

Влияние температуры окружающей среды на вязкоупругие свойства нефтяных плёнок в приложении к проблеме дистанционного зондирования

И. А. Сергиевская^{1,2}, Т. Н. Лазарева¹

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: i.sergia@ipfran.ru*

² *Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, 603005, Россия*

В данной работе приведены результаты лабораторных измерений коэффициента затухания волн на поверхности воды, покрытой плёнками сырой нефти, керосина и дизельного топлива толщиной от сотых долей до нескольких миллиметров. Температура воздуха и воды изменялась от 1 до 25 °С, частота волн составила 10–27 Гц, что соответствует брэгговской длине волны радиолокатора X-диапазона при умеренных углах падения. При измерениях использовался метод параметрических волн, с помощью которого определялось пороговое ускорение, при котором возбуждались поверхностные волны, и длина волны при заданной частоте возбуждения, что позволяло рассчитать коэффициент затухания волн. Данные лабораторных измерений показали, что коэффициент затухания сантиметровых волн увеличивается с уменьшением температуры окружающей среды для сырой нефти и нефтепродуктов во всём диапазоне толщины плёнок. Восстановленная упругость плёнок практически не зависит от частоты волн и возрастает с уменьшением температуры. С использованием физической модели ветровых волн, учитывающей как свободные ветровые волны, так и вынужденные, сделана оценка влияния температуры на спектральный контраст волн (отношение спектральной интенсивности на чистой поверхности и поверхности, покрытой плёнками нефтепродуктов). Показано, что радиолокационный контраст в брэгговском приближении в сликах нефти при температуре порядка 25 °С может быть в несколько раз меньше контраста при температуре 1–4 °С. Эффект значителен для длины волны сантиметрового диапазона.

Ключевые слова: сырая нефть, дизельное топливо, керосин, затухание волн, упругость, температура окружающей среды

Одобрена к печати: 11.03.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-176-183

Введение

Нефть и нефтепродукты являются основными загрязнителями океана и шельфовой зоны. Одним из наиболее перспективных средств обнаружения, диагностики загрязнений и выделения их на фоне других физических процессов в приповерхностном слое океана являются многочастотные радиолокаторы СВЧ-диапазона (Ермаков et al., 2018; Hansen et al., 2016 и цитируемая в данных публикациях литература). При умеренных углах падения нефтяные загрязнения хорошо видны на радиолокационных изображениях морской поверхности в виде областей пониженной интенсивности, которая определяется степенью гашения коротких гравитационно-капиллярных волн (ГКВ), а значит, физическими характеристиками загрязняющих плёнок. Для выделения зон нефтяных загрязнений на радиолокационных изображениях морской поверхности на фоне областей с пониженной интенсивностью сигнала, связанной с иными процессами в приповерхностном слое (например, штилевыми зонами), и для распознавания типа загрязнителей необходимо знать особенности гашения волн разными веществами и, следовательно, физические характеристики этих веществ. Наиболее полно исследованными характеристиками сырой нефти и нефтепродуктов является вязкость и поверхностное натяжение, так как именно эти параметры определяют возможности добычи, транспортировки и использования нефти (Мерициди, 2008 и цитируемая в публикации литература), хорошо изучены их зависимости от температуры. В то же время для дистанционной

диагностики нефтяных загрязнений по изменчивости гашения волн на поверхности водоемов важной характеристикой является упругость. Заметим, что гашение волн тонкой плёнкой определяется только упругостью и коэффициентом поверхностного натяжения (Левич, 1959; Jenkins, Jakobs, 1997). Результаты измерений и подробный анализ полученных данных для плёнок сырой нефти (смесь Mixture of Urals and Siberian Light), осветительного керосина и дизельного топлива при комнатной температуре представлены в работах (Сергиевская, Ермаков, 2017; Pogorzelski et al., 1984; Sergievskaya, Ermakov, 2019; Sergievskaya et al., 2016, 2017, 2019), там же определены параметры вязкоупругости для плёнок исследуемых веществ. Однако, насколько известно авторам, исследования влияния температуры окружающей среды на упругость плёнок нефтепродуктов и, соответственно, на гашение ветровых волн ранее не проводились, хотя в последнее время в связи с развитием добычи нефти на шельфе северных морей и её транспортировки в условиях низкой температуры этот вопрос становится особенно актуальным. В данной работе проанализировано гашение поверхностных волн плёнками сырой нефти и нефтепродуктов при изменении температуры окружающей среды от 1 до 25 °С для длин волн, которые являются брэгговскими для радиолокаторов X-диапазона при умеренных углах падения, восстановлена упругость плёнок, оценено влияние температуры окружающей среды на радиолокационный контраст изображения нефтяных плёнок. Полученные данные могут быть использованы при анализе радиолокационных изображений нефтяных загрязнений, для усовершенствования моделей изображения плёночных сликов, для развития методов спутниковой диагностики нефтяных загрязнений.

Лабораторный эксперимент

Лабораторные измерения затухания волн с частотами 10–27 Гц на поверхности воды, покрытой плёнками нефти и нефтепродуктов толщиной от сотых долей до нескольких миллиметров, при разной температуре окружающей среды проводились в специальной термостатической камере, позволяющей поддерживать заданную температуру в течение каждой серии измерений, вода и воздух имели одинаковую температуру. Образцы сырой нефти и нефтепродуктов между экспериментами хранились в закрытых сосудах, таким образом, свойства веществ на протяжении экспериментов не менялись. Для измерения затухания использовался метод параметрических волн (Ермаков и др., 1996; Ermakov, Kijashko, 2006). Метод позволяет определять пороговое ускорение, при котором на поверхности воды в кювете начинают возбуждаться поверхностные волны, и длину волны при заданной частоте возбуждения. Для ГКВ-волн пороговое ускорение Δg и коэффициент затухания волн γ на поверхности воды связаны следующим образом:

$$\gamma = \frac{\Delta g \cdot k \cdot th(kh)}{4\omega} - \sqrt{\frac{\omega v^*}{2}} \cdot \frac{2b+a}{ab}, \quad (1)$$

где k , ω — волновое число и частота волн; a , b — размеры кюветы; h — высота воды в кювете. Второе слагаемое в формуле (1) описывает затухание волн на стенках кюветы. Для описания связи частоты и длины волны будем использовать эффективный коэффициент поверхностного натяжения (ЭКПН):

$$\text{ЭКПН} = \frac{\sigma}{\rho} = \frac{\omega^2 / th(kd) - gk}{k^3}. \quad (2)$$

Очевидно, что ЭКПН равен коэффициенту поверхностного натяжения (КПН) на сплошном веществе и сумме КПН на границах воздух/нефть (нефтепродукт) и нефть (нефтепродукт)/вода (Jenkins, Jacobs, 1997). Гашение волн тонкой плёнкой ПАВ (поверхностно активные вещества) на поверхности жидкости с плотностью ρ и вязкостью v^* равно (см., например, работу (Lucassen-Reynders, Lucassen, 1969)):

$$\gamma = 2\nu^*k^2 \operatorname{Re} \left[\frac{1 - X + XY}{1 - 2X + 2X^2} \right], \quad X = \frac{Ek^2}{(2\omega^3\nu^*\rho^2)^{1/2}}, \quad Y = \frac{Ek}{4\rho\omega\nu^*}, \quad (3)$$

где $E = \Gamma(\partial\sigma/\partial\Gamma)$ — упругость плёнки; Γ — поверхностная концентрация плёнки. Таким образом, измеряя пороговое значение ускорения и длину волны для случая тонкой плёнки (под тонкой понимается плёнка толщиной много меньше толщины вязкого подслоя $d \ll \sqrt{\nu/\omega}$), можно определить упругость по формулам (1) и (3), определение характеристик плёнок конечной толщины подробно описано в работе (Sergievskaya et al., 2019).

Результаты

Пример измеренных коэффициентов затухания и ЭКПН в зависимости от толщины плёнки приведён для частоты волны 10 Гц на рис. 1–3.

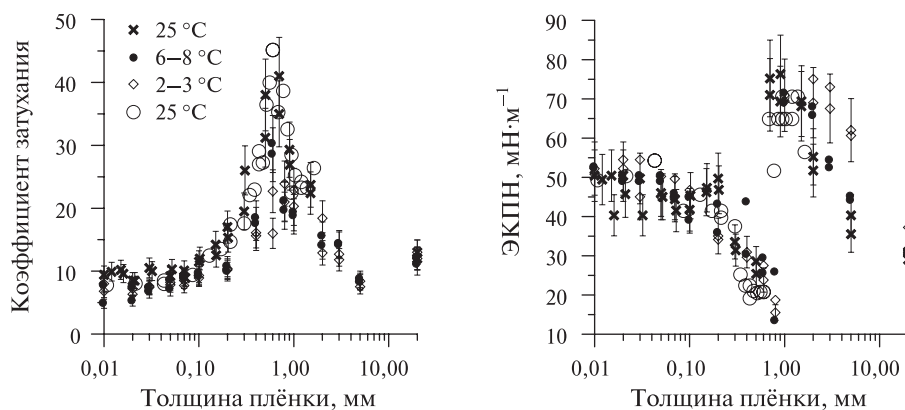


Рис. 1. Зависимости коэффициента затухания волн (нормированы на затухание на чистой воде при той же температуре) и ЭКПН на поверхности воды, покрытой плёнкой сырой нефти, при разной температуре. Кресты — 25 °С; чёрные круги — 6–8 °С; полые ромбы — 2–3 °С; полые круги — 25 °С по данным статьи (Ермаков и др., 2012)

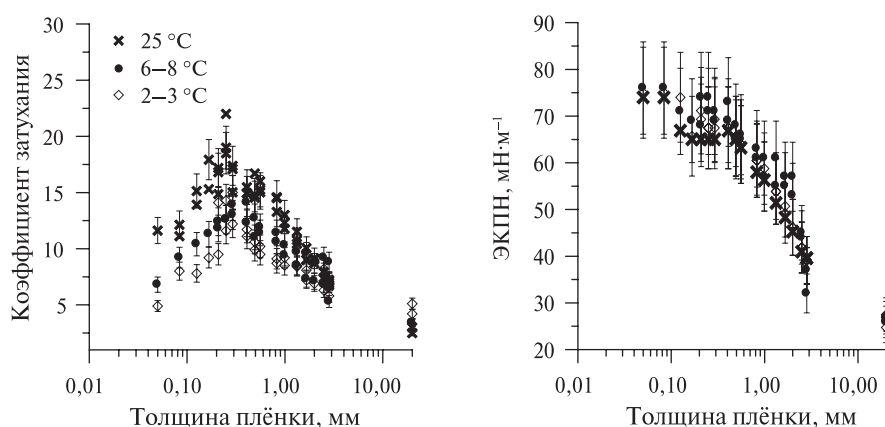


Рис. 2. То же самое, что на рис. 1, для осветительного керосина

Точки справа (при толщине более 1 см) соответствуют коэффициенту затухания и ЭКПН на сплошном веществе. Заметим, что сырая нефть обычно плохо растекается по поверхности, образуя неоднородную коричневатую плёнку даже для толщины порядка сотых долей миллиметра, дизельное топливо и керосин при той же толщине образуют однородную плёнку.

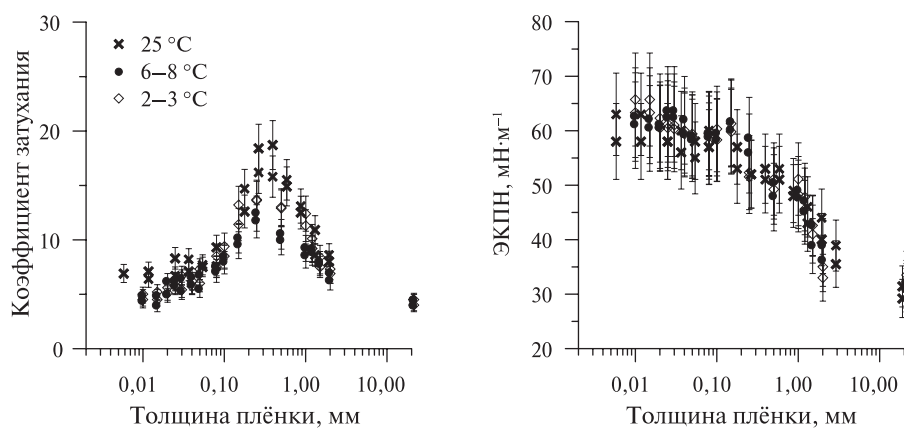


Рис. 3. То же самое, что на рис. 1, для дизельного топлива

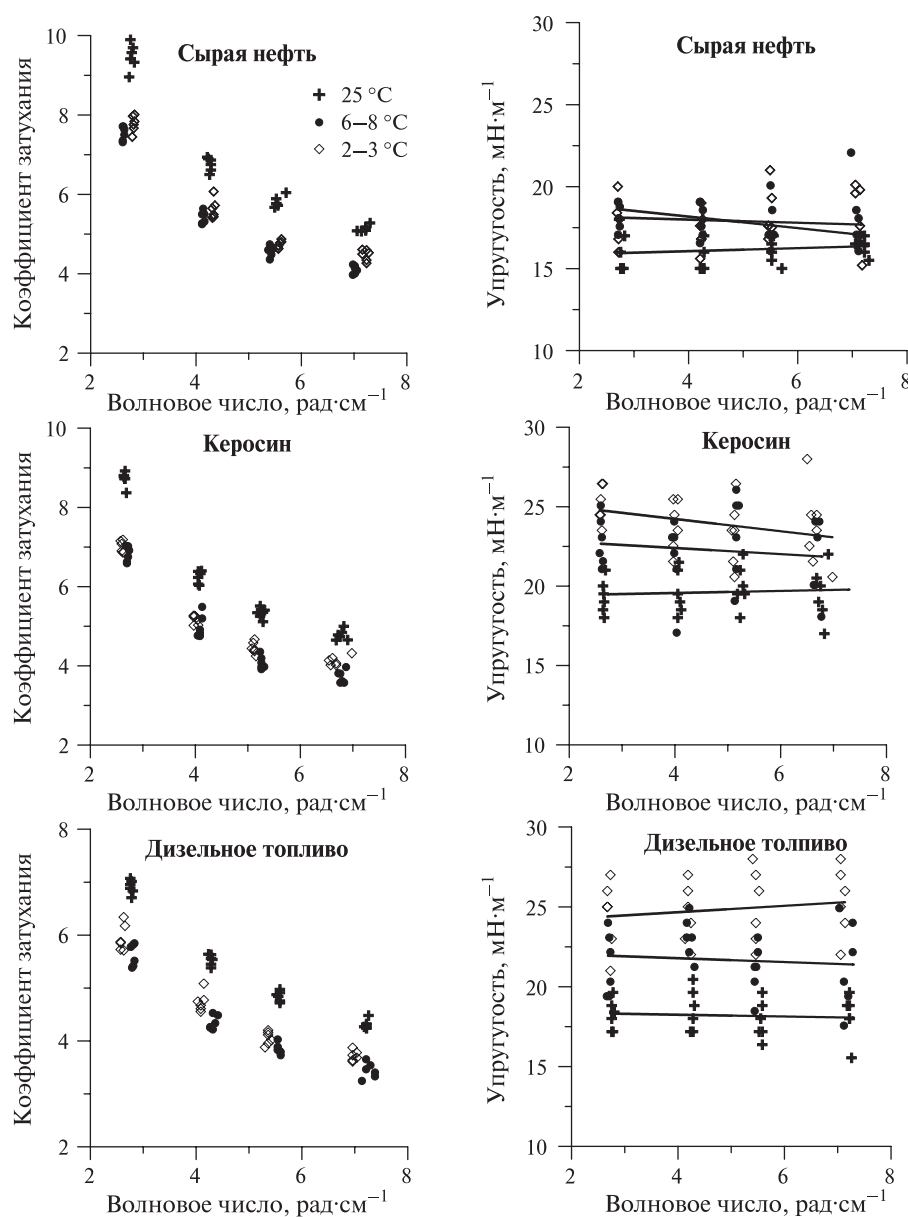


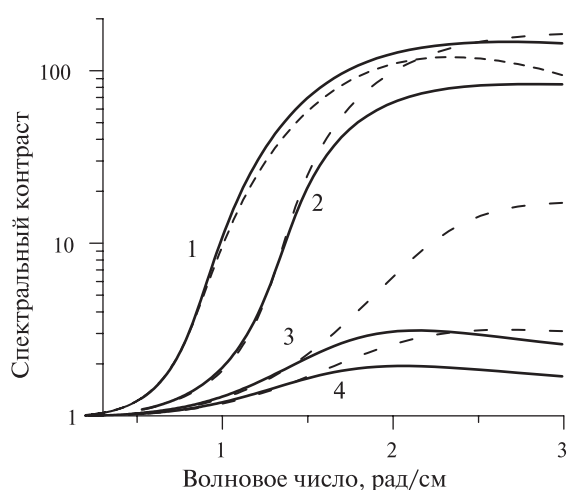
Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания от длины волны для тонкой плёнки (слева) и восстановленная упругость плёнки (справа) для разных веществ (сверху вниз: сырая нефть, керосин, дизельное топливо). Кресты — 25 °С; чёрные круги — 6–8 °С; полые ромбы — 2–3 °С

На *рис. 1–3* видно, что коэффициенты затухания для всех нефтепродуктов и при всех значениях температуры имеют максимум при толщине менее или порядка 1 мм; однако ЭКПН керосина и дизельного топлива практически монотонно (в пределах ошибки измерения) уменьшаются с толщиной плёнки, в то время как ЭКПН сырой нефти имеет скачок от локального минимума до локального максимума при толщине плёнки, где наблюдается максимум коэффициента затухания. Качественное различие в зависимостях объясняется величиной вязкости вещества, которая значительно больше для данного образца сырой нефти ($0,1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), чем для используемых в экспериментах образцов керосина и дизельного топлива ($0,02–0,04 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) (Sergievskaya, Ermakov, 2019).

Несмотря на достаточно большую ошибку, видно, что относительный коэффициент затухания всех трёх веществ при комнатной температуре выше, чем при низкой температуре, хотя следует заметить, что абсолютный коэффициент затухания слабо зависит от температуры. Тот же эффект наблюдается для других частот (10–27 Гц). Определение влияния температуры на ЭКПН затруднительно из-за больших ошибок измерения. На *рис. 4* (см. с. 179) (*слева*) представлены зависимости коэффициентов затухания волн на тонкой плёнке сырой нефти, керосина, дизельного топлива от волнового числа. Для построения этой зависимости взяты значения коэффициента затухания при небольших толщинах плёнки там, где коэффициент затухания слабо зависит от толщины плёнки. На *рис. 4* (*справа*) точками представлена упругость, восстановленная по формуле (3) для значений коэффициента затухания с *рис. 4* (*слева*), прямые линии — средние значения упругости. На *рис. 4* видно, что упругость плёнок сырой нефти, керосина и дизельного топлива или слабо, или вообще не зависит от частоты (во всяком случае в пределах ошибки измерения) и в то же время заметно увеличивается при уменьшении температуры окружающей среды.

Влияние спектральных контрастов ветровых волн при разной температуре окружающей среды

Оценим влияние температуры на изменчивость интенсивности ветровых волн сантиметрового диапазона в сликах нефтепродуктов. Для этого воспользуемся моделью волнения (Kudryavtsev et al., 2005), в которой кроме свободных принимаются во внимание вынужденные волны, возбуждаемые на поверхности при обрушениях более длинных волн. Будем характеризовать гашение волн в областях, покрытых плёнкой сырой нефти и нефтепродуктов, величиной спектрального контраста — отношения интенсивностей волнения на чистой поверхности и в области слика. На *рис. 5* представлены зависимости спектрального контраста от длины волны для дециметрового и сантиметрового диапазонов длины волны; заметим, в этих диапазонах работает большинство радиолокаторов, используемых для обнаружения нефтяных загрязнений. Рисунок показывает, что температура окружающей среды сильно



сказывается на спектральном контрасте волн с длиной 2–3 см, причём наиболее заметно температура влияет на величину спектрального контраста при скоростях ветра, при которых перестают возбуждаться свободные волны (инкремент ветрового возбуждения волн становится меньше коэффициента затухания).

Рис. 5. Зависимость спектрального контраста для тонкой плёнки сырой нефти от длины волны для разных скоростей ветра (1 — 3 м/с, 2 — 5 м/с, 3 — 7 м/с, 4 — 8 м/с) и разной температуры (сплошные кривые — 25 °C, пунктир — 2–3 °C)

Таким образом, видно, что в некоторых случаях спектральный контраст, а следовательно, и радиолокационный контраст в брэгговском приближении при температуре вблизи нуля (2–3 °С) может быть в несколько раз больше, чем при температуре 20–25 °С, что, соответственно, должно учитываться при анализе радиолокационных изображений.

Заключение

Измерены коэффициенты затухания волн на поверхности воды, покрытой плёнкой сырой нефти, дизельного топлива и осветительного керосина, в диапазоне толщины плёнок от сотых долей до нескольких миллиметров для частоты волн 10–27 Гц при нескольких значениях температуры окружающей среды. Показано, что при уменьшении температуры окружающей среды упругость плёнок увеличивается и не зависит (слабо зависит) от частоты волн.

Теоретические расчёты с использованием измеренных значений упругости и коэффициентов поверхностного натяжения при разной температуре показали, что влияние низкой температуры на спектральный контраст ветровых волн на тонкой плёнке сырой нефти (толщина до десятых долей вязкого подслоя) сильно зависит от длины волны и скорости приводного ветра. Уменьшение температуры в некоторых случаях может приводить к существенному (в несколько раз) увеличению радиолокационного контраста в X-диапазоне.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-520008), а также Русского географического общества в рамках гранта «Экспедиция Плавающий университет Волжского бассейна» (договор № 06/2018-Р).

Литература

1. *Ермаков С. А., Кияшко С. В., Коннов И. Р.* О возможности определения параметра упругости поверхностно-активных пленок по измерению затухания стоячих капиллярно-гравитационных волн // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 4. С. 544–547.
2. *Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Гущин Л. А.* Затухание гравитационно-капиллярных волн в присутствии нефтяной пленки по данным лабораторных и численных экспериментов // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 5. С. 565–752.
3. *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959. 700 с.
4. *Мерициди И. А.* Техника и технология локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Сер. «Нефтегазовый комплекс». СПб.: НПО «Профессионал», 2008. 824 с.
5. *Сергиевская И. А., Ермаков С. А.* Затухание гравитационно-капиллярных волн на воде, покрытой вязкоупругой пленкой конечной толщины // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 6. С. 738–746. DOI: 10.7868/S0003351517060083.
6. *Ermakov S. A., Kijashko S. V.* Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films // Marine surface films / eds. M. Gade, H. Huehnerfuss, G. Korenovski. Berlin: Springer, 2006. P. 113–128. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-33271-5_12.
7. *Ermakov S., Sergievskaya I. A., Da Silva J. C. B., Kapustin I. A., Shomina O. B., Kupaev A. V., Molkov A. A.* Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X // Remote sensing. 2018. No. 10(7) P. 1097. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10071097>.
8. *Hansen M. W., Kudryavtsev V., Chapron B., Brekke C., Johannessen J. A.* Wave Breaking in Slicks: Impacts on C-Band Quad-Polarized SAR Measurements // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. No. 11. P. 4929–4940. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2587840.
9. *Jenkins A., Jakobs S.* Wave damping by a thin layer of viscous fluid // Physics of Fluids. 1997. V. 9. No. 5. P. 1256–1264. DOI: 10.1063/1.869240.
10. *Kudryavtsev V. N., Akimov D., Johannessen J. A., Chapron B.* On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. P. C07016. DOI: 10.1029/2004JC002505.
11. *Lucassen-Reynders E. N., Lucassen J.* Properties of capillary waves // Advances in Colloid and Interface Science. 1969. V. 2. No. 4. P. 347–395. URL: [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(70\)80001-X](https://doi.org/10.1016/0001-8686(70)80001-X).
12. *Pogorzelski S., Linde B., Sliwinski A.* Capillary wave attenuation on a water surface coated with monolayers of oil-derivative substances // Acoustics Letters. 1984. V. 8. No. 1. P. 5–9.

13. *Sergievskaya I., Ermakov S.* A phenomenological model of wave damping due to oil films // Proc. SPIE. 2019. V. 11150. P. 111500K. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2533242>.
14. *Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T.* Damping of short gravity-capillary waves due to oil derivatives film on the water surface // Proc. SPIE. 2016. V. 9999. P. 999903. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2241811>.
15. *Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T., Lavrova O.* Damping of surface waves due to oil emulsions in application to ocean remote sensing // Proc. SPIE. 2017. V. 10422. P. 104221H. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2278575>.
16. *Sergievskaya I., Ermakov S. A., Lazareva T. N., Guo J.* Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water // Marine Pollution Bull. 2019. No. 146. P. 206–214. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.018>.

The influence of water temperature on viscoelastic properties of oil films in application to remote sensing

I. A. Sergievskaya^{1,2}, T. N. Lazareva¹

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: i.sergia@ipfran.ru

² *Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603005, Russia*

The paper presents the results of our laboratory measurements of wave damping coefficient on water surface covered by films of crude oil, kerosene and diesel fuel with thickness from hundredths to several millimeters. The temperature of water and air varied from 1 to 25 °C, the wave frequencies were 10–27 Hz, which corresponds to Bragg wavelength of X-band radar at moderate incidence angles. The method of parametric wave was used, which made it possible to measure the threshold acceleration at which surface waves were generated and the wavelength at a given wave frequency and to calculate the wave damping coefficient. The obtained results show that the damping coefficient of centimeter waves increases when the temperature decreases at all film thicknesses and wave frequencies. The retrieved elasticity of the films is practically independent of wave frequency and increases with temperature decrease. Using a physical model of wind wave spectrum, which takes into account both free and bound surface waves, the influence of water and air temperature on the spectral contrast of waves (the ratio of spectral intensity on clean and contaminated surfaces) was analyzed. It was shown that the radar contrast in the Bragg approximation in oil slicks at the temperature of about 25 °C can be several times less than the contrast at the temperature of 2–4 °C. The effect is significant for wavelengths of the order of several centimeters.

Keywords: crude oil, diesel fuel, kerosene, wave damping, elasticity, ambient temperature

Accepted: 11.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-176-183

References

1. Ermakov S. A., Kijashko S. V., Konnov I. R., O vozmozhnosti opredeleniya parametra uprugosti poverkhnostno-aktivnykh plenok po izmereniyu zatukhaniya stoyachikh kapillyarno-gravitatsionnykh voln (On the possibility of determining the elasticity parameter of surface-active films by measuring the damping of standing capillary-gravitational waves), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 1996, Vol. 32, No. 4, pp. 544–547.
2. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Gushin L. A., Zatukhanie gravitatsionno-kapillyapnykh voln v prisutstvii neftyanoi plenki po dannim laboratornykh i chislennikh experimentov (Damping of gravity-capillary waves in the presence of oil slicks according to data from laboratory and numerical experiments), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2012, Vol. 48, No. 5, pp. 565–752.
3. Levich V. G., *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* (Physicochemical hydrodynamics), Moscow: GIFML, 1959, 700 p.

4. Meritsidi I. A., *Tekhnika i tekhnologiya lokalizatsii i likvidatsii avariinykh razlivov nefiti i nefieproduktov* (Technique and technology for localization and liquidation of emergency oil and oil-derivative spills), Saint Petersburg: NPO "Professional", 2008, 824 p.
5. Sergievskaya I. A., Ermakov S. A., Zasukhanie gravitatsionno-kapillyapnykh voln na vode, pokrytoi vyazkoupругoi plenкой konechnoi tolshchiny (Damping of gravity-capillary waves on water surface covered with a visco-elastic film of finite thickness), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 6, pp. 738–746, DOI: 10.7868/S0003351517060083.
6. Ermakov S. A., Kijashko S. V., Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films, In: *Marine surface films*, Berlin: Springer, 2006, pp. 113–128, DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-33271-5_12.
7. Ermakov S., Sergievskaya I. A., Da Silva J. C. B., Kapustin I. A., Shomina O. B., Kupaev A. V., Molkov A. A., Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X, *Remote sensing*, 2018, No. 10(7), p. 1097, available at: <https://doi.org/10.3390/rs10071097>.
8. Hansen M. W., Kudryavtsev V., Chapron B., Brekke C., Johannessen J. A., Wave Breaking in Slicks: Impacts on C-Band Quad-Polarized SAR Measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, No. 11, pp. 4929–4940, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2587840.
9. Jenkins A., Jakobs S., Wave damping by a thin layer of viscous fluid, *Physics of Fluids*, 1997, Vol. 9, No. 5, pp. 1256–1264, DOI: 10.1063/1.869240.
10. Kudryavtsev V. N., Akimov D., Johannessen J. A., Chapron B., On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, p. C07016, DOI: 10.1029/2004JC002505.
11. Lucassen-Reynders E. N., Lucassen J., Properties of capillary waves, *Advances in Colloid and Interface Science*, 1969, Vol. 2, No. 4, pp. 347–395, available at: [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(70\)80001-X](https://doi.org/10.1016/0001-8686(70)80001-X).
12. Pogorzelski S., Linde B., Sliwinski A., Capillary wave attenuation on a water surface coated with monolayers of oil-derivative substances, *Acoustics Letters*, 1984, Vol. 8, No. 1, pp. 5–9.
13. Sergievskaya I., Ermakov S., A phenomenological model of wave damping due to oil films, *Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, p. 111500K, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2533242>.
14. Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T., Damping of short gravity-capillary waves due to oil derivatives film on the water surface, *Proc. SPIE*, 2016, Vol. 9999, p. 999903, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2241811>.
15. Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T., Lavrova O., Damping of surface waves due to oil emulsions in application to ocean remote sensing, *Proc. SPIE*, 2017, Vol. 10422, p. 104221H, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2278575>.
16. Sergievskaya I., Ermakov S. A., Lazareva T. N., Guo J., Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water, *Marine Pollution Bull.*, 2019, No. 146, pp. 206–214, available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.018>.