

УДК 551.556.4

© Д. В. Вострякова^{1,2*}, И. А. Капустин^{1,2}, Т. Н. Лазарева¹, О. А. Даниличева^{1,2}, С. А. Ермаков^{1,3}, 2022

¹Институт прикладной физики РАН, 603950, ул. Ульянова, 46, г. Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, Россия

³Волжский государственный университет водного транспорта,
603950, ул. Нестерова, 5, г. Нижний Новгород, Россия

*vostryakova@ipfran.ru

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОЙ ПЛЕНКИ И ТРАНСФОРМАЦИИ ЕЕ ГРАНИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

Статья поступила в редакцию 31.01.2022, после доработки 08.04.2022, принята в печать 02.05.2022

Аннотация

Представлены результаты лабораторного эксперимента, посвящённого моделированию механизмов локализации пленки поверхностно-активного вещества под действием периодических поверхностных волн. Было показано, что область пленки, поджатой поверхностной волной, условно делится на три части: плотная пленка на наибольшем удалении от источника волн, область «разреженной» пленки и область относительно чистой поверхности воды. Основное внимание было уделено процессам, происходящим в области «разреженной» пленки — переходной области от чистой воды к плотной поджатой волнами пленке, где регистрировались горизонтальные циркуляционные движения. В зависимости от амплитуды волны наблюдался различный характер течений: дивергентные циркуляционные ячейки при малых и больших амплитудах волн и роликовые течения, образующие зону конвергенции на оси бассейна при средних амплитудах. Сравнение экспериментально полученного стационарного распределения концентрации поверхностно-активных веществ с развитой ранее моделью компрессии пленок поверхностными напряжениями, вызванными волнами, показало удовлетворительное согласие теории и эксперимента при малых и относительно больших амплитудах волн. Выявленное расхождение при средних амплитудах волн в области «разреженной» пленки объясняется наличием циркуляционных ячеек, которые рассматриваемая модель не учитывает.

Ключевые слова: пленки ПАВ, компрессия, индуцированные течения, циркуляционные ячейки, конвергенция, стационарное распределение концентрации пленки

© D. V. Vostryakova^{1,2*}, I. A. Kapustin^{1,2}, T. N. Lazareva¹, O. A. Danilicheva^{1,2}, S. A. Ermakov^{1,3}, 2022

¹Institute of Applied Physics RAS, 603950, Ulyanova Str., 46, Nizhny Novgorod, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950, Gagarin Avenue, 23, Nizhny Novgorod, Russia

³Volga State University of Water Transport, 603950, Nesterova Str., 5, Russia, Nizhny Novgorod

*vostryakova@ipfran.ru

LABORATORY STUDY OF SURFACTANT FILM COMPRESSION AND BOUNDARY TRANSFORMATION UNDER THE ACTION OF SURFACE WAVES

Received 31.01.2022, Revised 08.04.2022, Accepted 02.05.2022

Abstract

In this paper we present the results of a laboratory experiment simulating the mechanisms of a surfactant film localization under the action of periodic surface waves. It is shown that the film compressed by a surface wave, can be conditionally divided into three sections — the dense film region as the most distant from the wave source, the area of a diluted film and the region of relatively clean water. The paper is focused on the processes occurring in the diluted film region characterized by the transition from clean water to the dense film, where horizontal circulation currents are registered. The character of currents is varying depending

Ссылка для цитирования: Вострякова Д.В., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Даниличева О.А., Ермаков С.А. Лабораторное исследование компрессии поверхностно-активной пленки и трансформации ее границы под действием поверхностной волны // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 63–73. doi:10.48612/fpg/xk62-mm5t-flhph
For citation: Vostryakova D.V., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Danilicheva O.A., Ermakov S.A. Laboratory Study of Surfactant Film Compression and Boundary Transformation under the Action of Surface Waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 63–73. doi:10.48612/fpg/xk62-mm5t-flhph

on the wave amplitude so that the divergent circulation cells occur at small and large wave amplitudes, but at medium amplitudes the roller currents forming a convergence zone on the basin axis are observed. The experimentally obtained stationary distribution of surfactant concentration is compared with the previously developed model of film compression due to surface tension induced by waves. The comparison shows good agreement between the theory and the experimental results at small and large wave amplitudes. Their discrepancy at medium wave amplitudes in the diluted film region is presumably related to the presence of convergent cells which are not considered in the model.

Keywords: surfactant films, compression, induced flow, circulation cells, convergence, stationary distribution of film concentration

1. Введение

Для уменьшения ущерба, возникшего в результате распространения загрязнений на поверхности океана, представляющих собой разливы нефтепродуктов, сточные воды, бытовые и промышленные отходы, необходимо развитие методов быстрого своевременного реагирования на такие происшествия. В настоящее время методы дистанционного зондирования являются одним из наиболее перспективных инструментов для диагностики поверхности Мирового океана, в частности, для обнаружения загрязнений антропогенного и биогенного происхождения [1]. Такие загрязнения на поверхности воды зачастую маркируются пленкой поверхностно-активного вещества (ПАВ), которая гасит короткие ветровые волны и образует выглаженные области — так называемые слики [2]. Для эффективной организации работ по ликвидации таких загрязнений, в особенности разливов нефтепродуктов, которые представляют значительную угрозу для окружающей среды, необходимы прогнозы распространения и растекания таких пленочных сликов.

Как известно, на геометрию и дрейф сликов на поверхности воды влияет множество факторов и процессов, которые необходимо учитывать при прогнозировании их распространения, и к которым относятся, в частности, приповерхностный ветер, течения [3, 4], поверхностные и внутренние волны [5], температура окружающей среды [6] и пр. Эти факторы влияют на физико-химические процессы (растекание, испарение, растворение, эмульгирование) в пленке и, как результат, на ее характеристики (вязкость, плотность, поверхностное натяжение и т.д.) [7]. Поскольку одновременный учет всех факторов при моделировании распространения пленочного пятна затруднителен, то в известных моделях разливов нефти [8] чаще всего рассматриваются воздействия на слик течений, волн, ветра. При этом базовой моделью при описании процесса растекания является модель Фэя [9, 10] или ее аналоги, которые описывают осесимметричное растекание плёнки на спокойной не взволнованной поверхности воды. Влияние же волнения на слик обычно учитывается только при расчёте его дрейфа как целого (см. [8] и цитируемую там литературу). Отличие модели, представленной в работах [11, 12] от моделей, рассмотренных в [8], заключается в учете влияния ветрового волнения на процессы растекания сликовых пятен. За счет затухания коротких ветровых волн в области плёнки возникают дополнительные поверхностные напряжения, которые замедляют растекание разлива в поперечном относительно ветра направлении и увеличивают скорость растекания в продольном направлении [12]. Учитывая сложности проведения натурных исследований динамики пленок, важную роль играет контролируемый лабораторный эксперимент. Подчеркнем, однако, что к настоящему времени проверка предложенной модели в лабораторных условиях отсутствует.

В настоящей работе представлены результаты лабораторных экспериментов, моделирующих процесс компрессии пленки ПАВ под действием поверхностных волн, индуцирующих средние течения, включающие в себя стоков дрейф и дрейф из-за вязкого затухания волн. Проведено сравнение результатов лабораторного эксперимента с выводами модели компрессии поверхностных пленок для наиболее простого случая поверхностных квазимонохроматических волн [11–13], т.е. в отсутствие непосредственного воздействия ветра на пленку и на волнение.

2. Эксперимент

Лабораторные эксперименты проводились в овальном ветроволновом бассейне ИПФ РАН с двумя прямыми секциями, одна из которых, с геометрическими размерами 2 м в длину и по 30 см в широту и в глубину, являлась рабочей областью. Схема установки и вид сверху на рабочую секцию бассейна показаны на рис. 1.

По краям рабочей области устанавливались две наклонные плоскости, которые служили для локализации пленки и одновременно являлись волногасителями (коэффициент отражения волн не более 0,07). Источником поверхностных волн служил механический волнопродуктор, с помощью которого осуществлялась генерация волн частотой 4 Гц, амплитуды которых регистрировались струнным волнографом. Для создания пленок ПАВ использовались спиртовые растворы олеиновой кислоты (OLE), наносившиеся с помощью капельницы на поверхность воды. Эксперименты проводились вначале на чистой поверхности,

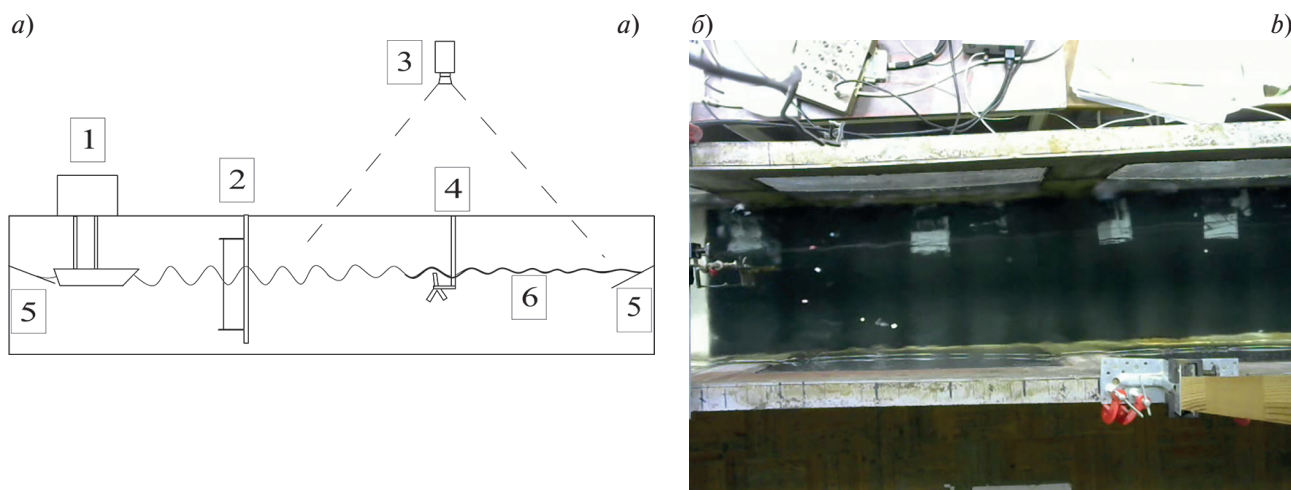


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Вид сбоку: 1 — волнопродуктор, 2 — волнограф, 3 — видеокамера, 4 — ADV, 5 — волногаситель, 6 — пленка OLE (а). Фотография — вид на бассейн сверху (б)

Fig. 1. Experimental setup. Side view: 1 — wave maker, 2 — wave recorder, 3 — video camera, 4 — ADV, 5 — wave damper, 6 — OLE film (a). Photo — view of the pool from above (b)

а затем на поверхности воды, покрытой пленкой OLE с концентрацией $0,51 \text{ мг/м}^2$. Для измерения направления и скорости течений вблизи границы пленки использовался акустический доплеровский измеритель скорости (ADV SonTek 16 MHz) [14], размещаемый на глубине 2 см от поверхности воды. Датчик перемещался в поперечном направлении бассейна от одной его стенки к другой. В результате усреднения данных ADV строились зависимости скоростей от местоположения датчика в поперечном сечении бассейна.

Генерируемые поверхностные волны приводили к дрейфу пленки в направлении распространения волн и ее сжатию. В результате около волнопродуктора образовывалась очищенная от пленки область, а с противоположной стороны у волногасителя происходило концентрирование ПАВ. На поверхность воды наносились частицы, маркирующие поверхностный дрейф (цветные бумажные частицы размером 5 мм и частицы талька). Процессы сжатия пленки ПАВ и движение маркеров непрерывно регистрировались установленной над бассейном видеокамерой (см. фото на рис. 1, б), на рис. 2 представлены два характерных варианта распределения талька под действием индуцированных волнами течений при различных амплитудах волн и в разные моменты времени. Обработка видеозаписей включала в себя оцифровку траектории движения маркеров и распределения талька в программе Surfer 7.0 (13.0.383).

Вторая часть эксперимента состояла в исследовании квазистационарного распределения концентрации пленки ПАВ на поверхности воды в бассейне. Для этого с поверхности воды, покрытой поджатой волнами пленкой, одновременно отбиралось 5 сеточных проб [2]. Далее взятые сетками образцы ПАВ смывались специально очищенным этиловым спиртом, и характеристики пленки ПАВ исследовались с помощью метода параметрически возбуждаемых волн [2]. В ходе этих исследований измерялись длины стоячих гравитационно-капиллярных волн (ГКВ), параметрически возбуждаемых на поверхности воды в вертикально осциллирующей кювете — «ряби Фарадея». С использованием дисперсионного соотношения для ГКВ восстанавливались значения коэффициента поверхностного натяжения (КПН). Измерения производились для трёх значений амплитуды волн: $A = 0,17 \text{ см}$, $A = 0,35 \text{ см}$, $A = 0,42 \text{ см}$. На каждую амплитуду приходилось по две серии экспериментов с пробами. В ходе дальнейшей обработки строились зависимости КПН от расстояния от границы поджатой пленки, определяемой по замедлению маркеров.

3. Результаты экспериментов

3.1. Стационарное распределение пленки ПАВ

Результаты обработки видеозаписей — траектории бумажных маркеров, цветовые поля продольной компоненты скорости дрейфа, границы пленки (красная линия) при различных амплитудах волны частотой 4 Гц — представлены на рис. 3. Местоположение красной линии (тальк) соответствует области, в которой резко уменьшалась скорость дрейфа, отвечая границе области значительного цветового контраста на рис. 3.

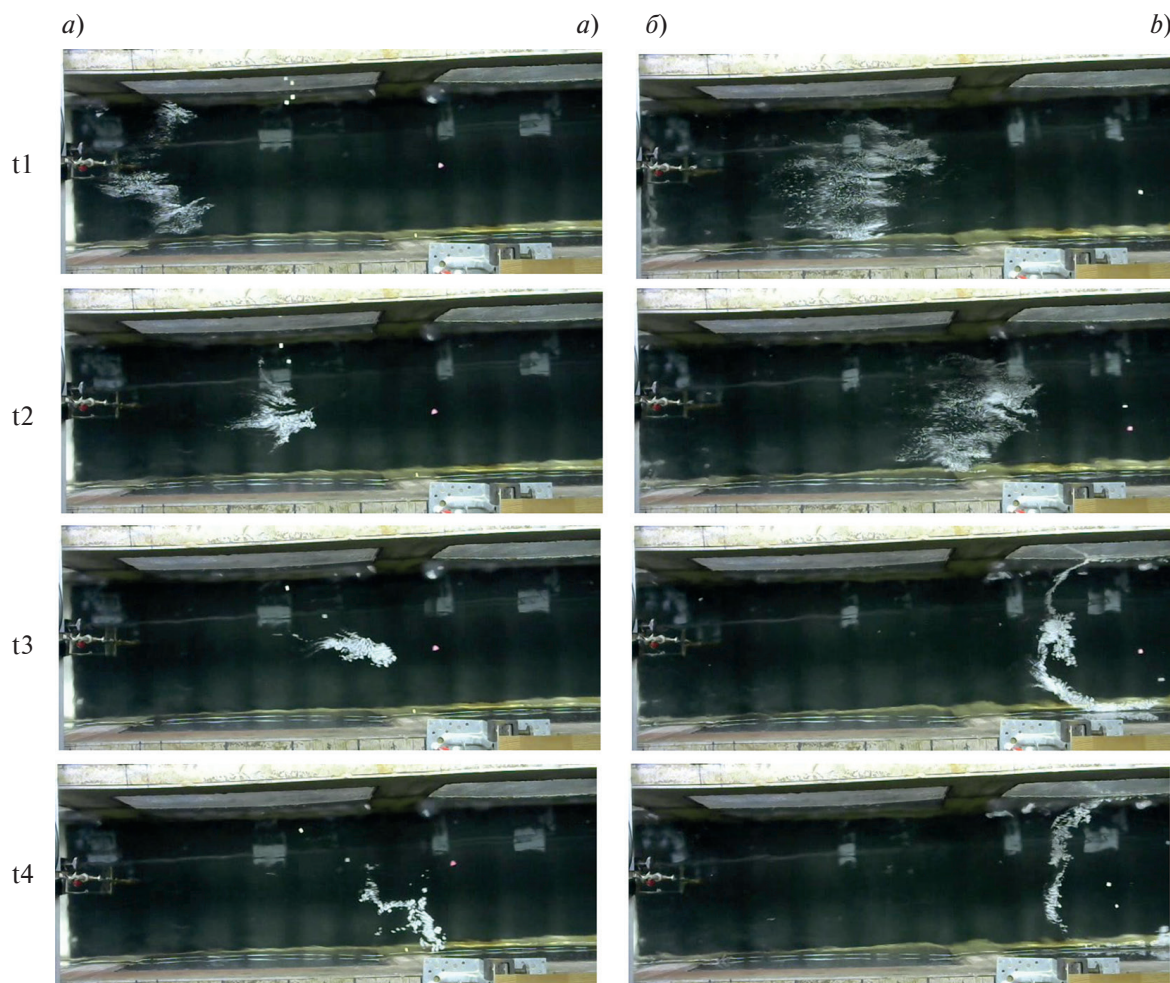


Рис. 2. Перераспределения талька волнами различных амплитуд: $A = 3,0$ мм (а), $A = 4,5$ мм (б).

Fig. 2. The talc redistribution due to the surface waves of different amplitudes: $A = 3.0$ mm (a), $A = 4.5$ mm (b)

Как видно из рис. 3, рабочую область можно условно разделить на три части. Вблизи волнопродуктора из-за сноса большей части пленки индуцированным дрейфом формируется зона практически чистой воды, где маркеры движутся относительно быстро и прямолинейно. Скорости в этой области порядка скорости суммарного дрейфа (стоксова дрейфа и дрейфа из-за вязкого затухания волн), характерные значения приведены в таблице 1. У волногасителя с противоположной стороны от волнопродуктора формируется «плотная» пленка, здесь имеет место сильное гашение поверхностных волн. При переходе от чистой поверхности к «плотной пленке» формируется переходная область «разреженной пленки», в которой наблюдается уменьшение скорости дрейфа и амплитуды волн по сравнению с чистой поверхностью, кроме того, в этой области присутствуют сложные вихревые движения маркеров. Так формируется квазистационарное распределение пленки в поле волнового дрейфа.

В ходе множества экспериментов при генерации поверхностных волн было замечено, что в бассейне могут возникать случайные неконтролируемые течения, природа которых до конца не ясна. Такие течения приводят к неоднородности пленки в рабочей области бассейна. В некоторых случаях при малых, реже при средних амплитудах происходили разрывы пленки, при этом попавшие в эту область частицы ускорялись (например, рис. 3, а–б). Прохождение частиц в разрывы пленки учитывалось как часть ошибки при определении границы пленки (ее изрезанности) и ввиду относительной редкости события разрыва эта ошибка была незначительной.

В результате обработки поверхностных проб было исследовано стационарное распределение пленки ПАВ на поверхности воды в бассейне при различных амплитудах волн. Зависимости КПН поверхности от расстояния от границы пленки представлены на рис. 4. Ошибка определения границы пленки, возникающая вследствие ее изрезанности, не превышает 11 %, ошибка определения КПН составила менее 15 %.

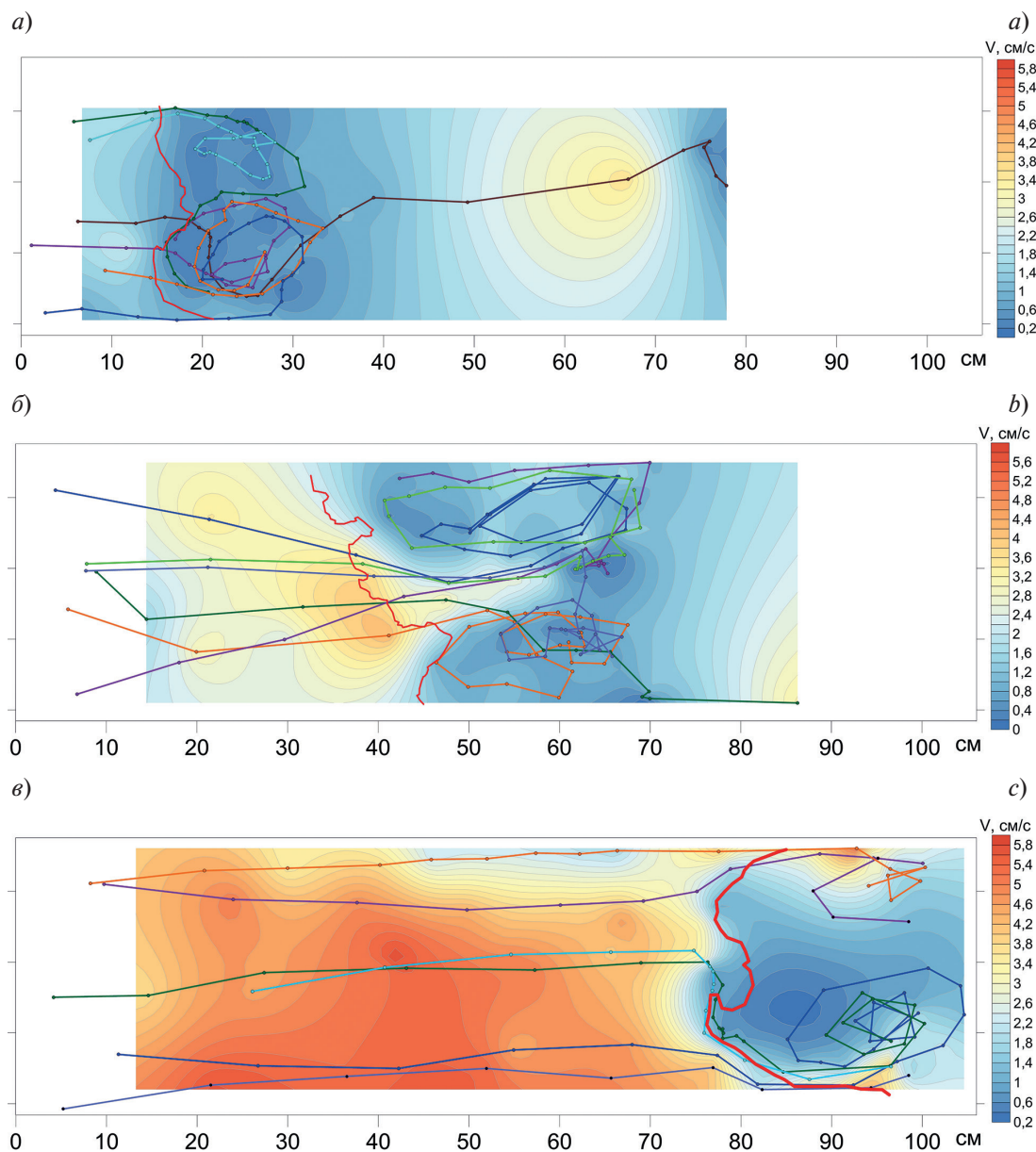


Рис. 3. Примеры траекторий маркеров, пространственное распределение продольных скоростей, границы пленки для волны 4 Гц, концентрации пленки $0,51 \text{ мг/м}^2$ для трех значений амплитуды волны: $A = 0,23 \text{ см}$ (а), $A = 0,3 \text{ см}$ (б), $A = 0,45 \text{ см}$ (в)

Fig. 3. Examples of particle trajectories, longitudinal velocity color fields, film edge for a 4 Hz wave. The film concentration is 0.51 mg/m^2 . Wave amplitudes: $A=0.23 \text{ cm}$ (a), $A=0.3 \text{ cm}$ (b), $A=0.45 \text{ cm}$ (c)

Таблица 1

Table 1

Значения скоростей дрейфа для амплитуд, представленных на рис. 3

The drift velocities for the amplitudes shown in Fig. 3

A, см	$V_{\text{эксп}}, \text{ см/с}$	$V_{\text{теор}}, \text{ см/с}$
а) 0,23	1–1,4	1,2
б) 0,3	2,2–2,6	1,9
в) 0,45	4,2–5	4,4

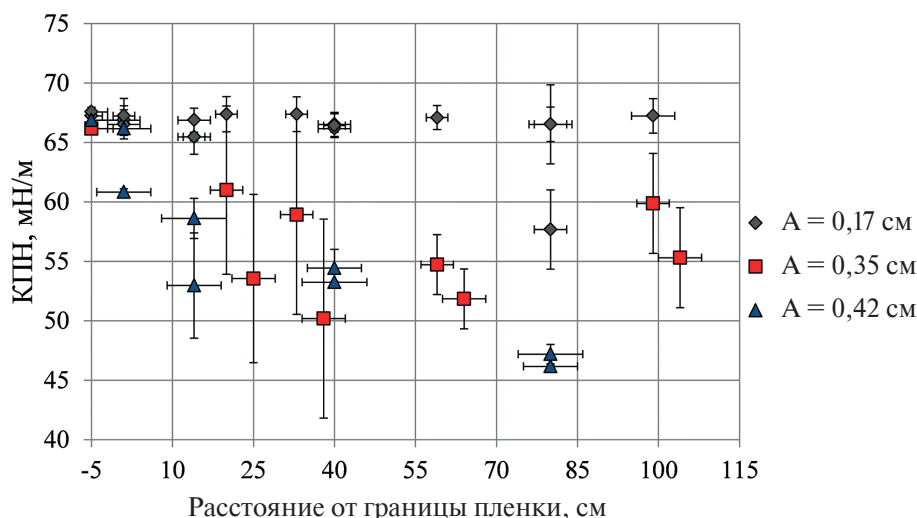


Рис. 4. Экспериментальные значения КПН в зависимости от расстояния от границы пленки. Частота волны 4 Гц, амплитуды: $A = 0,17$ см (ромбы), $A = 0,35$ см (квадраты), $A = 0,42$ см (треугольники)

Fig. 4. Experimental values of the surface tension coefficient as a function of the distance from the film edge. The wave frequency is 4 Hz, amplitudes: $A = 0.17$ cm (rhombus), $A = 0.35$ cm (square), $A = 0.42$ cm (triangle)

На рис. 4 условной границе пленки отвечает расстояние 0 см. По мере распространения волн в область пленки наблюдается уменьшение КПН, что соответствует росту концентрации ПАВ за счет поджатия волнами. Следует отметить, что при малой амплитуде волн область, покрытая ПАВ, занимала практически все рабочее пространство бассейна, концентрация пленки была не велика и измеренные значения КПН были близки между собой независимо от расстояния от волнопродуктора, что, видимо, способствовало образованию разрывов пленки.

3.2. Приповерхностные циркуляционные течения в переходной области

По распределению талька (рис. 2) были определены два основных сценария поведения маркеров под действием волн разной амплитуды. При малой и большой амплитудах в условиях эксперимента тальк движется достаточно равномерно (рис. 2, б). На границе пленки основная масса талька перемещается от центра бассейна к стенкам, что может свидетельствовать о возникновении разнонаправленных циркуляционных ячеек, создающих по центру бассейна зону дивергенции. Движение талька при генерации волн средней амплитуды в условиях лабораторного эксперимента существенно отличается от описанного выше случая. Как видно из рис. 2, а, тальк преимущественно скапливается в центре бассейна, что может говорить о наличии зоны конвергенции.

Для аналогичной характеристики движения маркеров используем понятие коэффициента компрессии (K), равного отношению поперечного расстояния, на котором частицы располагались в начале своего движения вблизи волнопродуктора, к расстоянию, на котором они оказываются вблизи границы пленки (на рис. 3 расстояние между первыми точками крайних траекторий и между точками около красной линии — границы пленки соответственно). Как видно из рис. 5, коэффициент K имеет максимум при средних амплитудах волн, что свидетельствует о наличии области конвергенции при средних амплитудах волн, где собираются пленка, тальк и маркеры.

На рис. 6 представлены зависимости величин и направлений для двух проекций (вертикальной V_z и горизонтальной V_y) скоростей от положения датчика ADV в поперечном сечении бассейна на глубине 2 см. Направление продольной скорости в ходе эксперимента не менялось.

Полученные с помощью ADV направления скоростей (черные стрелки, рис. 6) демонстрируют наличие зоны дивергенции для больших и малых амплитуд волн, а для средних — зоны конвергенции, подтверждая представленные выше рассуждения о структуре течений в вертикальном разрезе. Схематичная интерпретация данных ADV изображена на рис. 7 на поперечном разрезе бассейна вблизи границы пленки, где светло-серой полосой обозначена линия, вдоль которой выстроился тальк, стрелками на ней обозначено направление, куда под действием циркуляционных ячеек дрейфует тальк.

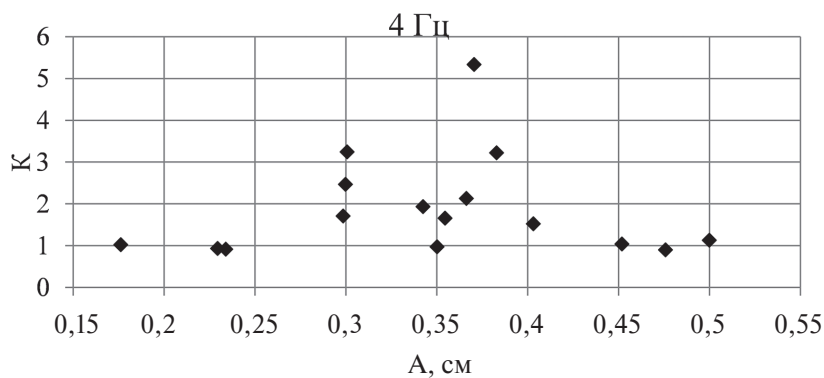


Рис. 5. Зависимость коэффициента компрессии от амплитуды волны

Fig. 5. The compression coefficient dependence on the wave amplitude

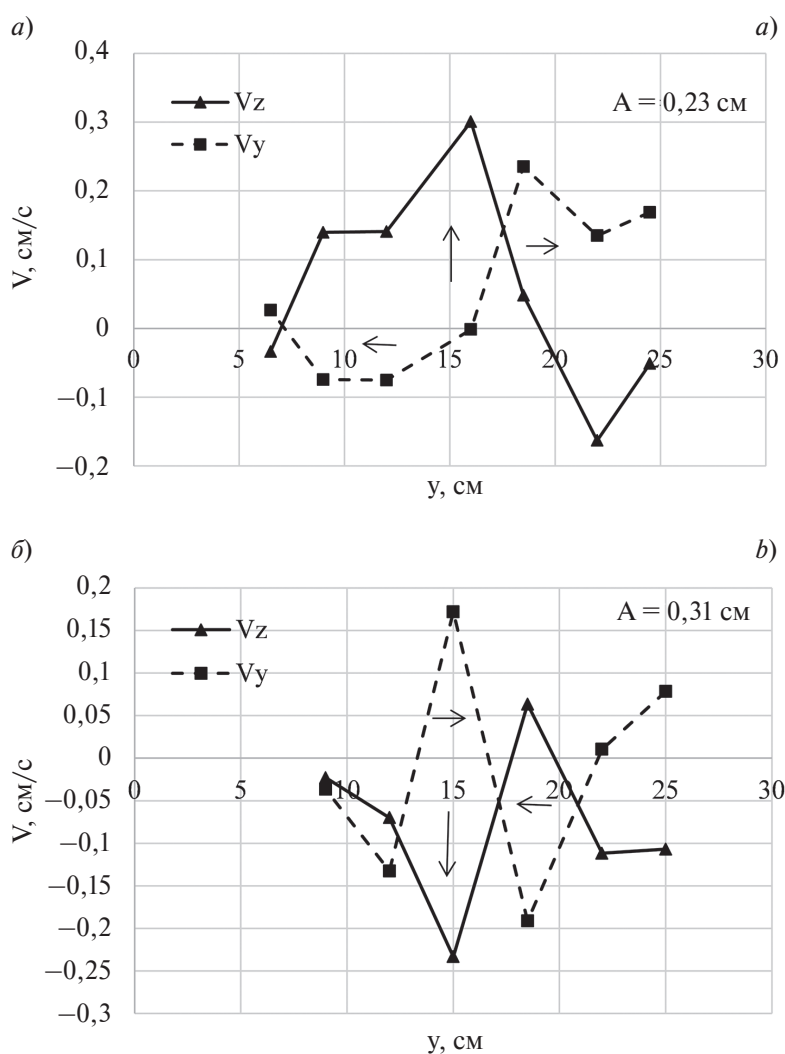


Рис. 6. Зависимости величины и направления двух проекций скоростей течения от поперечного расстояния до края бассейна у границы плёнки. Область дивергенции $A = 0,23$ см (а), конвергенции $A = 0,31$ см (б)

Fig. 6. The dependences of magnitude and direction of two projections of current velocities on the transverse distance from the edge of the basin at the film boundary. Divergence area $A = 0.23$ cm (a), convergence area $A = 0.31$ cm (b)

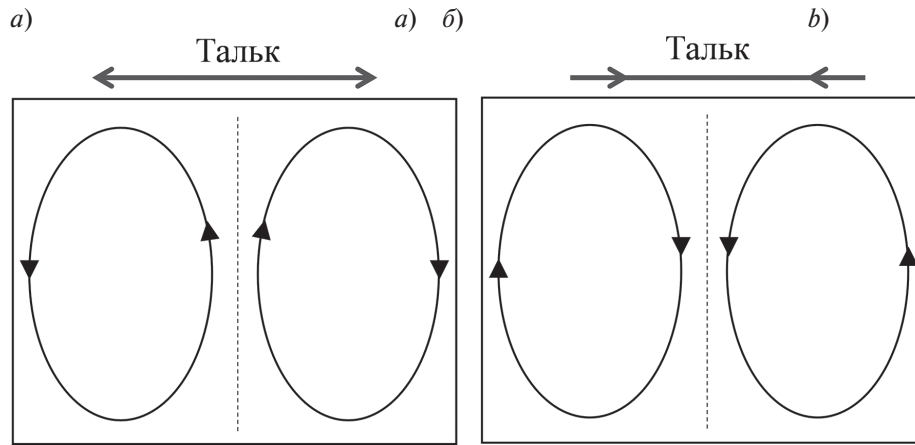


Рис. 7. Схемы циркуляционных ячеек при генерации волн малой и большой амплитуды (а), средней амплитуды (б)

Fig. 7. Schemes of circulation cells in the generation of waves of small and large amplitude (a), medium amplitude (b)

Такие течения, перпендикулярные направлению распространения поверхностных волн и приводящие к изрезанности границ пленки из-за чередования зон конвергенции и дивергенции, наблюдаются в натурных условиях с наветренной стороны сликов [15]. Известно также, что при изменениях скорости ветра и амплитуды поверхностных волн масштаб и характер изрезанности наветренной границы слика может меняться. Изрезанность границ сликов объясняют циркуляциями Ленгмюра, однако связь между амплитудой волн и возникающими областями дивергенции и конвергенции к настоящему времени остается мало изученной [15]. Представленный лабораторный эксперимент позволяет смоделировать указанный эффект пока только на качественном уровне. При этом влияние боковых стенок сказывается на количественных характеристиках течений в толще воды, однако на качественном уровне боковые стенки на полученные результаты не влияют.

4. Сравнение данных эксперимента с моделью

Исходя из баланса сил, влияющих на динамику пленки, согласно [11, 12], условием стационарности ограниченной в пространстве пленки является равенство дополнительных напряжений, индуцированных набегающими в область пленки волнами, и сил поверхностного натяжения (градиент коэффициента поверхностного натяжения). Градиент КПН возникает как результат изменения концентрации ПАВ в области действия индуцированных напряжений. Индуцированные напряжения, в свою очередь, зависят от характеристик пленки — КПН, упругости пленки, а также амплитуды затухающей волны с коэффициентом затухания, который также определяется параметрами пленки, и в конечном итоге распределением концентрации ПАВ. Такой самосогласованный режим формирования локализованной в пространстве пленки можно описать исходя из следующего уравнения:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} - \alpha \bar{\tau}_i(\sigma, E(\sigma), x, \dots) = 0, \quad (1)$$

где σ — КПН,

$$\bar{\tau}_i = \frac{\mu \omega k_0 |A|^2 \exp(-2\kappa x)}{\delta} \frac{\beta_0^2}{|\beta - 1 + i|^2} \left[\frac{1}{\beta_0^2} - 2 \left(\frac{\kappa}{k_0} + k_0 \delta \right) \frac{1}{\beta_0} + 4 k_0 \delta \right] \equiv T_0 |A|^2 \exp(-2\kappa x) \quad (2)$$

— напряжение, индуцированное волной частотой ω и волновым числом k_0 , $\beta = \frac{2\mu\omega}{Ek^2\delta}$, $k = k_0 + i\kappa$, κ —

коэффициент затухания волны в пространстве, $\delta = \sqrt{2\mu / \omega \rho}$ — толщина вязкого пограничного слоя в волне, μ — динамическая вязкость, ρ — плотность воды, A — амплитуда волны, E — упругость пленки, $\alpha = 0,35$ — эмпирический коэффициент.

Выражение для давления пленки, т. е. разницы между КПН для чистой воды и для пленки, в явном виде можно записать следующим образом:

$$\sigma_0 - \sigma = \alpha \frac{T_0 A^2}{2\kappa} (1 - \exp(-2\kappa x)). \quad (3)$$

Здесь σ_0 — КПН воды в отсутствие пленки. Для расчета теоретических зависимостей разницы КПН при $A = 0,17, 0,35$ и $0,42$ см использовались следующие значения параметров: $f = 4$ Гц, $E = 20$ мН/м (согласно [2]).

Теоретическая зависимость давления от расстояния от края пленки и сравнение с экспериментальными данными представлены на рис. 8. Линиями обозначены зависимости распределений давления пленки для трех амплитуд в зависимости от расстояния от границы пленки, рассчитанные в рамках описанной модели. Экспериментальные данные обозначены точками (треугольник — $0,42$ см, квадрат — $0,35$ см, ромб — $0,17$ см).

Как видно из рис. 8, модель удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными для малых ($0,17$ см) и больших ($0,42$ см) амплитуд волн, но экспериментальное значение разности КПН в разреженной пленке (квадраты) при амплитуде $0,35$ см значительно выше теоретических оценок (сплошная линия). Причину расхождения при средних амплитудах можно объяснить тем, что модель не учитывает возникающие циркуляционные течения, находящиеся вблизи границы пленки и в области «разреженной» пленки. Пробы для амплитуды $0,35$ см отбирались в области, где за счет поджима пленки соседними циркуляционными ячейками образовалась область скопления пленки. Проба, которая отбиралась в области «плотной» пленки, где уже отсутствуют вихревые течения, согласуется с моделью (квадраты на расстояние около 1 м).

5. Выводы

Проведено исследование эффекта компрессии пленок поверхностно-активных веществ дрейфовыми течениями, индуцированными поверхностными волнами. Стационарное распределение пленки в поле волнового дрейфа формируется следующим образом: чистая поверхность — «разреженная» пленка — плотная пленка. Область «разреженной» пленки характеризуется наличием циркуляционных течений, меняющих свои характеристики в зависимости от амплитуды волны. Так, течения при малых и больших амплитудах, для условий эксперимента, характеризуется как дивергентное, в то время как при средних значениях амплитуд наблюдается максимальная поперечная компрессия, связанная с развитием роликовых течений в толще воды.

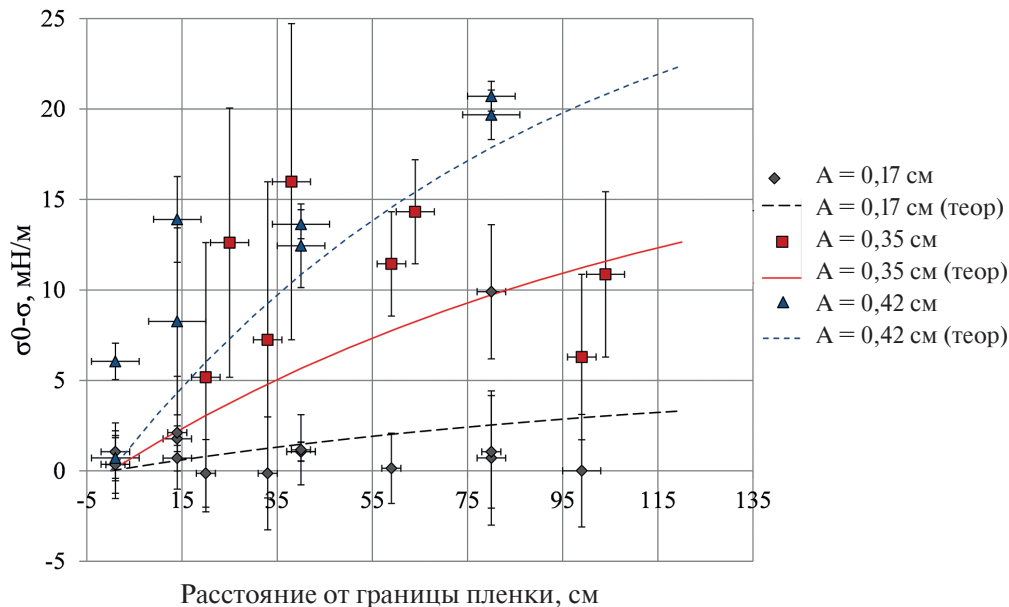


Рис. 8. Теоретические и экспериментальные зависимости давления пленки от расстояния от края пленки

Fig. 8. Theoretical and experimental dependencies of film pressure on distance from the film edge

Проведено сравнение экспериментальных данных, полученных в результате отбора проб с выводами модели компрессии поверхностных пленок в поле поверхностных волн. При малых и больших амплитудах значения давления пленки, рассчитанные в рамках модели, хорошо согласуются с данными лабораторного эксперимента. Расхождение при средних амплитудах волн объясняется наличием конвергентных роликовых течений в области «разреженной» пленки, которые модель не учитывает.

Проведенные лабораторные эксперименты качественно моделируют эффект образования гребенчатых структур на границах slickов с их наветренной стороны. Однако связь параметров изрезанности границы пленки в зависимости от характеристик поверхностных волн пока исследованы недостаточно полно. В дальнейшем планируется продолжение лабораторных экспериментов по изучению компрессии пленки под действием напряжений от поверхностных ветровых волн, включающее в себя верификацию модели с учетом нескольких спектральных компонент волнения.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-77-10066, <https://rscf.ru/project/18-77-10066/>.

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 18-77-10066, <https://rscf.ru/project/18-77-10066/>.

Литература

1. Лаврова О.Ю., Мутягина М.И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
2. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
3. Капустин И.А., Ермошкин А.В., Богатов Н.А., Мольков А.А. Об оценке вклада приводного ветра в кинематику slickов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 2. С. 163–172. doi:0.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172
4. Korinenko A.E., Malinovsky V.V. Field study of film spreading on a sea surface // Oceanologia. 2014. V. 56, N 3. P. 461–475. doi:10.5697/oc.56–3.461
5. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A. Strong modulation of short wind waves and ka-band radar return due to internal waves in the presence of surface films. Theory and experiment // Remote Sensing. 2021. V. 13, N 13. P. 2462. doi:10.3390/rs13132462
6. Сергиевская И.А., Лазарева Т.Н. Влияние температуры окружающей среды на вязкоупругие свойства нефтяных плёнок в приложении к проблеме дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 2. С. 176–183. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-2-176-183
7. Бескид П.П., Дурягина Е.Г. Характеристика процессов трансформации нефти в морской среде и их влияние на операции по ликвидации аварийных разливов нефти // Эксплуатация морского транспорта. 2011. Т. 1, № 63. С. 71–75.
8. Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G. Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. V. 9, N 2. P. 181. doi:10.3390/jmse9020181
9. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // Oil on the Sea. Ocean Technology. ed. Hoult D.P. Boston: Springer, 1969. P. 53–63.
10. Монин А.С., Красицкий В.П. Phenomena on the surface of the ocean. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
11. Ermakov S.A., Danilicheva O.A., Kapustin I.A., Leschev G.V., Molkov A.A. Deformation of film slicks on the water surface. Experiment and model // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2020. V. 17, N 6. P. 97–102.
12. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J. Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms // Proc. SPIE9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. P. 963807.
13. Ермаков С.А., Ермошкин А.В., Капустин И.А. Об эффекте сжатия пленочного слика // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 288–294. doi:10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294

14. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) Web: <https://www.xylen-analytics.asia/productsdetail.php?> SonTek-16-MHz-MicroADV-71 (дата обращения: 14.11.2021).
15. Ермаков С.А., Лаврова О.Ю., Капустин И.А., Ермошкин А.Б., Мольков А.А., Даниличева О.А. О гребенчатой структуре границ slickов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 208–217. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217

References

1. Lavrova O. Yu., Mityagina M.I. Satellite monitoring of film pollution on the surface of the Black Sea. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2012, 3, 48–65 (in Russian).
2. Ermakov S.A. Influence of films on the dynamics of gravity-capillary waves *N. Novgorod: IPF RAN*, 2010. 164 p. (in Russian).
3. Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Mol'kov A.A. On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slicks on the sea surface under conditions of finite wave fetch. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019, 16, 2, 163–172 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172
4. Korinenko A.E., Malinovsky V.V. Field study of film spreading on a sea surface. *Oceanologia*. 2014, 56, 3, 461–475. doi:10.5697/oc.56-3.461
5. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A. Strong modulation of short wind waves and ka-band radar return due to internal waves in the presence of surface films. Theory and experiment. *Remote Sensing*. 2021, 13, 13, 2462. doi:10.3390/rs13132462
6. Sergievskaya I.A., Lazareva T.N. The influence of water temperature on viscoelastic properties of oil films in application to remote sensing. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020, 17, 2, 176–183 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2020-17-2-176-183
7. Beskid P.P., Duryagina E.G. The characteristic of processes of transformation of oil in the sea environment and their influence on operations on liquidation of emergency spills. *E'kspluatatsiya Morskogo Transporta*. 2011, 1, 63, 71–75 (in Russian).
8. Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G. Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, 9, 2, 181. doi:10.3390/jmse9020181
9. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea. *Oil on the Sea. Ocean Technology*. ed. Hoult D.P. Boston: Springer, 1969, 53–63.
10. Monin A.S., Krasickij V.P. Phenomena on the surface of the ocean. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1985, 376 p. (in Russian).
11. Ermakov S.A., Danilicheva O.A., Kapustin I.A., Leschev G.V., Molkov A.A. Deformation of film slicks on the water surface. Experiment and model. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020, 17, 6, 97–102.
12. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J. Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms. *Proc. SPIE9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2015, 963807.
13. Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A. On the effect of film slick compression. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2017, 14, 3, 288–294 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294
14. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) Web: <https://www.xylen-analytics.asia/productsdetail.php?> SonTek-16-MHz-MicroADV-71 (date of access: 14.11.2021).
15. Ermakov S.A., Lavrova O. Yu., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Molkov A.A., Danilicheva O.A. On the “comb” structure of the edges of slicks on the sea surface. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018, 15, 7, 208–217 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217

Об авторах

ВОСТРЯКОВА Дарья Васильевна, РИНЦ AuthorID: 1135381, ORCID: 0000-0001-5546-1670, Scopus AuthorID: 57219659995, WoS ResearcherID: AAA-7981–2022, e-mail: vostryakova@ipfran.ru
КАПУСТИН Иван Александрович, РИНЦ AuthorID: 565925, ORCID: 0000-0001-6845-3119, Scopus AuthorID: 25629629000, WoS ResearcherID: A-3593–2014, e-mail: kia@ipfran.ru
ЛАЗАРЕВА Татьяна Николаевна, РИНЦ AuthorID: 811564, ORCID: 0000-0002-0674-4831, Scopus AuthorID: 54884797800, WoS ResearcherID: AAJ-4607–2021, e-mail: lazareva@ipfran.ru
ДАНИЛИЧЕВА Ольга Аркадьевна, РИНЦ AuthorID: 1064727, ORCID: 0000-0001-9529-2517, Scopus AuthorID: 57204632237, WoS ResearcherID: AAG-7486–2020, e-mail: olgadan@ipfran.ru
ЕРМАКОВ Станислав Александрович, РИНЦ AuthorID: 32579, ORCID: 0000-0002-0869-4954, Scopus AuthorID: 7006796194, WoS ResearcherID: L-6157–2017, e-mail: stas.ermakov@ipfran.ru