

## Об эффекте сжатия пленочного слика

С.А. Ермаков, А.В. Ермошкин, И.А. Капустин

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*

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

Описан обнаруженный в ходе натурных экспериментов на Горьковском водохранилище новый эффект – остановка процесса растекания пятна пленки на поверхности воды, последующее сжатие пятна и переход к стационарному состоянию. В эксперименте изучалась эволюция пятна пленки поверхностно-активного вещества (ПАВ) с заранее измеренными характеристиками. Наблюдения проводились с использованием радиолокационной станции кругового обзора, установленной на маяке. Предложено физическое объяснение эффекта, в основе которого лежит учет поверхностных напряжений, индуцированных ветровыми волнами, которые действуют против сил поверхностного натяжения и замедляют растекание. Величина индуцированных напряжений для пленок с очень высокой упругостью возрастает при уменьшении упругости, достигая максимума при некоторой ее величине, зависящей от частоты волны и вязкости. При растекании пленки уменьшаются концентрация ПАВ, упругость, и давление пленки. В результате индуцированное напряжение может превысить силу поверхностного натяжения, что приведет к компрессии пленки, а затем к переходу ее в равновесное состояние.

**Ключевые слова:** пленки на морской поверхности, слики, ветровые волны, радиолокационное зондирование

*Одобрена к печати: 25.05.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294*

### Введение

Проблема растекания пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ), а также нефтяных разливов изучалась в целом ряде работ. Важность данных исследований связана с изучением возможностей наблюдения пленочных сликов из космоса, оценки возраста пятна на основе анализа его формы и прогноза дальнейшей эволюции. Общеизвестной моделью растекания под действием сил поверхностного натяжения и вязких сил является модель Фэя (см., например, (Монин, Красицкий, 1985) и цитированную литературу), которая, однако, не описывает асимметрию пятна пленки (слика) в процессе его растекания. В работах (Ермаков и др., 2016; Ermakov et al., 2015) предложена физическая модель, описывающая асимметрию растекания пленок – вытягивания пленочных сликов по ветру за счет действия индуцированных ветровыми волнами напряжений, выводы модели удовлетворительно согласуются с результатами выполненных экспериментов, по крайней мере, на не слишком больших временах растекания.

В данной работе сообщается об обнаружении нового эффекта – перехода на достаточно больших временах от режима растекания пленки к режиму ее сжатия с последующим установлением стационарного состояния – стационарного масштаба пятна. Приведены результаты наблюдений эффекта компрессии пленки, предложено физическое объяснение эффекта, основанное на действии индуцированных ветровыми волнами напряжений и учете изменения характеристик пленки в процессе ее растекания.

## Эксперимент

Эксперименты по изучению растекания пленок ПАВ (Ермошкин, Капустин, 2015) проводились на Горьковском водохранилище в 2014 г. с использованием радиолокационной станции (РЛС) Icom MR-1200. РЛС была установлена на маяке аванпорта на высоте 12 м от поверхности воды и работала в режиме кругового обзора синхронно с видеокамерой GoPro. Метеорологическая обстановка фиксировалась при помощи метеостанции Vantage Pro 2 фирмы Davis Instruments. Ветер во время проведения эксперимента (24.08.2014, 18:35–19:50) характеризовался достаточно постоянным направлением (с юго-запада) и скоростью 3,5–4 м/с.

Разлив пятна проводился с плавучей лаборатории ИПФ РАН «Геофизик» в 18:38 на удалении около 450 м к западу от маяка. Пленочный слик создавался с использованием спиртового раствора чистой олеиновой кислоты (1:1), общий объем разлитого раствора ПАВ составил 1,5 л. Разлив ПАВ осуществлялся при движении судна по спирали, начальная площадь пятна составила  $1,3 \times 10^4 \text{ м}^2$ .

Для определения площади пятна использовался пороговый метод обработки нормированных на фоновые значения интенсивности радиолокационных (РЛ) панорам. В результате нормировки угловая зависимость рассеяния полностью исчезает, остаются лишь флуктуации сигнала, связанные с отражением от ветрового волнения, и область искусственного слика становится хорошо различимой.

На начальных этапах процесса растекания (время 18:35–18:45) форма пятна была близка к круговой, его площадь увеличивалась по закону, близкому к  $t^{3/2}$ . Наблюдалось смещение центра слика в направлении, практически перпендикулярном к ветру, которое, вероятно, связано с течениями в данном районе. На более поздней стадии (время порядка 18:45–19:05) проявился эффект асимметрии растекания: поперечная по отношению к направлению скорости ветра ось пятна росла медленнее, зависимость же от времени продольной оси оставалась примерно той же, что и раньше (Ермошкин, Капустин, 2015). Наконец, после достижения максимального значения (около 19:10) площадь пятна стала уменьшаться со временем, это было обусловлено уменьшением поперечной оси при практическом постоянстве продольной. После 19:20 площадь оставалась практически постоянной. Описанная эволюция пятна иллюстрируется фрагментами РЛ-изображений на *рис. 1*, а также графиком на *рис. 2*. Отметим, что небольшое пятно, присутствующее на обеих панорамах, которое сохраняет свое местоположение с координатами центра примерно (350, 200), является результатом нормировки исходных РЛ-изображений на фоновую РЛ-панораму. В области поверхности, соответствующей указанному пятну непосредственно до разлива слика, находилось закоренное маломерное судно, что и привело к увеличенному отражению на фоновой РЛ-панораме и, как следствие нормировки, к возникновению стационарного пятна на нормированных РЛ-панорамах.

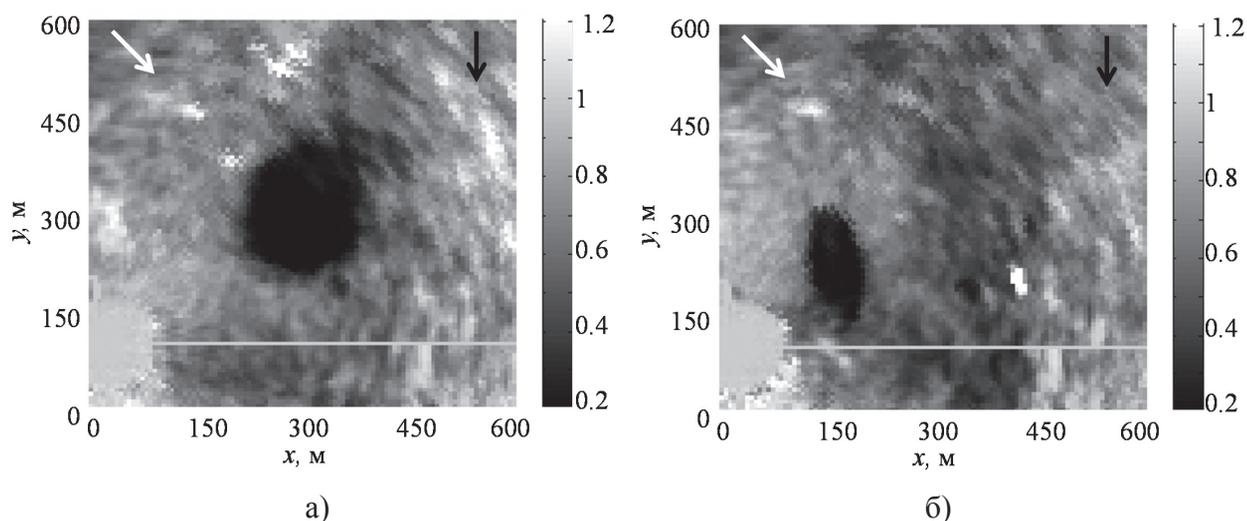


Рис. 1. Нормированные РЛ-панорамы в разные моменты времени: а) – 19:00; б) – 19:50. Белая стрелка указывает направление на север, черная стрелка – направление ветра

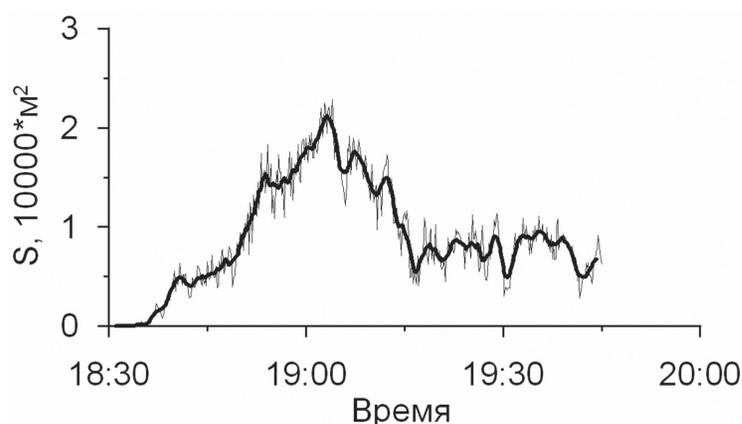


Рис. 2. Зависимость площади пятна от времени

### Теоретическая модель

Объяснение явления асимметричного растекания пленочных сликков, предложенное в работах (Ермаков et al., 2015; Ермаков и др., 2016), основано на учете действия на пленку поверхностных напряжений, индуцируемых ветровыми волнами, распространяющимися под углами к направлению ветра. Эти напряжения существенно увеличиваются в области слика и зависят от коэффициента затухания волн, определяемого характеристиками пленки ПАВ. Добавочные по сравнению с чистой водой индуцированные напряжения в слике складываются с вязкими напряжениями и направлены против действия сил поверхностного натяжения, приводящих к растеканию пленки. Это приводит к замедлению растекания пленки в поперечном к ветру направлении и, таким образом, к асимметрии роста осей слика. Уравнение, определяющее динамику растекания, имеет вид (Ермаков et al., 2015):

$$\Delta\sigma - \alpha \frac{\mu\Delta x}{t\sqrt{vt}} \Delta x - F_{induced} \approx 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) выражает баланс сил, действующих на пленку с нулевой массой, а именно силу поверхностного натяжения на единицу длины границы пленки, равную разности  $\Delta\sigma$  коэффициентов поверхностного натяжения на чистой воде и в области пленки, силу вязкого трения (второе слагаемое в (1)) и нормальную к границе слик компоненту индуцированной волнами силы  $F_{induced}$ . В (1)  $\alpha$  – эмпирический коэффициент, определяемый сложной структурой погранслоя под пленкой вблизи границы слика;  $\Delta x$  – длина элемента поверхности, отсчитываемая от границы пленки внутрь слика и пропорциональная масштабу последнего;  $\mu$  и  $\nu$  – динамическая и кинематическая вязкости воды. Напряжение, индуцированное монохроматической волной с частотой  $\omega$  и волновым числом  $k_0$ , затухающей в пространстве с декрементом  $\kappa = \kappa(k_0, \mu, \rho, \omega, E)$  при распространении в область, занятую пленкой с упругостью  $E$ , было приведено в работе (Foss, 2000). В статье (Ермаков et al., 2015) предложено выражение для силы, индуцированной спектром  $F(k, \varphi)$  ветровых волн в виде:

$$F_{induced} = \tau_w^0 \Delta x. \quad (2)$$

Здесь  $\tau_w^0 = \int \int T_0 F(k, \varphi) k dk \sin \varphi d\varphi$ , где  $\varphi$  – угол между направлением волнового вектора спектральной компоненты и скоростью ветра; предполагается, что  $\kappa \Delta x \ll 1$ . Величина  $T_0$ , следующая из работы (Foss, 2010), может быть записана в виде:

$$T_0 \approx \omega \rho \gamma_m \frac{e^2}{2e^2 - 2e + 1}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $e = E/E_0$  – безразмерная упругость пленки;  $E_0 = \frac{\rho \sqrt{2\nu\omega^3}}{k_0^2}$ ,

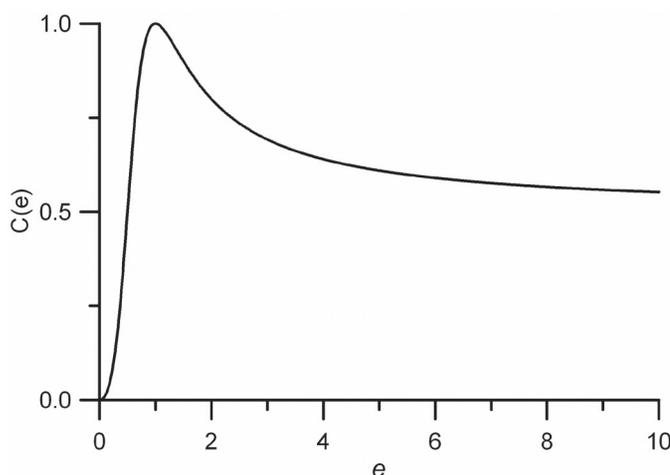


Рис. 3. Зависимость нормированной величины  $C(e) = T_0 / \omega \rho \gamma_m$  от безразмерной упругости

$$\gamma_m = \left( \frac{\nu \omega k_0^2}{2} \right)^{1/2} - \text{максимум временно-}$$

го декремента затухания волны, достигаемый при  $e = 1$  (условие «резонансного» затухания (Ермаков, 2010)).

Отметим, что в выражении (3) опущены малые члены порядка  $O\left(\frac{\kappa}{k_0}, k_0 \delta\right)$ ,

которыми можно пренебречь при  $e \gg \kappa / k_0, k_0 \delta$ , т. е. для случая пленок с не слишком малой упругостью.

Зависимость (3) приведена на рис. 3.

## Обсуждение результатов

Как следует из выражения (3), значительный вклад в индуцированное напряжение дают компоненты поверхностных волн, для которых параметр  $e > 0,2 - 0,3$  и затухание из-за пленки заметно превышает затухание на чистой воде. Для упругости порядка и больше 10 мН/м, что типично как для биогенных, так и для нефтяных пленок, это волны с длинами менее 20–30 см. Более длинные волны дециметрового и метрового диапазона испытывают слабое затухание, близкое к затуханию на чистой воде, поэтому индуцированные ими напряжения практически одинаковы и в области пленки, и вне слик и не дают сколько-нибудь заметного дополнительного вклада в силы, действующие на пленку.

Появление в уравнении (1) слагаемого (2) приводит к различным законам растекания пятна пленки в поперечном и продольном направлениях: перпендикулярные к границе слик компоненты индуцированных напряжений от ветровых волн, распространяющихся под углом к ветру и входящих в слик с противоположных его сторон, направлены против сил поверхностного натяжения и замедляют растекание. В продольном направлении индуцированные напряжения действуют в направлении ветра как с наветренной, так и с подветренной стороны слик, приводя, как следует ожидать, к увеличению скорости дрейфа пятна (Phillips, 1977). При анализе растекания слик с учетом индуцированных напряжений, который проводился в работах (Ermakov et al. 2015; Ермаков и др., 2016), были получены зависимости осей слик от времени в предположении постоянства упругости пленки и показано неплохое согласие с данными экспериментов – по крайней мере, на начальной стадии растекания. В то же время на более поздних стадиях растекания учет изменения упругости пленки при растекании слик может оказаться принципиальным.

Не ставя в данной статье задачи сделать детальный расчет индуцированных напряжений и, соответственно, дать количественное описание эволюции растекающегося пятна, ограничимся качественным объяснением эффекта сжатия слик. Предлагаемое ниже объяснение наблюдавшегося в эксперименте эффекта компрессии пленки на достаточно больших временах растекания как раз основано на учете изменения упругости пленки с уменьшением концентрации растекающегося слик.

Действительно, концентрация ПАВ в растекающемся слик распределена неоднородно, уменьшаясь от центра слик к его краям. Упругость пленки, как правило, уменьшается с концентрацией ПАВ, по крайней мере, если речь не идет о жирных полимерах (Ермаков, 2010). На небольшом времени растекания концентрация ПАВ вблизи границ слик велика, в частности, в случае насыщенной пленки с микрокаплями (перенасыщенная пленка), упругость пленки при этом также велика и практически не зависит от средней концентрации ПАВ. Величины индуцированных напряжений соответствуют большим значениям  $e$  на кривой *рис. 3*. На более поздних стадиях растекания средняя концентрация пленки снижается, капли растекаются и исчезают, однако до тех пор, пока пленка остается насыщенной, ее упругость максимальна и не меняется, соответственно, не меняется и индуцированное напряжение, величина которого близка к  $1/2$  от максимальной при  $e = 1$ . При дальней-

шем растекании, когда в приграничной области сликa капельная фаза исчезает, а концентрация ПАВ в мономолекулярной пленке и ее упругость начинают убывать,  $F_{induced}$  возрастает, приближаясь к максимальной величине при  $E = E_0$ . Одновременно с ростом  $F_{induced}$  при уменьшении концентрации ПАВ уменьшается и  $\Delta\sigma$ . Рост  $F_{induced}$  и уменьшение  $\Delta\sigma$  нарушают баланс в уравнении (1), в результате чего режим растекания пленки может смениться ее сжатием. В дальнейшем возможно достижение равновесной ширины сликa при выполнении условия  $\Delta\sigma - F_{induced} = 0$ .

### Заключение

Сформулируем основные выводы работы. Обнаружено явление компрессии пленочного сликa в поперечном к ветру направлении, которая на достаточно больших временах сменяет режим растекания. Далее стадия сжатия переходит в стадию стационарного сликa с практически неизменными во времени масштабами.

Дано физическое объяснение эффекта, основанное на анализе особенностей индуцированных волновых напряжений, а именно на немонотонной зависимости величины индуцированных волновых напряжений от упругости пленки, которая меняется при изменении концентрации ПАВ в процессе растекания сликa.

В дальнейшем предполагаются более детальные эксперименты с искусственными сликaми и количественное описание различных стадий эволюции пленочных сликoв.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-05-00876 а, 15-45-02690 р\_поволжье\_а, 15-35-20992 мол\_а\_вед, 17-05-00448 а).

### Литература

1. *Ермаков С.А., Лаврова О.Ю., Капустин И.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А.* Исследование особенностей геометрии пленочных сликoв на морской поверхности по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 97–105.
2. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 163 с.
3. *Ермошкин А.В., Капустин И.А.* Исследование особенностей растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 113–119.
4. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 376 с.
5. *Ermaikov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J.* Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms // Proc. SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. Vol. 9638. ID 963807. DOI: 10.1117/12.2195004.
6. *Foss M.* Manifestation of momentum transfer in case of ocean surface waves being damped by an elastic film or a viscous layer: Dis. dr. sci., University of Tromso, Norway. 2000. 128 p.
7. *Phillips O.M.* Dynamics of the upper ocean. Cambridge University Press. 1977. 336 p.

# On the effect of film slick compression

S.A. Ermakov, A.V. Ermoshkin, I.A. Kapustin

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod 603950, Russia*

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

A new effect has been discovered in the field experiments at the Gorky Water Reservoir. The effect consists in stopping of film spreading over water surface followed by compression of the film and transition to a steady state. The evolution of a spot of a surfactant film with pre-measured characteristics was studied. The observations were carried out with navigational radar mounted on a lighthouse. A physical explanation of the effect is suggested based on consideration of surface stresses, induced by wind waves that act against surface tension forces, thus reducing film spreading. The induced stresses for highly elastic films increase with elasticity reduction and achieve a maximum at some elasticity value, depending on viscosity and wave frequency. Surfactant concentration as well as elasticity and film pressure decrease during film spreading. As a result, the induced stress can exceed the surface tension force which results in film compression and transition to an equilibrium state.

**Keywords:** films on the sea surface, slicks, wind waves, radar probing

*Accepted: 25.05.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294*

## Reference

1. Ermakov S.A., Lavrova O.Yu., Kapustin I.A., Makarov E.V., Sergievskaya I.A., Issledovaniya osobennosti geometrii plenochnikh slikov na morskoi poverhnosti po dannym sputnikovikh nabludenii (The study of peculiarities of the geometry of film slicks on the sea surface from data of satellite observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 97–105.
2. Ermakov S.A., *Vliyaniye plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Influence of films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhniy Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p.
3. Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Issledovanie osobennosti rastekaniya plenok poverkhnostno-aktivnykh veschestv na poverkhnosti vnutrennikh vodoemov morskim navigatsionnym radiolokatorom (Study of the spreading of surface-active substances on the surface of inland water reservoirs using nautical radar), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 113–119.
4. Monin A.S., Krasitskiy V.P., *Yavleniya na poverkhnosti oceana* (Phenomena on the ocean surface), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 376 p.
5. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J., Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms, *Proc. SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2015, Vol. 9638, ID 963807. DOI: 10.1117/12.2195004.
6. Foss M., *Manifestation of momentum transfer in case of ocean surface waves being damped by an elastic film or a viscous layer: Dis. dr. sci.*, University of Tromso, Norway, 2000, 128 p.
7. Phillips O.M., *Dynamics of the upper ocean*, Cambridge University Press, 1977, 336 p.