

Экспериментальное исследование трансформации гравитационно-капиллярных волн на течении, индуцированном пузырьковой пленой

С.А. Ермаков^{1,2,3}, И.А. Капустин^{1,2,3}, Т.Н. Лазарева¹, Р.Р. Калимулин^{1,3}

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

² *Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, Россия*

³ *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия*

E-mail: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru

В лабораторных условиях исследованы эффекты трансформации поверхностных гравитационно-капиллярных волн на неоднородном течении, образованном пленой всплывающих пузырьков газа. Исследована структура течений от пузырьковой пелены, показано, что течение характеризуется сильной неоднородностью как в горизонтальном направлении, так и по вертикали, достигая максимума в поверхностном слое толщиной порядка единиц мм. Исследована трансформация гравитационно-капиллярных волн на таком течении, установлено, что длина волны, распространяющейся в область течения, уменьшается, амплитуда волны увеличивается и при определенных условиях возможна блокировка волны.

Ключевые слова: пузырьковая пелена, неоднородные течения, гравитационно-капиллярные волны, блокировка волн.

Введение

Весьма актуальной задачей, успешное решение которой невозможно без применения методов дистанционного зондирования Земли, является обнаружение утечек из подводных газопроводов. Возможность обнаружения всплывающих газовых пузырьков на морской поверхности с использованием радиолокационных методов была показана Булатовым и др. (2001) в ходе модельного эксперимента. Однако при таких утечках область поверхности, соответствующая выходу газовых пузырьков, может быть сравнительно малой и неразличимой на спутниковых изображениях океана, в частности на радиолокационных панорамах. В то же время естественно полагать, что всплывающие газовые пузырьки индуцируют поверхностные течения, которые могут проявляться на спутниковых изображениях за счет эффекта трансформации ветровых волн на таких течениях. На первый взгляд может казаться, что эти течения довольно слабы и не в состоянии эффективно воздействовать на характеристики поверхностного волнения. С другой стороны, в литературе еще в 50-х годах XX в. обсуждался эффект блокировки поверхностных волн, распространяющихся по морской поверхности, за счёт воздействия течений, образованных пленой всплывающих со дна пузырьков (Evans, 1955; Taylor, 1955). В частности, в работе Тэйлора теоретически показано, что наличие течений сильно неоднородных по вертикали приводит при определенных условиях к блокировке («остановке») волн. В экспериментальном плане, однако, влияние пузырькового течения на гравитационно-капиллярные волны практически не исследовано.

Отметим, что рассматриваемая задача является частью общей проблемы изменчивости ветрового волнения в приложении к дистанционному зондированию поверхности океана (Монин, Красицкий, 1985; Alpers, Huehnerfuss, 1988; Lyzenga, Marmorino, 1998; Бондур, 2004). Неоднородность поверхностного волнения может быть связана с различными процессами: турбулентностью, внутренними волнами, пленками поверхностно-активных веществ (ПАВ), неоднородными течениями и др. (Басович, Таланов, 1977; Ермаков, 2010; daSilva et al., 1998; Ochadlick et al., 1992; Ермаков, Капустин, 2010; Ермаков и др., 2013). Для их идентификации необходимо знание механизмов формирования соответствующих неоднородностей волнения в каждом случае.

Целями настоящей работы являются экспериментальное исследование течений, создаваемых пузырьковой пленкой, и анализ трансформации поверхностных волн на таких течениях.

Эксперимент

Эксперименты проводились в кольцевом ветроволновом бассейне ИПФ РАН (рис. 1). Ширина кольца бассейна составляет 30 см. Схема экспериментальной установки в рабочей части бассейна представлена на рис. 2. Уровень воды в бассейне составляет 30 см.

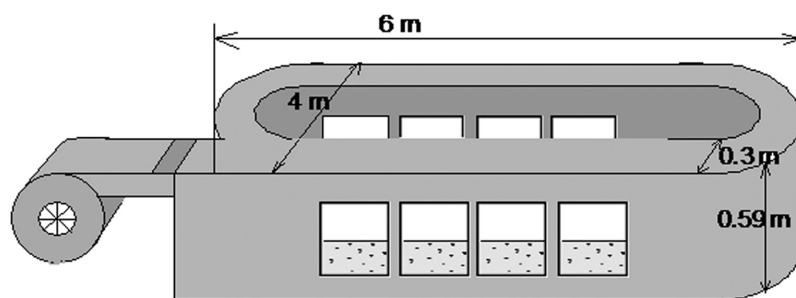


Рис. 1. Схема кольцевого бассейна ИПФ РАН

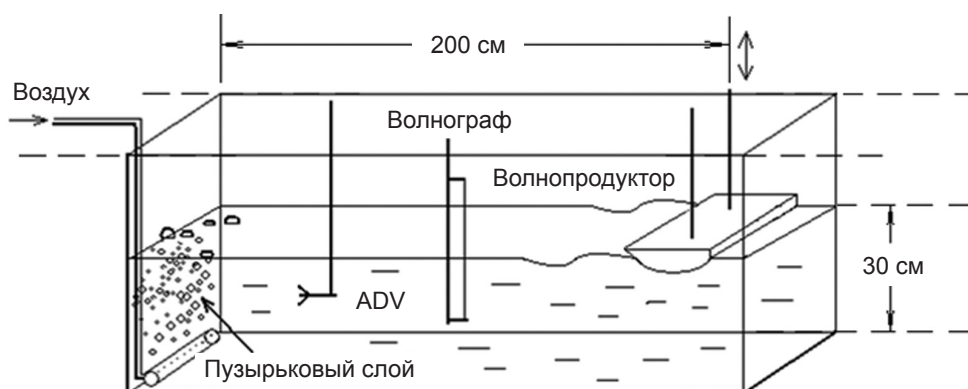


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Источником пузырьков служил отрезок трубки длиной 27 см из поливинилхлорида, запаянный с обоих концов и имеющий 10 отверстий диаметром 0,25 мм, через каждые 2 см. Трубка закреплялась поперек бассейна вблизи дна, и с помощью компрессора в нее

подавался воздух. Давление в трубке подбиралось равным гидростатическому давлению слоя воды 30 см (глубина бассейна), чтобы движение пузырьков происходило только за счет всплытия без начальной скорости. Отсутствие скорости у пузырьков в начальный момент проверялось при горизонтальной ориентации отверстий – пузырьки при этом не имели горизонтальной компоненты скорости.

Всплывающие пузырьки образуют восходящий поток увлекаемой жидкости, переходящий в приповерхностное горизонтальное течение. Измерения течений в толще жидкости проводились с использованием лабораторного акустического доплеровского велосиметра ADV (16-MHz Acoustic Doppler Velocimeter), позволяющего измерять три компоненты скорости жидкости в заданной точке при рассеяния акустического сигнала на специально введенных в воду полимерных частицах нейтральной плавучести со средним диаметром 10 мкм.

Для определения поля скоростей в бассейне зонд ADV устанавливался на различных расстояниях от пузырькового слоя. Измерения проводились через каждые 5 см вдоль бассейна, отсчитывая от пузырьковой пелены, через каждые 3 см по глубине и в четырех плоскостях на разных расстояниях от стенок бассейна, каждое измерение длилось в течение примерно минуты.

В силу конструктивных особенностей использование ADV для измерения скоростей течений было возможно, начиная лишь с глубин около 2–3 мм, поэтому измерение скоростей в верхнем слое жидкости проводилось по данным видеосъемки движения полиэтиленовых частиц с размерами порядка 3 мм, с последующим анализом отдельных кадров видеозаписи (частота кадров 25 Гц).

Для изучения эффектов воздействия неоднородного течения от пузырьковой пелены на поверхностные волны была проведена серия экспериментов, в которых источником волн служил управляемый волнопродуктор (рис. 2). Изменение амплитуды бегущей волны с расстоянием от волнопродуктора регистрировались с помощью струнных волнографов с шагом 10 см. С целью повышения точности определения амплитуды волны измерения проводились в нескольких точках поперек бассейна, в частности, с использованием трехканального волнографа (расстояние между струнами соседних каналов 5 см, рис. 3) с последующим усреднением по поперечной координате. Этот же волнограф при ориентировании вдоль бассейна (рис. 3 б) использовался для определения фазовой скорости волны.

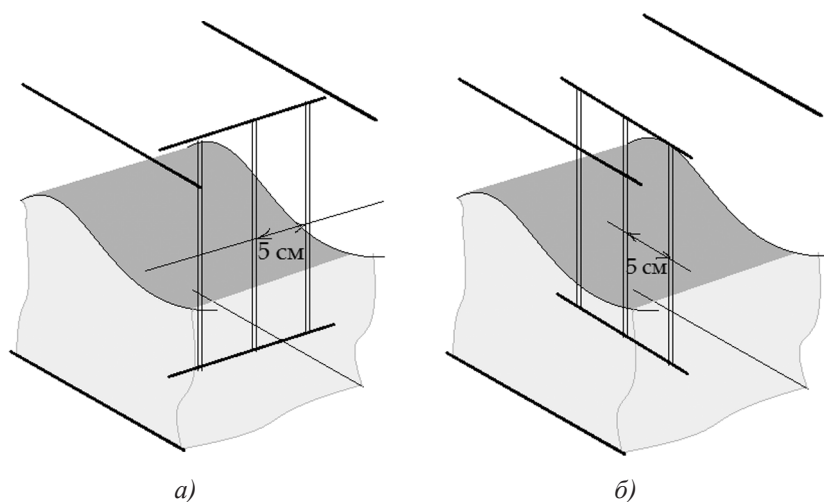


Рис. 3. Трехканальный волнограф

Структура течения, генерируемого всплывающими пузырьками газа

Первая часть экспериментов была направлена на изучение структуры течения, образованного пеленой всплывающих пузырьков. При этом определялись характеристики самого пузырькового слоя и скорости течения жидкости по объему бассейна. Экспериментально установлено, что образованное плоской пузырьковой пеленой (с концентрацией пузырьков порядка 1% и средним диаметром пузырька 4,2 мм) течение имеет структуру в виде двух симметричных вихрей, расположенных по обе стороны пузырьковой завесы. Структура одного вихря представлена на *рис. 4*.

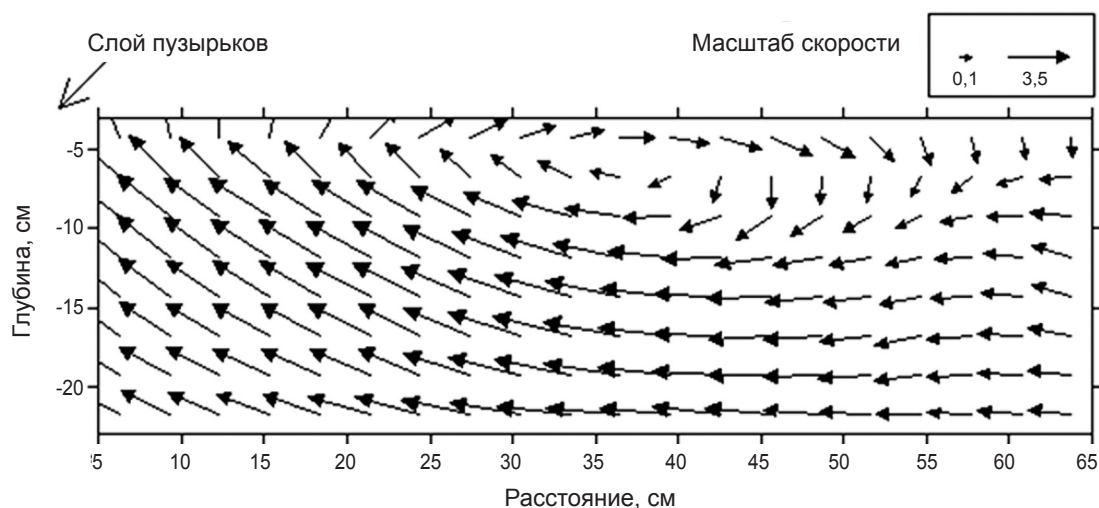


Рис. 4. Поле средних скоростей, создаваемое всплывающими пузырьками воздуха (вид на бассейн сбоку, на врезке – масштаб скоростей в см/с)

Важным результатом оказалось то, что течение сильно неоднородно по вертикали – распределение средних скоростей дает единицы см/с в толще и резкое увеличение до десятков см/с в приповерхностном слое воды в 2 см (*рис. 5*).

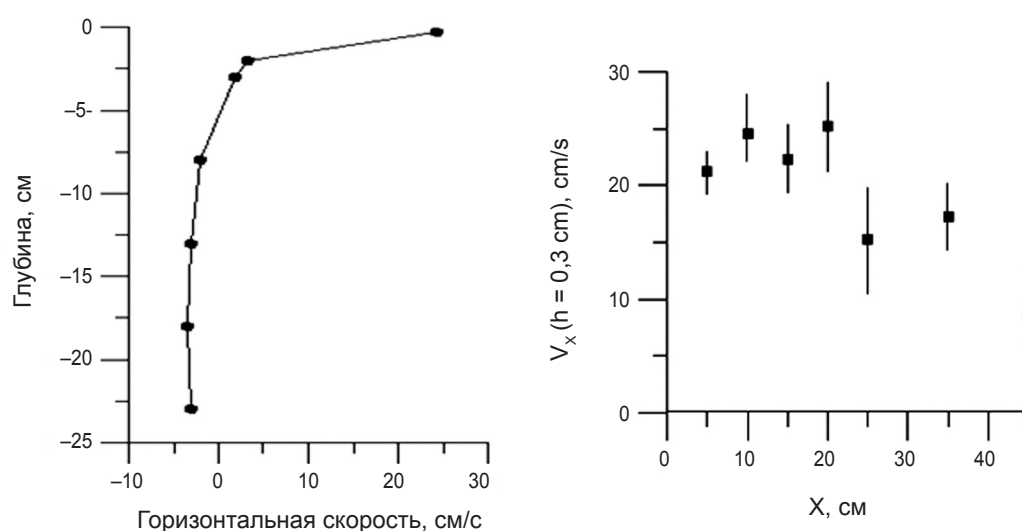


Рис. 5. Распределение горизонтальной составляющей скорости течения по глубине, по горизонтали

Зависимость продольной компоненты средней скорости при удалении от пузырькового слоя также показана на *рис. 5*. Характер неоднородности скорости одинаков для разных глубин, однако, как уже было отмечено, модуль скорости значительно увеличивается при приближении к поверхности.

Таким образом, измеренные в лабораторном эксперименте течения демонстрируют существенную неоднородность в приповерхностном слое. На поверхности максимум продольной компоненты средней скорости находится на расстоянии порядка 20 см от пузырькового слоя, а область максимального градиента скорости от 20 до 40 см.

Трансформация волн на неоднородном течении от пузырьковой пелены

Характер изменения амплитуды 4 Гц волны от расстояния до пузырьковой пелены представлен на *рис. 6*. Положение волнопродуктора отвечает координате 200 см. Значения нормированы на амплитуду вблизи волнопродуктора (самая правая точка на графике). Следует отметить, что пузырьки являются весьма эффективным механизмом выноса поверхностно-активных веществ из толщи воды; образующаяся при этом пленка ПАВ может довольно сильно гасить поверхностные волны и тем самым маскировать эффект влияния неоднородного течения. Влияние пленки, образующейся в результате выноса ПАВ пузырьками, будет исследовано нами отдельно. С целью уменьшения влияния ПАВ на затухание волны перед каждым измерением поверхность воды очищалась фильтровальной бумагой, однако достичь уровня затухания дистиллированной воды даже в отсутствие пузырьков не удалось (*рис. 6*).

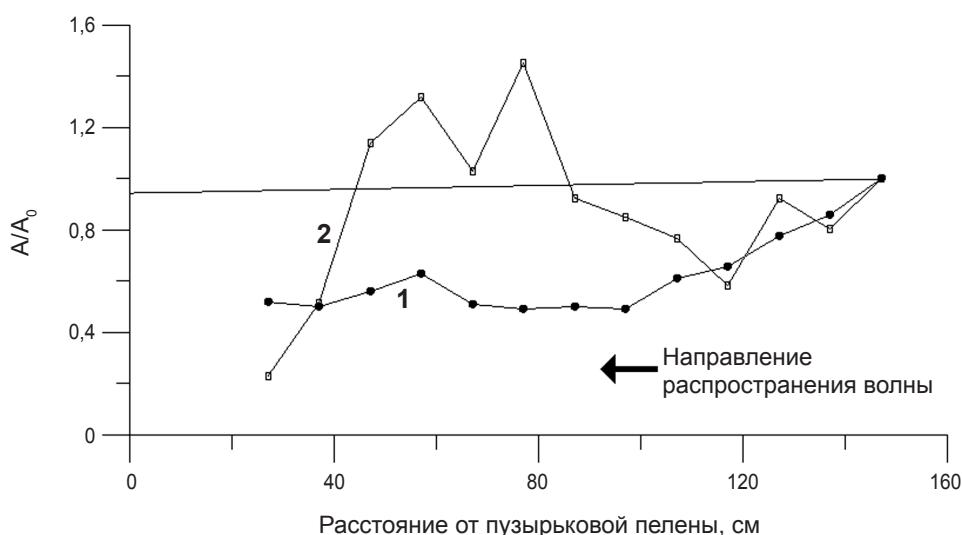


Рис. 6. Зависимость амплитуды 4 Гц волн от расстояния от пузырьковой пелены (волнопродуктор справа), усреднение поперек бассейна по измерениям трех каналов волнографа: сплошная кривая – теоретически рассчитанное затухание на чистой воде; кривая 1 – измеренное затухание в отсутствие течения; кривая 2 – измеренная зависимость для волны, набегающей на встречное течение

Как показывают представленные зависимости, достаточно далеко от пузырьковой пелены, в области слабого *течения*, амплитуда волны уменьшается с расстоянием из-за затухания, обусловленного вязкостью и наличием небольшой «фоновой» пленки. Однако при приближении к пузырьковой пелене в области значительного градиента скорости течения на расстояниях 20–40 см от пелены имеет место заметное (до 50%) возрастание амплитуды волны. Далее амплитуда резко падает – волна блокируется и не проходит далее в область течения.

Для того чтобы нагляднее продемонстрировать эффект воздействия неоднородного течения на волну и устранить эффект вязкого затухания, полученная экспериментальная зависимость была нормирована на значения амплитуды волны в отсутствии течения. Результат представлен на графике (рис. 7), где по горизонтальной оси отложено расстояние от волнопродуктора в логарифмическом масштабе, а по вертикали – относительные значения амплитуды волн. Для наглядности также представлен горизонтальный профиль изменения скорости встречного течения. При этом на графиках волнопродуктор имеет координату 0, а пузырьковая пелена – 200 см.

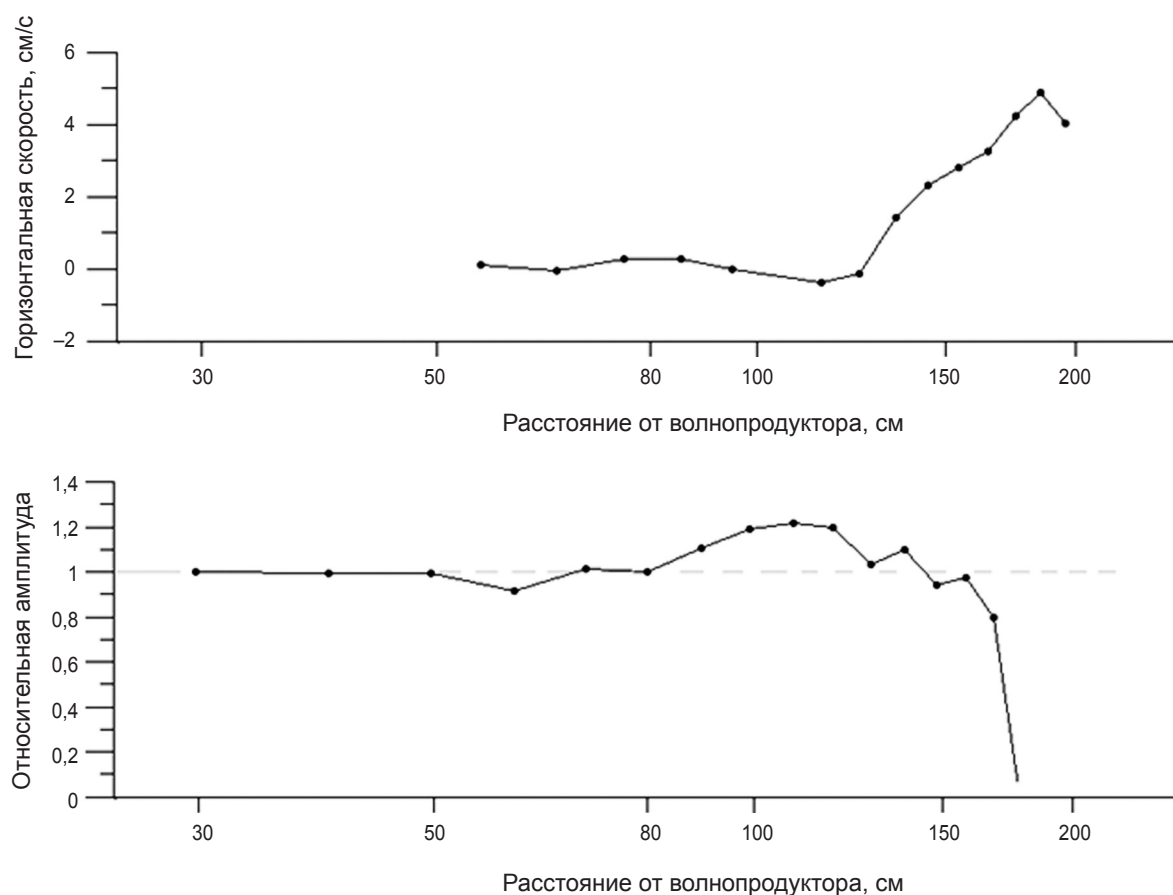


Рис. 7. Трансформация поверхностных волн под действием течения (верхний график иллюстрирует распределение горизонтальной составляющей скорости самого течения)

Измерения изменений длины волны, набегающей на встречное течение, проводились с использованием трехканального волнографа (см. выше) по разности фаз сигналов разных каналов. Полученная таким способом зависимость длины волны от расстояния до пузырьковой пелены приведена на рис. 8 (кривая 1).

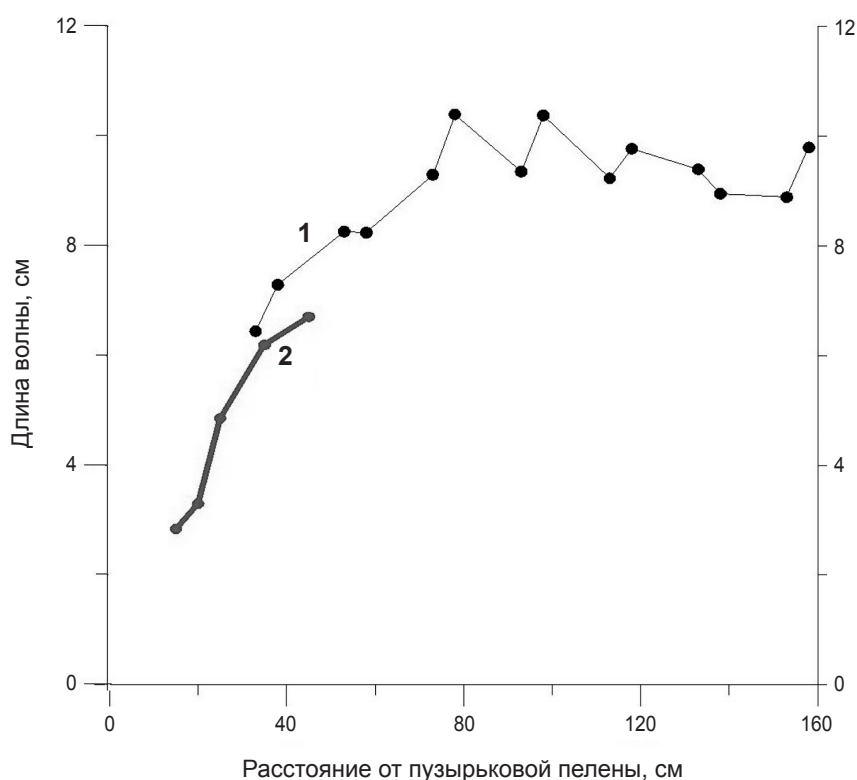


Рис. 8. Зависимость длины волн от расстояния от пузырьковой пелены (волнопродуктор справа): кривая 1 – экспериментальная зависимость; кривая 2 – теоретическая зависимость

Теоретические оценки изменения длины волны проводились в рамках упрощенной модели постоянного по глубине течения с использованием дисперсионного соотношения для поверхностных волн на неоднородном течении вида:

$$\omega = \sqrt{gk} + kU(x), \quad (1)$$

где $U(x)$ – скорость течения в точке с координатой x ; k – волновое число. При расчетах бралась скорость в верхнем слое в 3 см, усредненная по глубине. Из (1) легко найти зависимость длины волны ($\lambda = 2\pi/k$) от величины скорости течения:

$$\lambda = \frac{8\pi U^2}{(\sqrt{g + 4U\omega} - \sqrt{g})}. \quad (2)$$

Теоретическая зависимость (2) представлена на рис. 8 (кривая 2), откуда видно, что полученные экспериментальные значения в принятом приближении находятся в удовлетворительном согласии с теорией.

Приведем теперь оценки эффекта воздействия течения, индуцируемого всплывающими пузырьками на мелкомасштабные ветровые волны и, соответственно, возможные контрасты проявления такого течений в радиолокационных сигналах.

Будем полагать, что масштаб области неоднородного поверхностного течения при достаточно сильной утечке газа составляет десятки метров. Оценим вариации спектральной интенсивности ветровой ряби с характерными длинами порядка 1,5–3 см, т.е. типичной Брэгговской ряби в условиях радиолокационного зондирования в X-диапазоне при

умеренных углах падения. При таких условиях характерный масштаб L поверхностного течения изменения скорости течения велик по сравнению с пространственным масштабом релаксации волнения c_g/β_r , где β_r – временной масштаб релаксации, имеющий порядок ветрового инкремента роста волны, а c_g – групповая скорость волны. Тогда для относительной вариации спектра волнения (контраста) K , обусловленной кинематическим механизмом модуляции, имеем (Ермаков, 2010)

$$K = -\frac{1}{\beta_r} \frac{\partial \ln N_0}{\partial \ln k} \frac{dU(x)}{dx}, \quad (3)$$

где N_0 – невозмущенный течением спектр мелкомасштабных ветровых волн с волновым числом k (для оценок рассматривается одномерная задача). Как следует из последнего выражения, волны усиливаются в области отрицательного градиента скорости; при попутном с течением распространении волн они усиливаются в области замедления течения, при распространении волн навстречу течению усиление происходит при условии возрастания величины скорости. При скоростях ветра 3–4 м/с, масштаб релаксации для ветровых волн с указанными выше длинами имеет порядок 0,5 с. Полагая, что градиент скорости течения, индуцируемого пузырьками, $\sim 0,05 \text{ с}^{-1}$, $\partial \ln N_0 / \partial \ln k \approx 4$, получим, что контраст в спектре ветровых волн составляет величины порядка 40%. Соответственно, такого же порядка следует ожидать и величины радиолокационных контрастов при наклонном зондировании зон утечек из газопроводов. Данная оценка сделана в предположении вариаций в спектре свободной (линейной) ветровой ряби. В действительности Брэгговские волны, наряду со свободными волнами, содержат и вынужденную (паразитную) рябь, генерируемую более длинными дециметровыми волнами, интенсивность паразитной ряби нелинейно зависит от амплитуды несущих дециметровых волн. Поэтому, если на течении от всплывающих пузырьков имеет место заметная трансформация дециметровых волн, это дает дополнительную (достаточно сильную) модуляцию паразитной ряби. Хотя в настоящее время модели модуляции паразитной ряби на течениях пока не развиты, можно утверждать, что вариации интенсивности радиолокационного сигнала в области рассматриваемого неоднородного течения могут превышать приведенные выше значения контраста. Данные оценки позволяют полагать, что области утечек из газопроводов вполне могут быть детектированы по эффектам трансформации мелкомасштабных ветровых волн на течениях, индуцируемых всплывающими пузырьками газа.

Основные результаты

Экспериментальное исследование неоднородных течений, связанных со всплывающими пузырьками газа, и воздействия этих течений на поверхностные волны позволило получить следующие результаты.

1. В ходе измерения поля скоростей, создаваемого всплывающими пузырьками воздуха, получено, что среднее течение имеет «роликовую» структуру; причем распределение скоростей сильно неоднородно как по вертикали, так и по горизонтали (течение «прижато» к поверхности).

2. Экспериментально зафиксированы эффекты трансформации поверхностных волн под действием встречного неоднородного течения верхнего слоя жидкости, генерируемого пеленой всплывающих пузырьков, в том числе эффект непропускания волн определенной частоты в области максимума горизонтальной составляющей скорости течения и эффект усиления волны.

3. Экспериментально получена зависимость длины волны от расстояния до пузырьковой пелены, измеренная длина волны удовлетворительно описывается простым дисперсионным соотношением для поверхностных волн на течении, усредненном по глубине волнового слоя.

4. Даны оценки контрастов в спектре ветровых волн и соответствующие радиолокационные контрасты, указывающие на реальную возможность диагностики течений, индуцируемых всплывающими газовыми пузырьками, например, связанных с утечками их подводных газопроводов.

Авторы благодарны рецензенту за ценные замечания, учет которых позволил повысить качество работы. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-05-31237, 11-05-00295, 12-05-31363, 13-05-97058, 13-05-97043), Программа РАН «Современные проблемы радиофизики» и Правительства РФ (Гранты № 11.G34.31.0078, 0048).

Литература

1. Басович А.Я., Таланов В.И. О трансформации коротких поверхностных волн на неоднородных течениях // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. № 7. С. 766–733.
2. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т. 11. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. С. 55–117.
3. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Литовченко К.Ц., Пунгин В.Г., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Скворцов Е.И. Собственное и рассеянное излучение морской поверхности, возмущаемой потоком газовых пузырьков // ДАН. 2001. Т. 380. № 6. С. 1–4.
4. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
5. Ермаков С.А., Капустин И.А. Экспериментальное исследование расширения турбулентного следа надводного судна // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 565–570.
6. Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Сергеевская И.А., Андриянова Н.В. О возможностях радиолокационной диагностики зон эвторфирования водоемов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 336–343.
7. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
8. Alpers W., Huehnerfuss H. Radar signatures of oil films floating on the sea surface and the Marangoni effect // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. No. C4. P. 3642–3648.

9. *Da Silva J.C., Ermakov S.A., Robinson I.S., Jeans D.R.G., Kijashko S.V.* Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf. 1. Short-period internal waves // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. No. C4. P. 8009–8031.
10. *Evans J.T.* Pneumatic and similar breakwaters // *Proc. Roy. Soc.*, 1955. P. 457–466.
11. *Lyzenga D.R., Marmorino G.O.* Measurements of surface currents using sequential synthetic aperture radar images of slick patterns near the edge of the Gulf Stream // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. No. C9. P. 18769–18777.
12. *Ochadlick A.R., Cho P., Evans-Morgis J.* Synthetic aperture radar observations of currents collocated with slicks // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. No. C4. P. 5325–5330.
13. *Taylor, Sir Geoffrey* The action of a surface current used as a breakwater. // *Proc. Roy. Soc.*, 1955. P. 466–478.

Experimental study of transformation of gravity-capillary waves due to a current induced by a bubble sheet

S.A. Ermakov^{1,2,3}, I.A. Kapustin^{1,2,3}, T.N. Lazareva¹, R.R. Kalimulin^{1,3}

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

² *Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia*

³ *Lobachevsky's Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru

Effects of transformation of gravity-capillary waves on nonuniform currents induced by rising bubbles are investigated in wave tank experiment. Structure of these currents is analyzed, the currents are characterized by strong inhomogeneity both in horizontal and vertical directions, achieving a maximum in a surface water layer of some mm thickness. Transformation of gravity-capillary waves due to the currents is studied, it is obtained that the length of the wave propagating in the area of the current decreases while the amplitude increases, and wave blocking occurs at certain conditions.

Keywords: bubble sheet, nonuniform currents, gravity-capillary waves, wave blocking.