

Академик НАН Украины В. А. Иванов, В. В. Малиновский,
А. Е. Кориненко

Натурные исследования растекания тонкой искусственной пленки на морской поверхности

Представлено результати натурних досліджень розтікання тонкої поверхневої плівки на морській поверхні. Експерименти виконувалися в районі океанографічної платформи в широкому діапазоні швидкостей вітру та параметрів вітрового хвилювання. Було встановлено, що швидкість розтікання збільшується з посиленням швидкості вітру. При малих вітрах розтікання визначається різницею коефіцієнтів поверхневого натягу "вода – плівка". Вплив довгих хвиль на процес розтікання плівок не виявлено.

Проблема загрязнения морской поверхности пленками антропогенного характера остается актуальной. Для контроля загрязнений и прогноза их распространения необходимо иметь четкие представления не только о закономерностях дрейфа поверхностных пленок (ПП) под действием ветра, волн и течений, но и динамике разливов. Изучению растекания ПП посвящен ряд теоретических исследований. В работе [1] было установлено, что при различных режимах растекания размеры слика увеличиваются со временем по степенному закону. Детальный анализ положения границы пятна от времени, распределения скоростей и толщины пленки вдоль направления растекания выполнен для одномерного [2] и двухмерного [3] случаев. Исследования для идеализированного случая кругового растекания пленки в лабораторных условиях описаны в публикациях [2, 3].

К настоящему времени экспериментальных исследований, посвященных растеканию пленок на морской поверхности при различных ветроволновых условиях, недостаточно. Это существенно затрудняет тестирование численных моделей и оценку реального влияния ветра и волн на динамику ПП.

В настоящем сообщении рассматривается сопоставление характеристик растекания тонкой ПП на морской поверхности с параметрами ветра и волнения, которые получены в ходе натурального эксперимента. Исследования растекания ПП выполнялись в 2005–2006 гг. в районе океанографической платформы (Южный берег Крыма). Методика проведения эксперимента и определения значений площадей и радиусов ПП представлена в статье [4]. Для получения искусственного слика использовалось растительное масло объемом 340 см^3 . Регистрация гидрометеорологических условий производилась на океанографической платформе. Характеристики поверхностных волн в диапазоне частот $\leq 2 \text{ Гц}$ измеряли с помощью струнных волнографов.

Значения коэффициентов поверхностных натяжений (КПН) чистой воды σ_0 и воды, покрытой пленкой растительного масла σ_S , необходимые для расчета изменений размеров ПП со временем ($\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_S$), оценивались в лабораторных условиях по методике, предложенной в [5]. Согласно измерениям, $\Delta\sigma \approx 32 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

В ходе натуральных экспериментов было выполнено шестнадцать серий измерений при скоростях ветра от 1,6 до 11,7 м/с. Диапазон высот волн 33% обеспеченности H_S составлял от 0,15 до 1,03 м.

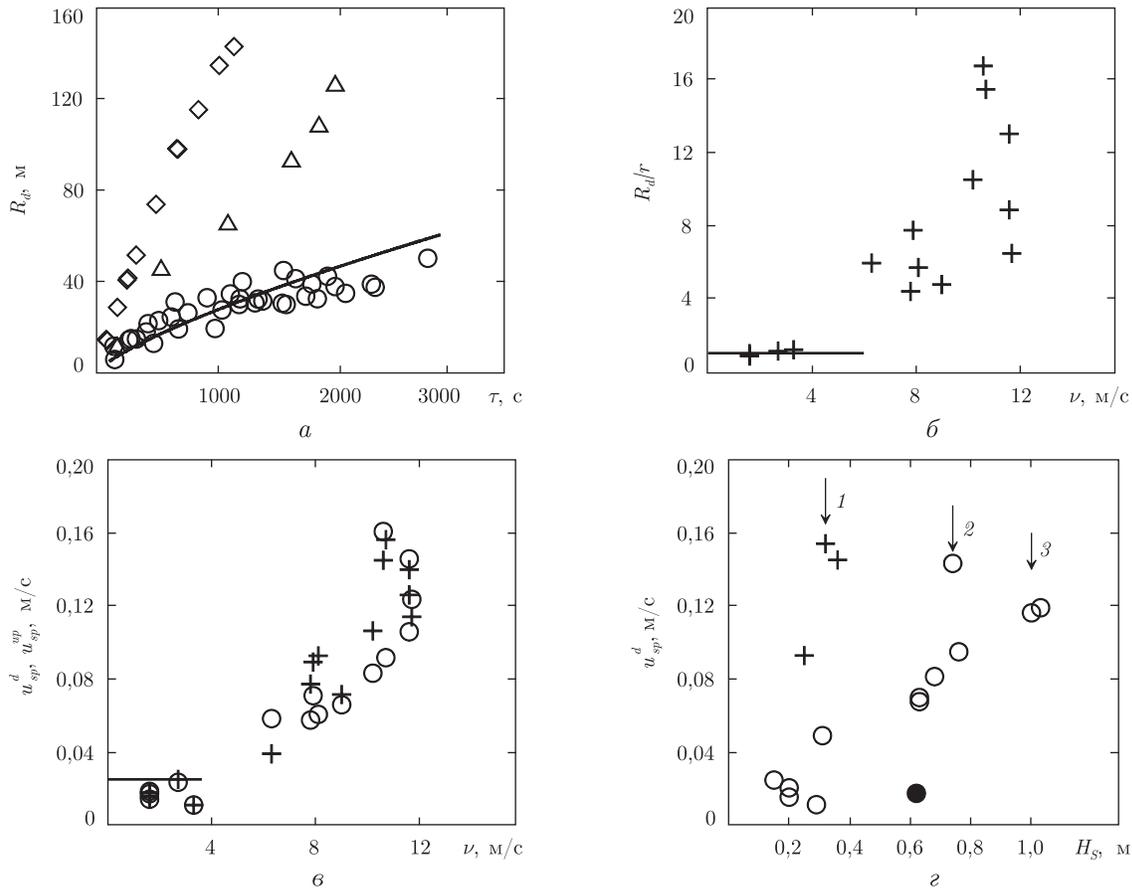


Рис. 1. Зависимости: *a* — R_d от скорости ветра. Величины, полученные при различных скоростях соответствуют условным обозначениям на графике (сплошная линия соответствует формуле (1)); *б* — отношения большей оси ПП к меньшей (прямая линия соответствует $R_d/r = 1$); *в* — средней скорости растекания слика от ветра: \circ — по ветру; $+$ — против ветра (прямая линия — значение, рассчитанное по формуле (2)); *г* — скорости растекания от H_S

Обозначим радиусы большой оси слика, направленные вдоль и против ветра, как R_{up} и R_d соответственно. Пример изменения R_d ПП со временем представлен на рис. 1, *a*, где условными обозначениями отмечены полученные при различных скоростях ветра следующие значения: \circ — 1,6...3,6 м/с; Δ — 7,8 м/с; \diamond — 11,7 м/с; начало координат соответствует моменту разлива растительного масла. Как следует из рисунка, в фиксированный момент времени значения R_d возрастают с увеличением скорости ветра.

Величины отношений R_d/r , характеризующие вытянутость слика, при различных скоростях ветра приведены на рис. 1, *б*. Значения радиусов взяты для момента времени 1000 с после начала разлива (минимальная продолжительность одной из серий измерений). Как видно из рисунка, при $v < 4$ м/с величины R_d/r лежат в пределах от 0,9 до 1,1. Следовательно, в штилевых ветровых условиях слики имеют форму круга, что характерно для растекания ПП только за счет сил поверхностного натяжения. С усилением скорости ветра слик становится вытянутым и при $v \sim 12$ м/с значения R_d/r составляют ~ 12 . Ветровые зависимости скоростей растекания вдоль ветра $u_{sp}^d = \partial R_d / \partial t$ и против ветра $u_{sp}^{up} = \partial R_{up} / \partial t$ показаны на рис. 1, *в* и обозначены соответственно символами (\circ) и ($+$). Величины u_{sp}^d и u_{sp}^{up}

были рассчитаны для всей совокупности данных в каждой из серий наблюдений и, таким образом, представляют средние значения. Скорости растекания при слабых v лежат в пределах от 0,01 до 0,02 м/с. При умеренных и сильных ветрах наблюдается увеличение u_{sp}^d и u_{sp}^{up} , при этом различие между ними является незначительным.

Рассмотрим особенности растекания пятен ПП при различных волновых условиях. Зависимость u_{sp}^d от H_S иллюстрирует рис. 1, z , где условные обозначения соответствуют измерениям при различных возрастах волн $\alpha = v/C_p$; C_p — фазовая скорость волн спектрального пика: \circ — $\alpha = 0,9-1,3$; $+$ — $\alpha = 2-3$. Случай, отмеченный символом (\bullet), относится к штилевым ветровым условиям при наличии зыби. Как следует из рисунка, для всей совокупности точек явной зависимости скорости растекания ПП от H_S не наблюдается. С другой стороны, для групп данных, полученных как при $\alpha = 0,9-1,3$, так и $\alpha = 2-3$, видна тенденция увеличения u_{sp}^d с ростом волн. В то же время скорость растекания в штилевых ветровых условиях, выполненного измерения при $H_S = 0,62$ м и $v = 1,6$ м/с, практически совпадает со значениями u_{sp}^d при $H_S = 0,15-0,30$ м.

Отметим некоторые особенности полученных результатов измерений. Во-первых, нами не установлена явная зависимость скорости растекания ПП от высоты ветровых волн. Во-вторых, величины u_{sp}^d хорошо коррелируют со скоростью ветра и при штилевых ветровых условиях независимо от высоты волн скорость растекания имеет минимальные значения, а форма слика близка к кругу.

Согласно работам [1, 3], выражения для радиуса пятна и скорости растекания ПП в различные моменты времени t можно записать так:

$$R(t) = K \frac{\Delta\sigma^{1/2}}{(\mu\rho)^{1/2}} t^{3/4}, \quad (1)$$

$$u = \frac{\partial R}{\partial t} = K \frac{\Delta\sigma^{1/2}}{(\mu\rho)^{1/2}} t^{-1/4}, \quad (2)$$

где μ — кинематическая вязкость жидкости; $K = 0,9$ — константа для осесимметричного случая растекания. Для сопоставления наших данных с моделью (2) величина u_{sp}^0 усреднялась во временном интервале от 200 до 3600 с (см. рис. 1, $в$).

Рассмотрим растекание пленки растительного масла на морской поверхности при слабых скоростях ветра. Как видно из рис. 1, $б$, при штилевых условиях отношение R_d/r близко к единице, т. е. слик за время измерений сохранял круглую форму. Изменение во времени величин R_d (см. символы (\circ) на рис. 1, $а$) удовлетворительно описывается моделью (1), показанной на рис. 1, $а$ сплошной линией, при этом скорости растекания, приведенные на рис. 1, $в$, близки к модельным расчетам u_{sp}^0 (прямая линия на рис. 1, $в$). Таким образом, динамика тонких ПП в натуральных условиях при слабых скоростях ветра практически полностью определяется величиной $\Delta\sigma$. С усилением ветра, как следует из рис. 1, $в$, наблюдается увеличение как скорости растекания ПП, так и отношения радиусов (см. рис. 1, $б$).

Как отмечалось в работе [6], растекание нефти также зависит от волнового дрейфа. В статье [7] сделан вывод о том, что Стоксов дрейф является основным механизмом для горизонтального транспорта нефтяных фракций. Отметим, что влияние волн на растекание нефтяных загрязнений в настоящее время не вызывает сомнений. Однако, как видно из рис. 1, z , нами не установлена связь между скоростью растекания пленки растительного масла и величиной H_S . С целью уточнения роли ветровых волн в динамике ПП рассмотрим более детально два случая, наблюдавшихся в эксперименте.

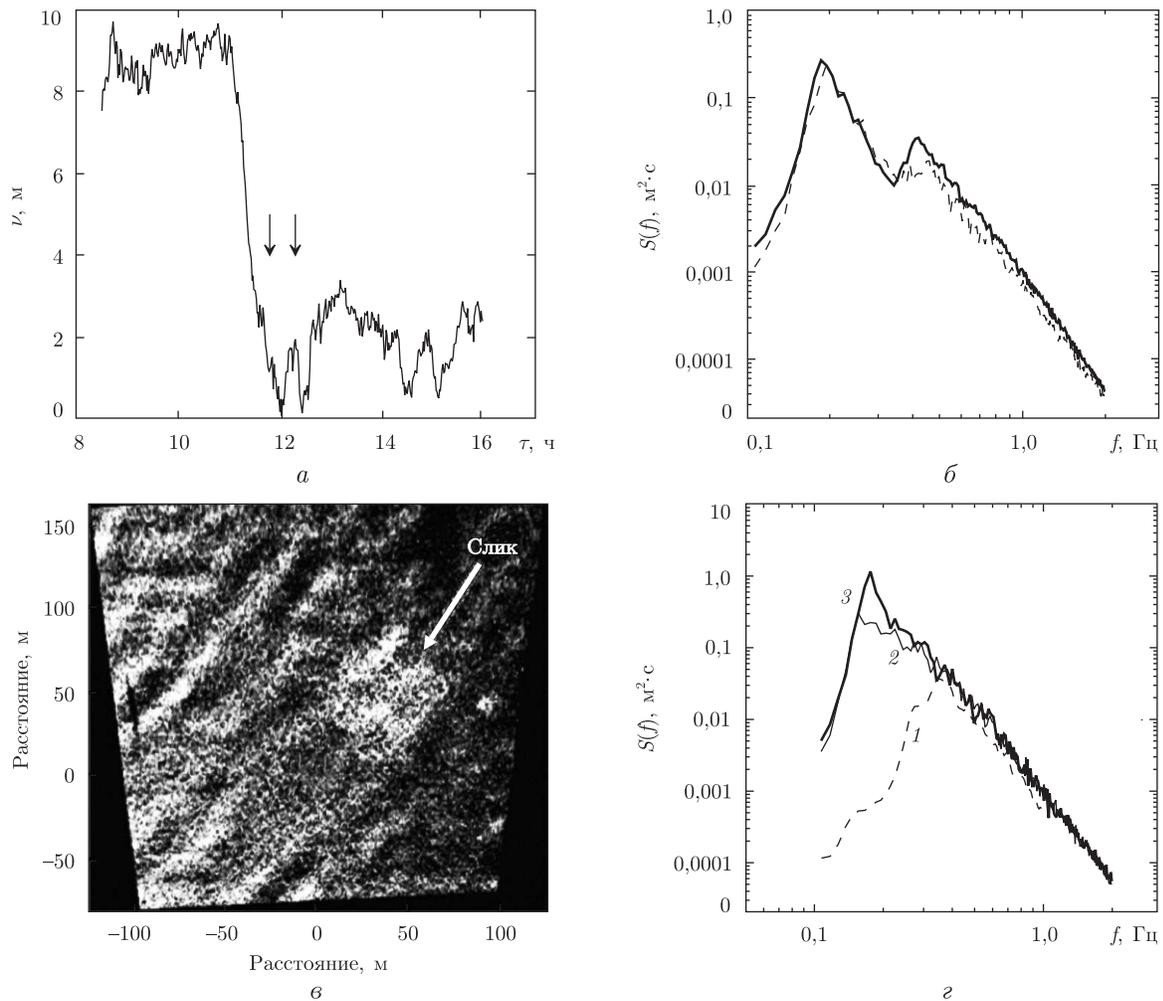


Рис. 2. Гидрометеорологические параметры: *a* — скорость ветра 7 июля 2005 г.; *б* — частотный спектр поверхностного ветрового волнения 7 июля 2005 г.; *в* — трансформированное фотоизображение морской поверхности, полученное через 2100 с после разлива (стрелкой показано положение поверхностной пленки); *г* — частотные спектры ветрового волнения при различных скоростях ветра и параметрах волнения

Особенность первой ситуации состоит в том, что перед проведением измерений дул стабильный ветер со скоростью 9 м/с (рис. 2, *a*), а после 11 ч начал ослабевать и в 11,65 значение v упало до 1,6 м/с. Время наблюдения растекания ПП с 11,8 до 12,3 ч отмечено на рис. 2, *a* стрелками. Спектры волнения $S(f)$ в интервалах времени от 10 до 11 ч и от 11,8 до 12,3 ч иллюстрирует рис. 2, *б* (сплошная и штриховая линии соответственно). Как видно из рисунка, уровни обоих спектров близки во всем диапазоне частот, а значение $H_S = 0,62$ м при $v = 1,6$ м/с снизилось незначительно относительно значения $H_S = 0,64$ м при $v = 9$ м/с.

Следовательно, измеренная величина скорости растекания ПП, показанная на рис. 1, *г* символом (●), получена практически при отсутствии ветра, но при достаточно сильном волнении. Однако значения $R_d/r = 0,9$ (см. рис. 1, *б*) и $u_{sp}^d = 0,017$ м/с (см. рис. 1, *в*) характерны для штилевых условий. Более того, значение u_{sp}^d в этом случае близко к модельному значению $\overline{u_{sp}^0} = 0,025$ м/с, если скорость растекания определяется разностью КПП “вода — пленка”. Тот факт, что слик имел форму, близкую к кругу, подтверждает рис. 2, где показана

но фотоизображение морской поверхности, трансформированное в прямоугольную систему горизонтальных координат, полученное через 2100 с после разлива (стрелка на рисунке указывает на положение слика).

Рассмотрим второй случай, когда измерения проводились при существенно разных волновых условиях, но близких скоростях ветра. Рис. 2, *г* иллюстрирует полученные спектры волнения: 1 — при скорости ветра $v = 10,7$ м/с, $\alpha = 2,4$, $H_S = 0,32$ м; 2 — при $v = 11,6$ м/с, $\alpha = 1,3$, $H_S = 0,74$ м; 3 — при $v = 11,6$ м/с, $\alpha = 1,2$, $H_S = 1,03$ м. Измеренные в этих условиях u_{sp}^d отмечены соответственно цифрами 1, 2 и 3 на рис. 1, *г*, из которого видно, что несмотря на значительное различие в величинах H_S и обратных возрастах волн скорости растекания ПП отличаются слабо (0,15, 0,14 и 0,13 м/с). Итак, нам не удалось обнаружить влияния волн на динамику слика. В то же время значения u_{sp}^d и u_{sp}^{up} возрастают с усилением ветра (см. рис. 1, *в*).

Таким образом, результатами эксперимента установлено, что явной зависимости скорости растекания ПП от высоты ветровых волн 33% обеспеченности, лежавших в интервале от 0,15 до 1,03 м, не наблюдается. Более того, при волнении $H_S = 0,62$ м, но слабом ветре 1,6 м/с скорость растекания практически совпадает с результатами, полученными при $H_S = 0,15$ м. Для трех серий измерений, выполненных при практически одинаковых скоростях ветра 10,7, 11,6 и 11,6 м/с, но существенно различных волновых ситуациях (H_S соответственно равно 0,32, 0,74 и 1,03 м), скорости растекания ПП отличались незначительно и составляли 0,15, 0,14 и 0,13 м/с соответственно; поведение пленки менялось в зависимости от ветровых условий. При усилении v от 6,3 до 11,7 м/с мы наблюдали увеличение скорости растекания от 0,039 до 0,145 м/с и более сильное вытягивание ПП вдоль ветра. При слабых ветрах, меньших 4 м/с, средняя скорость растекания ПП пяти серий измерений составляла 0,017 м/с, что близко к значению 0,025 м/с, рассчитанному для случая, когда динамика определяется разностью КПП “пленка — вода”. При штилевых условиях отношение размеров ПП вдоль и перпендикулярно направлению ветра близко к единице.

Работа выполнена при поддержке проектов INTAS/ESA 06-1000025-9264, Европейской научной программы FP6 (Contract #SST5-CT-2006-031001, Project MONRUK) и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины по контракту Ф28/435-2009.

1. Fay J. A. The spread of oil slicks on a calm sea // Oil on the Sea / Ed. by D. Hoult. — New York: Plenum, 1968. — P. 53–63.
2. Foda M., Cox R. G. The spreading of thin liquid films on a water-air interface // J. Fluid Mech. — 1980. — **101**. — P. 33–51.
3. Phillips W. R. C. On the spreading radius of surface tension driven oil on deep water // Appl. Sci. Res. — 1997. — **57**. — P. 67–80.
4. Малиновский В. В., Дулов В. А., Кориненко А. Е. и др. Натурные исследования дрейфа искусственных тонких пленок на морской поверхности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2007. — **47**, № 1. — С. 117–127.
5. Гуцин Л. А., Ермаков С. А. Лабораторное исследование перераспределения поверхностно-активных веществ в поле течений, индуцированных поверхностной волной // Там же. — 2004. — **40**, № 12. — С. 277–282.
6. Elliott A. J. Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North Sea // Ocean Dynamics. — 1986. — **39**, No 3. — P. 113–137.
7. Boufadel K., Du M. C., Kaku V., Weaver J. Lagrangian simulation of oil droplets transport due to regular waves // Environm. Mod. фтв Software. — 2006. — **22**, No 7. — P. 978–986.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 15.09.2009

Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov, V. V. Malinovsky,**
A. E. Korinenko

Field studies of thin artificial film spreading on the sea surface

The results of the field study of a thin surface oil film spreading on the sea surface are presented. The experiments were carried out in the vicinity of the Black Sea Platform in a wide range of wind and wave conditions. It is found that the spreading rate increases with the wind speed. At low winds, the subsurface tension difference “film – water” is the only parameter which governs the film spreading. Our data reveal no impact of a swell on the film spreading.