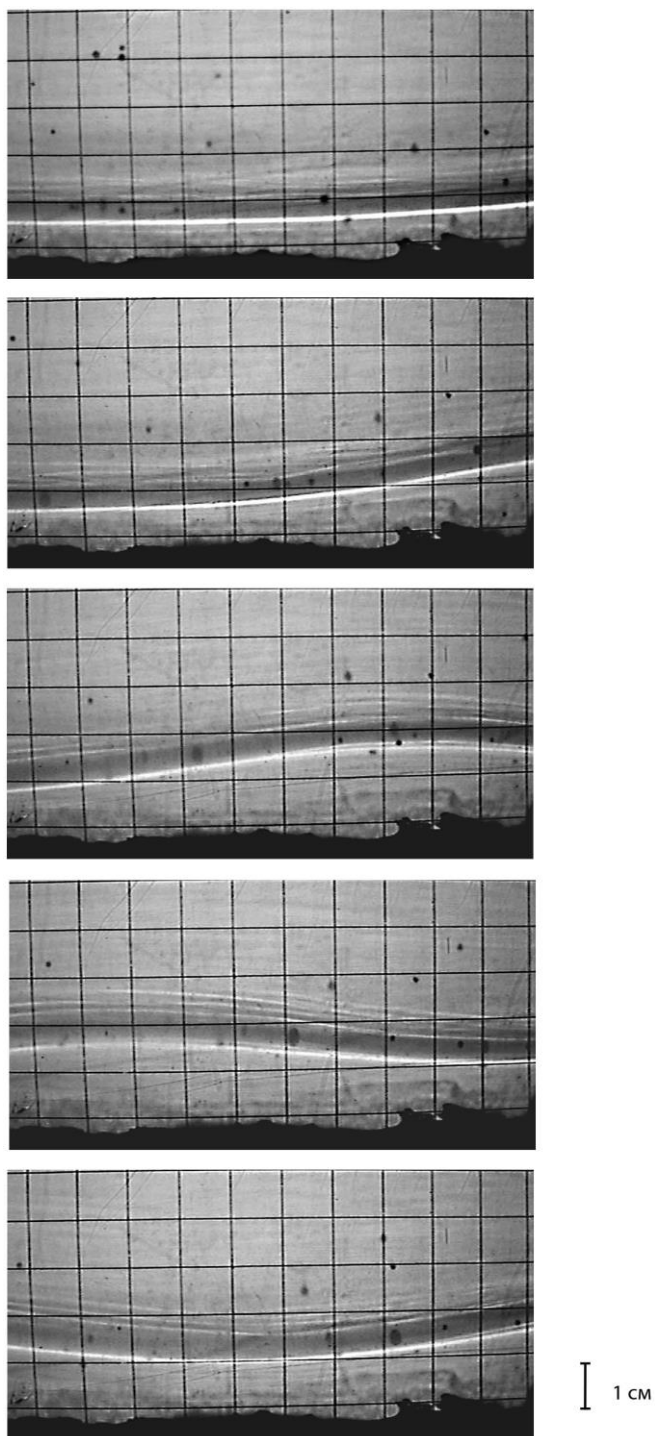
– формирование структуры, в которой перемешанная жидкость образует неустойчивости типа «кошачьи глаза», причем в вышележащих и нижележащих слоях продолжает развиваться волновое движение.

Сопоставление экспериментальных данных (рис. 3, *a*) с результатами вычислительных экспериментов (рис. 3, *b*) [7] показало, что характер возмущений на границе раздела слоев качественно одинаковый.

Как отмечалось выше, при прекращении воздействия ветра образуются возвратные течения, при этом пресный слой движется в начало канала, а соленый перемещается в конец канала. В случае слабого ветра наблюдаются колебания толщины слоя в противоположных концах канала (типа сейшевых колебаний). При относительно сильном ветре соленый слой перемещается к концу канала таким образом, что вся соленая вода концентрируется в поло-вине канала, противоположной вентилятору (рис. 4). При этом положение соленого слоя в начале канала занимает переходный слой. Когда масса соленой воды в конце канала достигает определенного значения, направление движения жидкости изменяется на противоположное. В результате часть соленого слоя, распространяясь в начало канала, встречается со своим задним фронтом, который движется в направлении конца канала. После столкновения на границе раздела между соленым и переходным слоями происходит образование возмущений и наблюдается волнообразное движение скачка плотности.



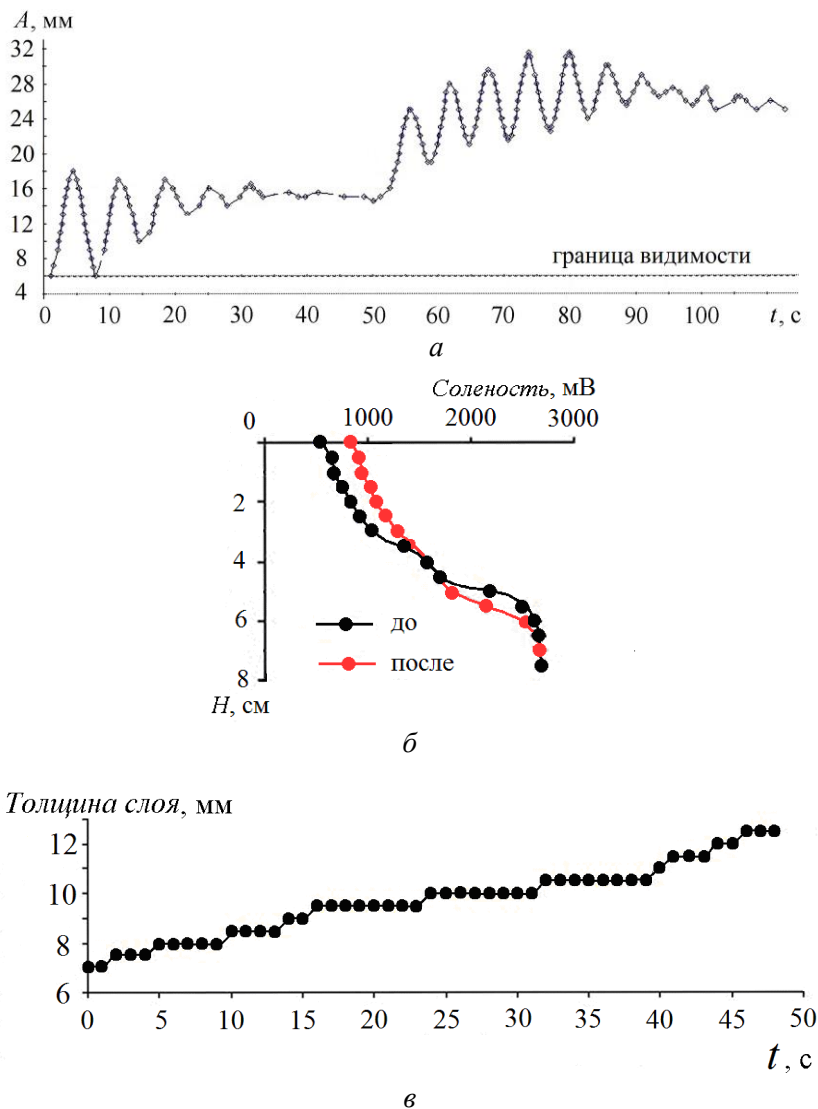
**Рис. 4.** Развитие колебаний в придонном слое двухслойной жидкости в канале с горизонтальным дном после прекращения действия ветра: 1 – слой пресной воды; 2 – промежуточный слой; 3 – слой соленой воды



**Рис. 5.** Колебания стратифицированного слоя после прекращения действия ветра. Временной шаг между кадрами – 2 с



По мере распространения по дну соленый слой вытесняет более легкий переходный слой вверх и распространяется до начала гидроканала. При отражении от начала канала наблюдается колеблющийся слой максимального градиента солености, колебания которого распространяются в верхние слои. Амплитуда колебаний расположенных выше слоев уменьшается с удалением от нижележащего слоя, так что поверхность не испытывает возмущений. За счет продолжающей поступать в канал соленой воды наблюдается подъем колеблющегося слоя от дна к середине канала. В течение 2 мин колебания на границе этих слоев постепенно затухают. Процесс колебаний слоя показан на рис. 5.



**Рис. 6.** Характеристики колебаний верхнего слоя жидкости: *a* – изменение со временем положения верхней границы слоя соленой жидкости; *б* – вертикальные распределения солености до начала действия ветра и после его прекращения; *в* – изменение со временем глубины залегания верхней границы слоя соленой жидкости

Характер изменения положения верхней границы соленого слоя со временем представлен на рис. 6, а. Первые 40 с (после появления колеблющегося слоя в окне видеосъемки) наблюдается распространение колебаний в начало канала, где они отражаются от вертикальной стенки и изменяют направление движения. На 55-й секунде начинается распространение колебаний слоя в конец канала. Поскольку продолжается приток соленой воды в начало канала, это вызывает поднятие границы раздела.

Как видно из рис. 6, а, временной интервал между гребнями волны составляет 6 с, амплитуда колебаний достигает 1,2 см, высота подъема колеблющегося слоя – 2,5 см, средняя скорость равна  $3 - 5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Из-за того, что перемешанная вода продолжает поступать в начало канала, наблюдается утолщение колеблющегося слоя (рис. 6, в).

До и после эксперимента было измерено распределение солености: толщина переходного слоя жидкости увеличилась от 0,7 см до 1,2 см (рис. 6, б). Вода из-за сильного потока воздуха (около  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) в ходе эксперимента сильно перемешалась. Соленый слой хотя и стал тоньше, но не перемешался с вышележащими слоями жидкости.

Пространственная картина колеблющегося слоя представлена на рис. 7. Данные взяты из эксперимента, в котором съемка проводилась в начале канала. Колеблющийся слой показан после отражения волновых возмущений от вертикальной стенки на границе раздела слоя соленой воды и переходного слоя. Расстояние между вершинами гребней составило  $\sim 20 \text{ см}$ .

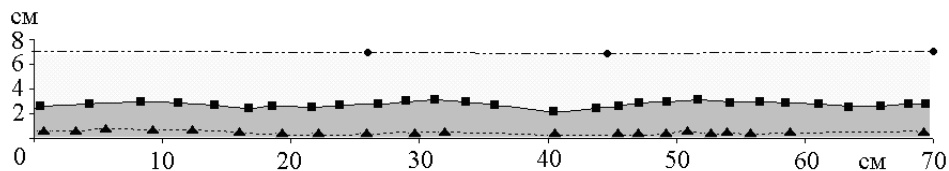
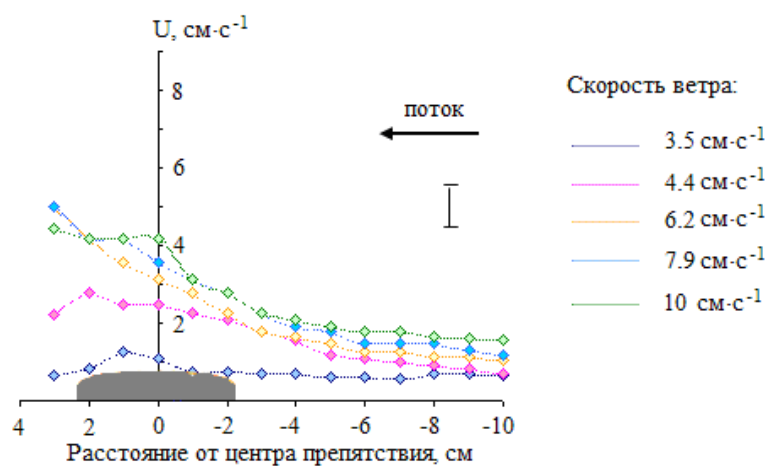


Рис. 7. Положение поверхности жидкости (●), границы раздела слоев (□) и дна бассейна (▲)

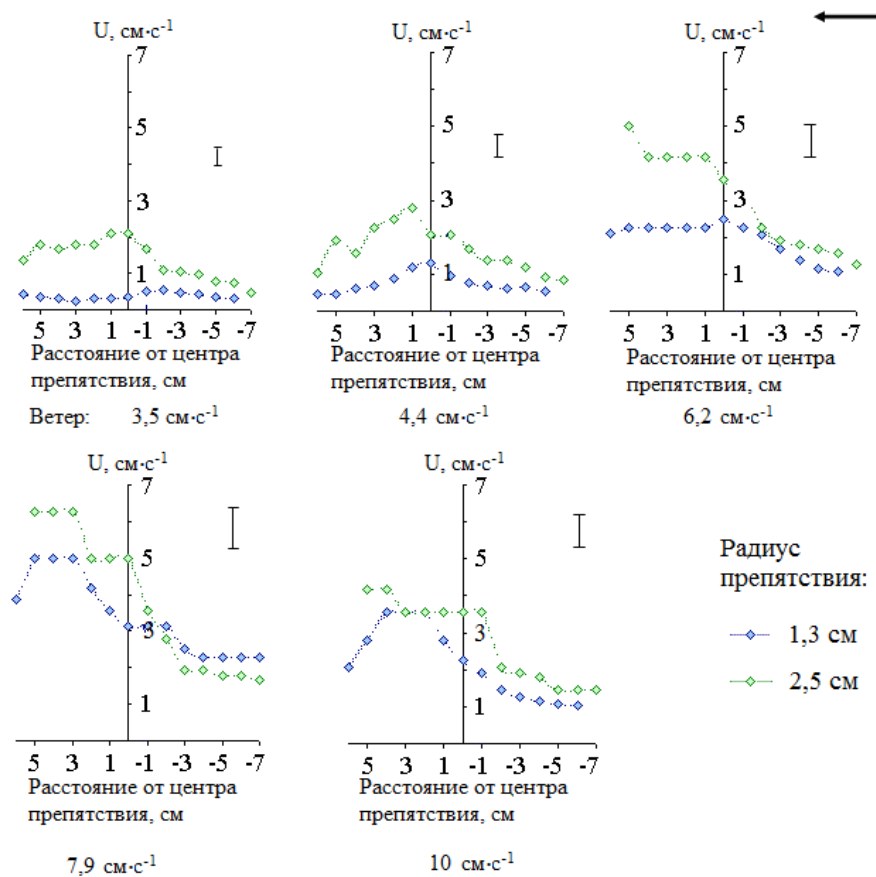
Таким образом, при нагонном ветре формируются «протуберанцы», приводящие к вертикальному обмену между слоями жидкости с различной плотностью, волнообразные движения, в последующие моменты времени проходящие все стадии развития неустойчивости, описанные в работе [7], и, наконец, возникает так называемый колеблющийся слой.

**Влияние неровностей дна на динамику стратифицированной жидкости.** Для исследования влияния неровностей дна на поток стратифицированной жидкости были проведены эксперименты при различных скоростях воздуха с донными препятствиями в форме полукруглого цилиндра. Препятствие малого сечения имело радиус, равный  $1/3$  толщины соленого слоя, большого –  $2/3$  его толщины.

На рис. 8 представлено распределение горизонтальной составляющей скорости при обтекании соленой водой большого препятствия в зависимости от расстояния до вершины препятствия ( $r = 2,5 \text{ см}$ ). Скорость течения измерялась на высоте не более 1 см над препятствием после выключения вентилятора, когда образовывались возвратные потоки.



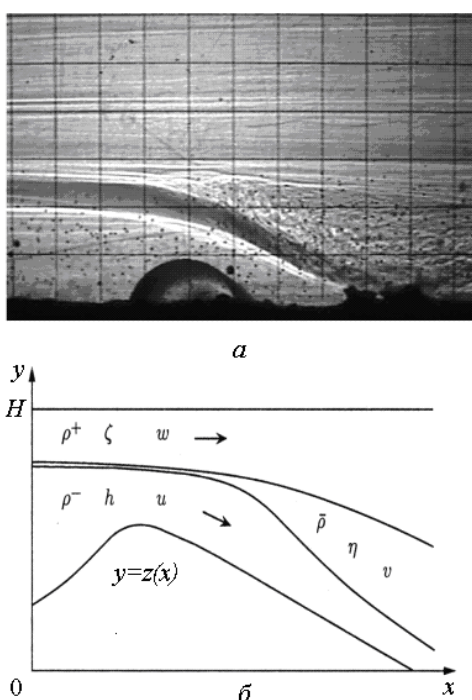
**Рис. 8.** Распределение горизонтальной скорости течения соленой воды на высоте не более 1 см над протяженным препятствием после прекращения действия ветра и образования возвратного потока



**Рис. 9.** Распределения горизонтальной скорости по горизонтальной координате для препятствий разного сечения в зависимости от скорости ветра и радиуса донного препятствия  
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ № 3 2017

Сопоставление вертикальных профилей скорости (горизонтальной составляющей) при обтекании малого и большого препятствий представлено на рис. 9. Скорость обтекания большого препятствия может превышать в несколько раз скорость обтекания малого. Так, при слабом ветре ( $3 - 4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) скорость над большим препятствием могла быть больше в  $2 - 3$ , а иногда в  $6$  раз, чем скорость потока над малой преградой. При сильном ветре ( $7 - 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) отношение скоростей становилось меньше до  $1,5$  раза.

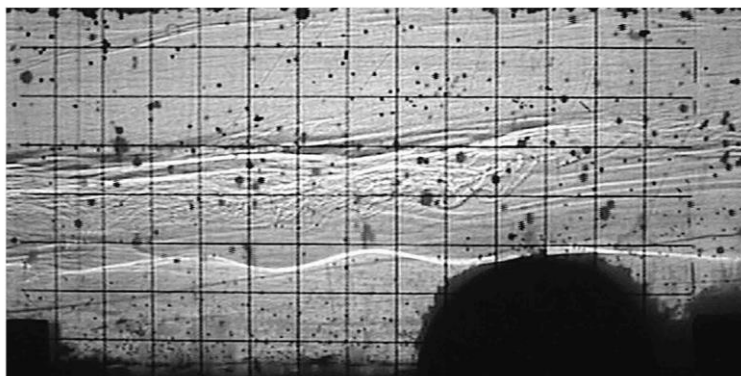
При воздействии слабого ветра ( $4 - 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) на подветренной стороне препятствия наблюдалось формирование слоя смешения (рис. 10) в результате развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Обнаружено, что на начальном этапе толщина слоя смешения увеличивается линейно с увеличением расстояния от вершины препятствия. Далее слой смешения достигает дна, и течение переходит в придонную турбулентную струю. Толщина слоя смешения со временем увеличивается. Такой характер обтекания препятствия можно сопоставить с моделью развития слоя смешения, предложенной в работе [8] для наклонного дна в двухслойном течении смешивающихся жидкостей.



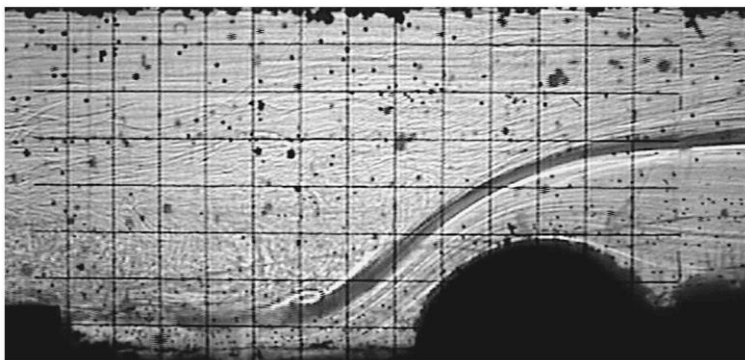
**Рис. 10.** Слой смешения (а) при обтекании препятствия стратифицированным потоком ( $r = 1,4 \text{ см}$ , скорость ветра  $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) и схема его формирования (б) по модели [9]

При проведении экспериментов в канале с большим полуцилиндром на дне наблюдается возникновение волнообразных возмущений за препятствием, причем высота гребней приблизительно равна его высоте (рис. 11, а). В зависимости от скорости ветра может образоваться один или два волновых

гребня. Появление таких возмущений происходит благодаря тому, что при наличии донного препятствия с радиусом  $r$ , равным 2,5 см, что составляет почти 1/3 всей глубины жидкости, происходит «запирание» жидкости вверх по потоку от него, то есть полуцилиндр препятствует дальнейшему распространению придонного потока, толщина которого меньше высоты этого полуцилиндра. Когда высота нагона соленой воды несущественно превышает высоту препятствия, после прекращения действия ветра в противоположную сторону от начала канала движется только перемешанная вода переходного слоя и верхняя часть соленой жидкости. Образовавшийся поток стремится при обтекании занять низшее положение, но сталкивается с соленым слоем, который не движется вследствие «запирания» на препятствии возвратного придонного потока соленой воды. Так как этот поток, отразившись от вертикальной стенки конца канала, изменил направление, то в результате притока соленой воды эти возмущения двигались к препятствию, на котором они и размывались. Можно отметить, что процесс «запирания» становится важным в очень медленных течениях или при наличии препятствий большой высоты.



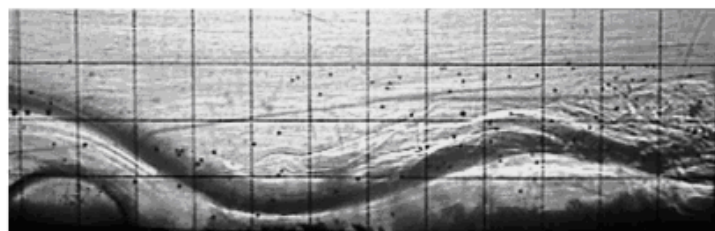
*a*



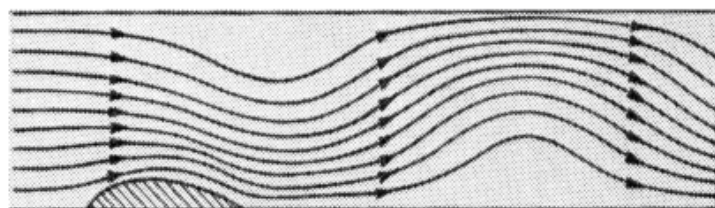
*б*

**Рис. 11.** Образование волновых возмущений за препятствием радиуса  $r = 2,5$  см (*a*) и пристеночного течения при обтекании жидкостью препятствия при скорости ветра  $8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (*б*)

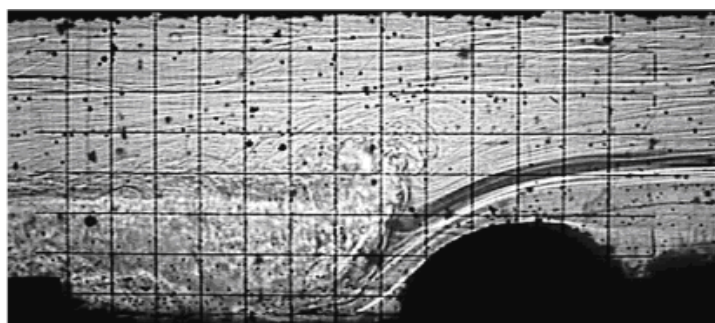
Во время воздействия на жидкость относительно сильного ветра картина существенно изменяется. На подветренной стороне препятствия более тяжелая жидкость всегда стремится занять самое нижнее положение. В проведенных нами экспериментах при сильном ветре, когда нагон соленой воды в начале канала достаточно большой и существенно превышает высоту препятствия, образовывались мощные склоновые потоки (рис. 11, б).



*a*



*б*

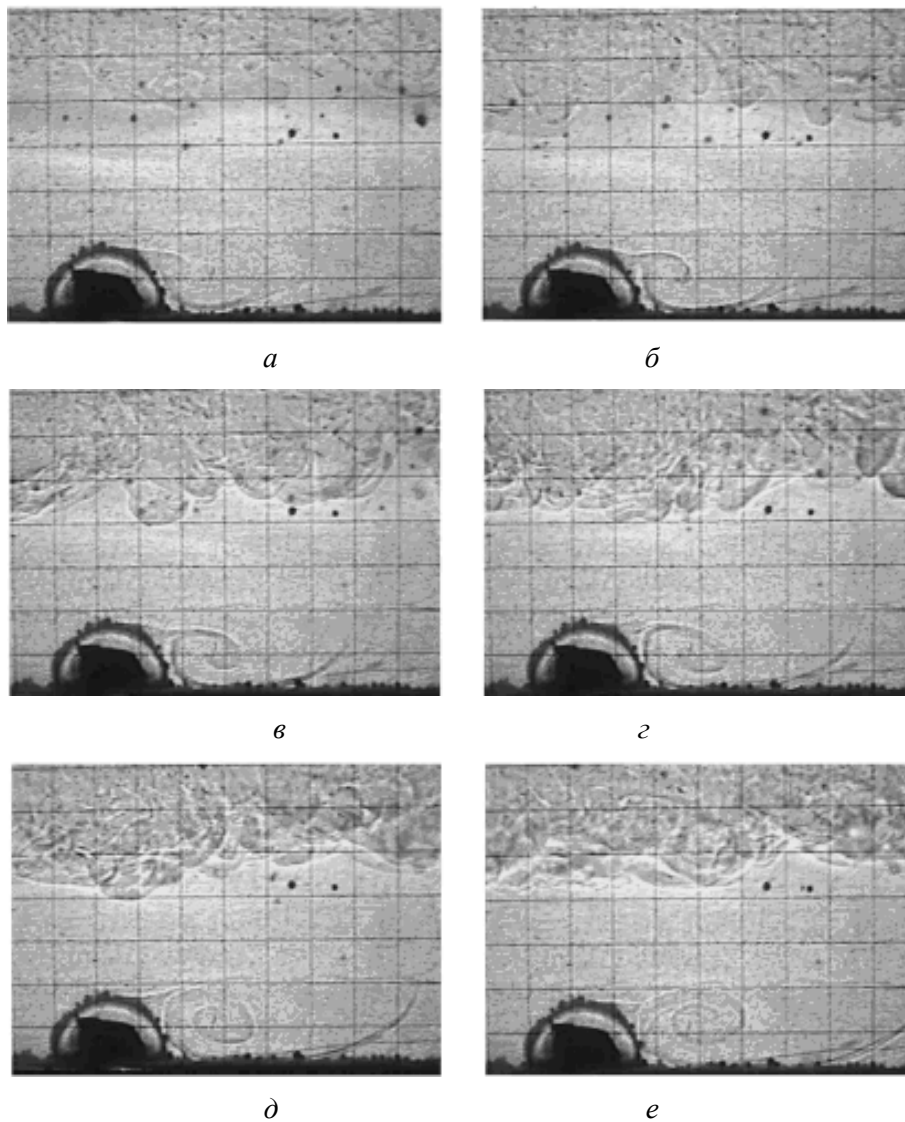


*в*

**Рис. 12.** Обтекание препятствия стратифицированным потоком жидкости: *a* – результаты эксперимента ( $r = 1,3$  см, скорость ветра –  $8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ); *б* – расчет по работе [9]; *в* – структура потока за препятствием и образование слоя смешения ( $r = 2,5$  см, скорость ветра –  $6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ )

При сильном ветре (скорость ветра около  $8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) обтекание малого препятствия стратифицированным потоком сопровождалось изменением положения пикноклина. Так (при неполном перемешивании) сразу после препятствия граница раздела заглублялась до  $0,2$  см, а затем поднималась до  $1,4$  см, образуя «горб» (рис. 12, *a*), который существовал  $\sim 30$  с. Образованный потоком соленой воды «горб» разрушался вследствие того, что он турбулизировался соленой водой, отразившейся от вертикальной стенки начала канала. Подобные колебательные движения наблюдались в работе [9]

при исследовании деформаций линий тока стратифицированного течения после прохождения барьера. Было проведено сопоставление вычисленных в работе [9] линий тока для препятствий различной формы и высоты со структурами течений, которые наблюдались в описанной выше серии лабораторных экспериментов. И хотя эти колебательные движения получились слабее рассчитанных, тем не менее отмечалось соответствие теории и эксперимента.



**Рис. 13.** Образование вихря с горизонтальной осью при обтекании донного препятствия радиуса  $r = 1,3$  см. Представлено шесть кадров видеосъемки (а – е) с временным интервалом 1,25 с

При обтекании большого препятствия скорость потока превышала скорость обтекания малого, верхняя граница соленого слоя теряла устойчивость,

в результате чего поток соленой воды турбулизировался. В то же время на подветренной стороне препятствия наблюдалось образование слоя смешения. Этот слой соединялся с турбулентным потоком, переходя в него. В экспериментах с придонным малым препятствием на его подветренной стороне наблюдалось зарождение и развитие крупного вихря с горизонтальной осью, образованного в результате отрыва пограничного слоя от препятствия (рис. 13). Вихрь образовывался в первые секунды воздействия ветра, когда только зарождалось компенсационное противотечение.

Рассмотрим, влияет ли неровность дна на процессы, которые наблюдались в канале с гладким дном.

Препятствие не влияет на появление неустойчивости на границе раздела, то есть на образование «протуберанцев». Возмущения, образующиеся на границе раздела соленой воды и переходного слоя, испытывали «запирание» вверх по потоку от препятствия, вследствие чего колеблющийся слой не наблюдался.

Как видно из вышесказанного, при наличии неровностей дна картина наблюдаемых процессов усложняется. Было выявлено, что наличие препятствия способствует образованию слоя смешения, возникновению волновых возмущений, деформации пикноклина вблизи препятствия, образованию крупных вихрей с горизонтальной осью. Таким образом, наличие неровностей донной поверхности существенно влияет на поведение стратифицированной жидкости.

**Выводы.** На основании выполненных лабораторных экспериментов можно сформулировать следующие выводы.

В прямолинейном канале при нагоне одним из возможных механизмов обмена на границе между пресным и соленым слоями, направленными в разные стороны, могут быть так называемые «протуберанцы», то есть выбросы соленой воды в верхний пресноводный слой. Они происходят в результате неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. При последующем сгоне возможно появление волнообразных движений на границе слоев, стадии эволюции которых удовлетворительно совпадают со стадиями развития неустойчивости, описанными в работе [7].

Установлено, что при сгонах может образовываться колеблющийся слой – слой максимального градиента плотности, колебания которого распространяются в вышележащие слои. Амплитуда таких колебаний уменьшается при удалении от данного слоя, так что поверхность жидкости остается невозмущенной. Получены количественные характеристики такого колебательного движения: амплитуда колебаний достигает 1,2 см, толщина слоя – 1 см, скорость распространения возмущений вдоль канала составляет 3 – 5 см·с<sup>-1</sup>, а период колебаний – 6 с.

Наличие препятствия на дне усложняет структуру движений в стратифицированной жидкости при сгонно-нагонных движениях жидкости. В частности, оно приводит: к возникновению слоев смешения за препятствием, образованию над препятствием волнообразных возмущений, турбулизации потока за препятствием, резкому изменению положения границы раздела, возникновению крупных вихрей с горизонтальной осью. Обнаружено, что горизонтальная составляющая скорости течения имеет максимум, вершина которого сдвинута



вверх по течению от препятствия. Дано сравнение явлений, наблюдаемых при обтекании при различных режимах ветра и разных сечениях препятствия.

Выражаем благодарность А.Ю. Базыкиной за помощь в подготовке рукописи к печати.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добрецов В.Б. Освоение минеральных ресурсов шельфа. – Л.: Недра, 1980. – 272 с.
2. Безруков Ю.Ф. Колебания уровня и волны в Мировом океане. – Учебное пособие. – Симферополь: ТНУ им. В.И. Вернадского, 2001. – 50 с.
3. Краусс В. Внутренние волны. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 272 с.
4. Helfrich K.R., Melville W.K. Long nonlinear internal waves // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 2006. – 38. – P. 395 – 425. – doi:10.1146/annurev.fluid.38.050304.092129
5. Шелковников Н.К., Алявдин Г.И. Экспериментальное исследование процесса вовлечения в двухслойной жидкости // *Океанология.* – 1982. – 22, вып. 2. – С. 196 – 203.
6. Доценко С.Ф., Шелковников Н.К. Лабораторное моделирование распространения периодических внутренних волн над донными откосами // *Морской гидрофизический журнал.* – 2009. – № 5. – С. 37 – 46.
7. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. – М.: Мир, 1980. – С. 250 – 269.
8. Lipidetskii V.Yu. Mixing layer on the lee side of an obstacle // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* – 2004. – 45, Issue 2. – P. 199 – 203. – doi:10.1023/B:JAMT.0000017582.70655.d9
9. Long R.R. Some aspects of the flow of stratified fluids. 1. A theoretical investigation // *Tellus.* – 1953. – 5, Issue 1. – P. 42 – 58. – doi:http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v5i1.8563

### Laboratory research of the two-layer liquid dynamics at the wind surge in a straight canal

**S.F. Dotsenko**<sup>1</sup>, **N.K. Shelkovnikov**<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

<sup>2</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

\*e-mail: [shelkovnikov@phys.msu.ru](mailto:shelkovnikov@phys.msu.ru)

The results of laboratory experiments in a straight aerohydrocanal of the rectangular cross-section filled with the two-layer (fresh-salty) liquid are represented. The disturbance generator is the air flow directed to the area above the canal. The cases of the two-layer liquid dynamics in the canal with the horizontal flat bottom and in the presence of the bottom obstacle of finite width are considered. It is shown that during the surge in the straight canal, one of the possible mechanisms of exchange on the fresh and salty layers' boundary may consist in the salt water emissions (resulted from the Kelvin-Helmholtz instability) to the upper freshwater layer. The subsequent eviction can possibly be accompanied by occurrence of undulations at the interface. Besides, the evictions can be followed by formation of the oscillating layer, i.e. the layer with maximum density gradient the oscillations of which propagate to the overlying layers.

Presence of the bottom obstacle complicates the structure of the two-layer liquid motions. In particular, it results in emergence of the mixed layers and transformation of the flow behind the obstacle into a turbulent one, formation of the wave-like disturbances over the obstacle, sharp change of the interface position and occurrence of large-scale vortices with the horizontal axes. It is revealed that the maximum peak of the flow velocity horizontal component is shifted upstream from the obstacle.

**Keywords:** waves in fluid, eviction-surges processes, two-layer fluid, vertical exchange, flow around the bottom irregularities, laboratory simulation.