

ДИАГНОСТИКА МИКРОЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

Е. В. Лебедева^{a}, А. М. Дюгаев^b, П. Д. Григорьев^{b,c}*

^a *Институт физики твердого тела Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

^b *Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

^c *Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС»
119049, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 17 января 2022 г.,
после переработки 17 января 2022 г.
Принята к публикации 18 января 2022 г.

Предложен новый метод исследования свойств микрочастиц на поверхности жидкости. Наблюдения динамики микрогранул полиамида-12 на поверхности воды проводятся двумя способами. В первом случае капля воды с гранулами, подвешенная на стеклянной подложке, наблюдается снизу, во втором слой воды с микрочастицами на поверхности наблюдается сверху. Выяснилось, что в обоих случаях частицы покрыты пленкой воды и не имеют контакта с воздухом, так же как и стеклянные микросферы, которые легче воды в несколько раз. При высыхании воды они полностью погружены в ее отдельные лужицы. Методом интерферометрии установлено, что деформация поверхности воды в подвешенной капле с гранулами полиамида, связанная с действием сил гравитации, не может превышать нескольких десятков нанометров. Наблюдения показали, что микрочастицы полиамида-12, имеющие плотность, большую, чем плотность воды, прилипают к ее поверхности, локализуясь под ней. Прослежена связь предложенного метода с экспериментом и теорией для микрочастиц у поверхности жидкого гелия.

DOI: 10.31857/S0044451022050157
EDN: DTLGRT

1. ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах по изучению вихревых течений в объеме жидкости и на ее поверхности используются декорирующие частицы. Плотность частиц ρ_A близка к плотности жидкости ρ_L , а их радиус R_0 составляет десятки микрометров. Такие частицы, двигаясь в потоке жидкости, не вносят искажений в поле скоростей и дают возможность наблюдать сложные гидродинамические процессы оптическими методами. Так, например, в экспериментах [1–4] по изучению турбулентности в воде использовались гранулы полиамида-12 со средним размером 30 мкм. В работах [5–7] визуализация вихревого движения на поверхности сверхтекучего гелия осуществлялась при помощи полых стеклянных микросфер со средним диаметром 50 мкм.

Наблюдения за поведением визуализирующих частиц после прекращения внешнего возбуждения жидкости, которое использовалось для создания вихревых течений, показали, что эти частицы с течением времени слипаются в кластеры большого (до нескольких сантиметров) размера. Явление самоорганизации наблюдалось как на поверхности сверхтекучего гелия [5], так и на поверхности воды [4]. В работе [8] было показано, что стеклянные микросферы могут сформировать двумерную структуру под действием сил поверхностного натяжения. Что касается кластеризации полиамидных гранул на поверхности воды, было обнаружено, что плотность распределения кластеров по размерам имеет степенной вид [4].

В экспериментах [5–7] декорирующие частицы (трейсеры), имеющие плотность, мало отличающуюся от плотности жидкости, были локализованы под ее поверхностью. В работе [9] было показано, что для жидкого гелия при размерах частиц, много меньших капиллярной длины, их возвышение над поверхностью жидкости мало. Это означает, что для таких частиц понятие угла смачивания теря-

* E-mail: lebedeva@issp.ac.ru

ет смысл. Кроме того, была определена глубина, на которой будет находиться легкая микрочастица под поверхностью сверхтекучего гелия. Это положение равновесия было найдено с учетом дисперсионных сил.

Взаимодействие с поверхностью жидкости плавающих макроскопических предметов, имеющих размеры порядка или больше капиллярной длины, хорошо изучено (см., например, работы [10–12]). Плавающие предметы больших размеров всегда деформируют поверхность. Имеется обширная литература по исследованиям коллоидных частиц на границе раздела жидкости и газа или двух различных жидкостей. Особенности взаимодействия таких частиц с поверхностью связаны с их субмикронными размерами, с наличием двойного электрического слоя и, в большинстве случаев, с лиофобностью, что отражено, например, в работах [13–16]. Есть еще одна актуальная тема, связанная с содержанием нашей статьи — испарение капель коллоидных растворов (см. обзор [17]).

Мы хотим исследовать, как взаимодействует с поверхностью жидкости микрочастица, определить, деформирует ли она горизонтальную поверхность жидкости, на примере полиамидных гранул и полых стеклянных микросфер, которые используются для визуализации течений в воде и жидком гелии.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Производители микрогранул полиамида-12 (ПА-12) приводят следующие данные о его свойствах: плотность 0.99–1.01 г/см³, коэффициент преломления 1.52–1.53. В экспериментах [18] измеряли угол смачивания водой полиамидной поверхности, θ . Оказалось, что для ПА-12 этот угол меняется в пределах $\theta = 55\text{--}78^\circ$. Это означает не очень хорошую смачиваемость, и можно предположить, что при аккуратном распылении сверху сухие гранулы будут находиться на поверхности воды, деформируя ее.

Если насыпать полиамидные гранулы на поверхность неподвижной воды, почти все они останутся на поверхности. При этом почти все частицы имеют плотность, большую плотности воды, что подтверждает простой опыт. На стеклянную пластину наносили каплю дистиллированной воды диаметром 8 мм, что обеспечивало заметную кривизну поверхности. Сверху на каплю распыляли гранулы, которые перемещались на края капли (рис. 1).

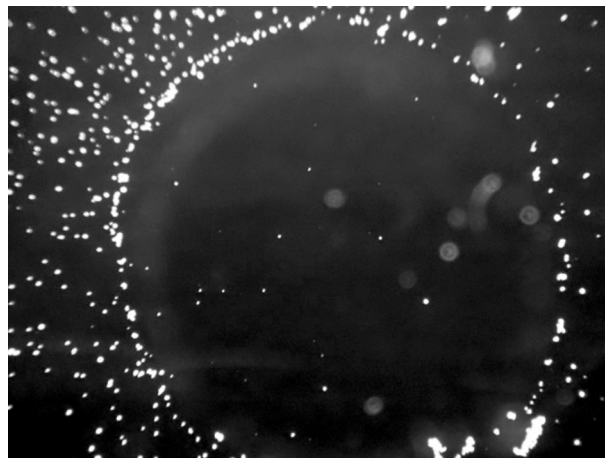


Рис. 1. Фотография капли с полиамидными гранулами на ее краях

Мы попытались выяснить, можно ли наблюдать деформацию поверхности воды находящимися у ее поверхности гранулами с помощью интерферометрических наблюдений. Для этого использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4. Микроскоп в интерферометре, установленный снизу, позволяет рассматривать объекты, расположенные над ним. Для фиксации результатов наблюдений использовалась видеокамера Levenhuk. Микрометрические винты позволяют перемещать объектив микроскопа в горизонтальной плоскости, поле зрения составляет примерно 300×200 мкм². Монохроматический свет для интерференционной картины был получен с помощью желтого светофильтра $\lambda = 586$ нм. Согласно описанию прибора, он позволяет фиксировать искажения плоской поверхности $\delta \geq 30$ нм.

На промытое и очищенное с помощью спирта стекло с оптически полированной поверхностью после оценки его чистоты с помощью микроскопа наносили каплю дистиллированной воды с поперечным размером 3–5 мм и толщиной 0.1–0.3 мм. Толщина капли оценивалась по показаниям микрометрического винта, который фокусирует объектив прибора. Разница в показаниях в начале наблюдений, когда прибор сфокусирован на поверхности капли, и в конце, когда он сфокусирован на поверхности стекла, дает толщину капли. На поверхность капли наносили гранулы. После этого стекло переворачивалось и устанавливалось на столик интерферометра для наблюдений (рис. 2). Второй способ подготовки капли с гранулами — распыление гранул на чистое стекло, а затем нанесение капли поверх гранул.

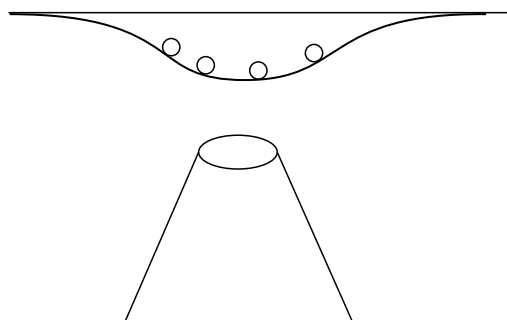


Рис. 2. Схема наблюдений

Было обнаружено, что диаметр отдельных гранул варьируется в широких пределах от 10 до 100 мкм. Выяснилось, что при первом способе нанесения гранул большая их часть покрыта «грязью». Предположительно эта грязь (микронного размера примесные частицы) прилипает к гранулам в контейнере, где они хранились. Ни на сухом стекле, ни на поверхности чистой капли воды такие частицы не наблюдались. При втором способе — нанесении капли на распыленные гранулы — «чистых» гранул наблюдается гораздо больше (рис. 3).

Наблюдения проводились в течение 20–40 мин. За это время капля полностью испарялась. Так как плотность 90 % гранул больше плотности воды, в перевернутой капле эти частицы находятся у поверхности жидкости. В начале наблюдений отдельные гранулы двигались со скоростью до 50 мкм/с. Это движение связано как с кривизной поверхности воды, так и с неравномерным нагреванием капли лучом света от лампы накаливания, которая освещает поле зрения микроскопа. В дальнейшем они слипались в комплексы разнообразной формы.

На поверхности воды можно наблюдать интерференционные полосы, связанные с разностью фаз между световой волной, отраженной от поверхности воды, и опорной световой волной интерферометра. Если на поверхности имеются плавающие частицы, выступающие над ней, то интерференционная картина искажается. Оказалось, что искажения создаются только «грязными» гранулами, на нижней поверхности которых имеются мелкие частицы примесей. Чистые гранулы, хорошо видные у поверхности воды, не искажают интерференционной картины. На рис. 4 приведены парные фотографии. Левые сделаны при обычном освещении, а на правых приведены интерференционные картины с теми же объектами, что и на левой фотографии. Так как открытие шторки интерферометра и фокусировка производятся вручную за несколько секунд, на правой фо-

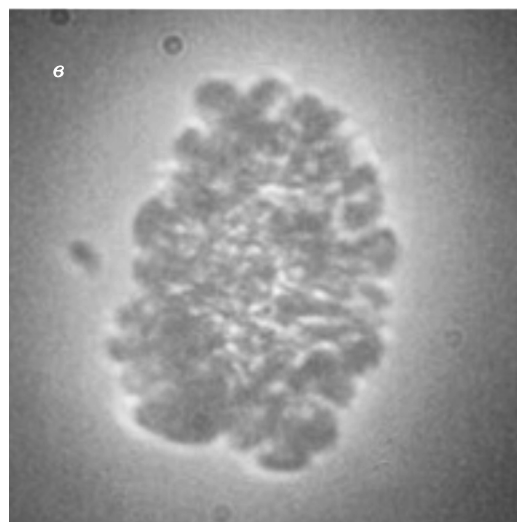
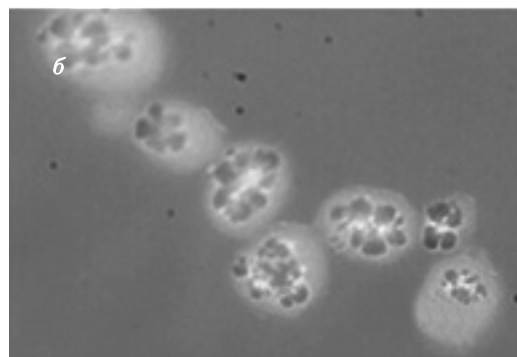
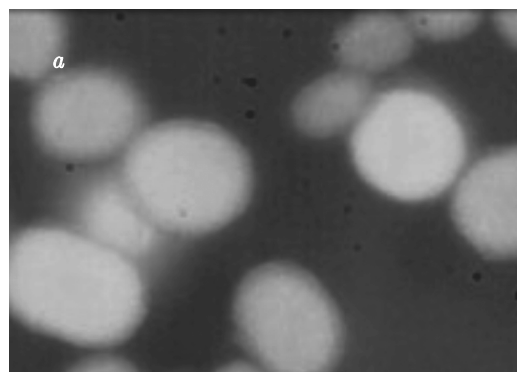


Рис. 3. Скопления чистых (а) и грязных (б) гранул. Микроскоп сфокусирован на контуре гранул, примесные частицы, которые, как выяснилось, находятся на поверхности воды, не попадают в фокус и выглядят расплывчатыми. в) Микроскоп сфокусирован на поверхности воды над грязной гранулой

тографии возможно небольшое смещение гранул по отношению к парной левой.

Оказалось, что вода хорошо смачивает гранулы. Это видно на последних стадиях высыхания капли — даже когда вода испарилась с поверхности стекла, гранулы все еще покрыты водяной пленкой (рис. 5а). Затемнение поверхности воды вблизи час-

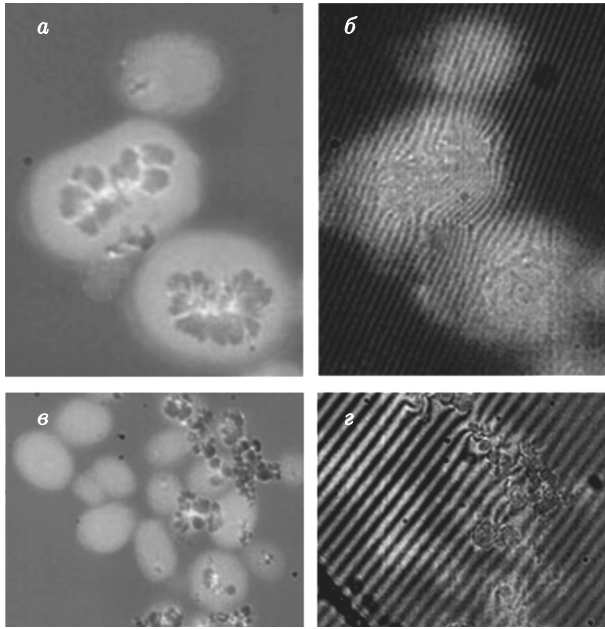


Рис. 4. Чистые и грязные гранулы при обычном освещении (а, в) и при наличии интерференционной картины (б, г)

тицы при высыхании свидетельствует о ее искривлении: искривленная поверхность сильнее рассеивает свет, действуя как линза. Высокая смачиваемость объясняет тот факт, что при распылении гранул на поверхность капли они легко проникают под воду.

Кроме экспериментов с подвешенной каплей с помощью микроскопа БМИ-1Ц мы провели наблюдения за поведением гранул ПА-12 на поверхности слоя воды толщиной 1 мм, налитой в стеклянную кювету. При этом объектив микроскопа был направлен сверху на поверхность воды. При распылении гранул над водой почти все они оставались у поверхности, собираясь за время наблюдения в комплексы.

Последовательность фотографий на рис. 5б изображает заключительную стадию высыхания слоя воды с полиамидными гранулами вблизи поверхности. В верхних частях фотографий гранулы окружены лужицами воды и покрыты водяной пленкой, в нижних видны сухие гранулы, лежащие на дне кюветы там, где вода испарилась. На фотографиях показано уменьшение размера лужиц, окружающих гранулы, и их высыхание. Чтобы добиться лучшей контрастности при обработке изображения, яркое пятно от лампы, подсвечивающей кювету с водой снизу, закрыто черным кругом.

Мы начали исследование взаимодействия с поверхностью воды легких полых стеклянных микросфер с плотностью $\rho_A \approx 0.125 \text{ г/см}^3$ и средним ра-

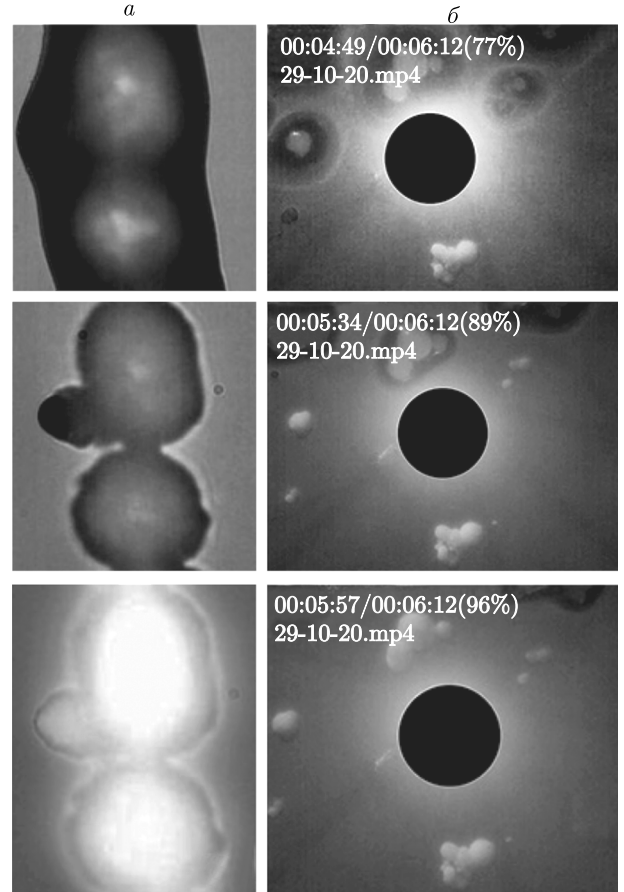


Рис. 5. Последовательные стадии высыхания перевернутой капли (а) и слоя воды с гранулами (б)

диусом $R_0 \approx 50 \text{ мкм}$. Они распылялись над миллиметровым слоем воды. Наблюдения проводились с помощью микроскопа БМИ-1Ц. Выяснилось, что в силу неравенства $R_0 \ll L_k \approx 0.3 \text{ см}$ (L_k — капиллярная длина) такие микрочастицы также слабо деформируют поверхность. Они имеют почти нулевую «плавучесть» и полностью смачиваются водой, возвышаясь над ней на величину h_+ , для которой получена оценка [9]

$$\frac{h_+}{R_0} \approx \left(\frac{R_0}{L_k}\right)^2 \frac{\rho_L - \rho_A}{\rho_L}. \quad (1)$$

Для стеклянных микросфер имеем $R_0/L_k \approx 10^{-2}$, поэтому из выражения (1) получаем $h_+ \approx 100 \text{ \AA}$, что сравнимо с толщиной ван-дер-ваальсовой пленки, которой покрыта частица. На рис. 6 представлен процесс высыхания слоя воды со стеклянными микросферами. В то время как вода с подложки уже испарилась, микросферы все еще покрыты водяной пленкой.

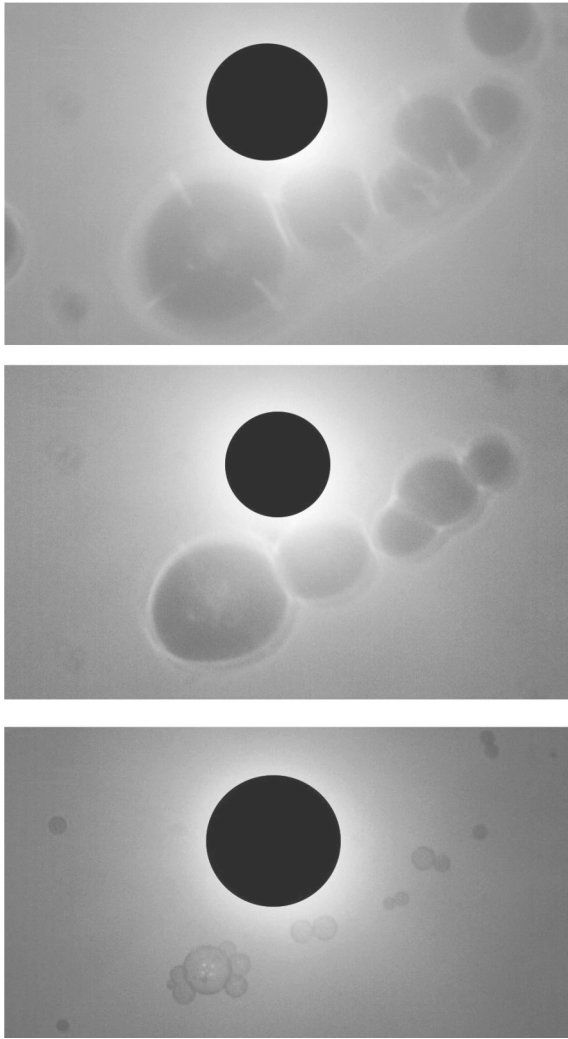


Рис. 6. Заключительная стадия высыхания слоя воды со стеклянными микросферами

На основании выполненных экспериментов можно сделать следующие утверждения.

1) Исследуемые нами легкие ($\rho_A \ll \rho_L$) и тяжелые ($\rho_A > \rho_L$) частицы полностью смачиваются водой. При высыхании слоя воды с частицами на поверхности наблюдается образование капель вокруг отдельных частиц или их скоплений.

2) В перевернутой капле гранулы ПА-12 находятся под поверхностью воды, не деформируя ее.

3) Несмотря на то, что полиамидные гранулы тяжелее воды и хорошо ею смачиваются, они не тонут, а находятся вблизи границы раздела жидкость–воздух. Это означает, что имеется дополнительное вза-

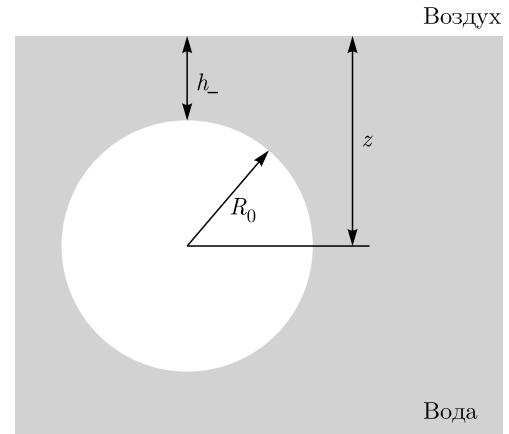


Рис. 7. Микрочастица под поверхностью воды

имодействие, удерживающее частицы у поверхности воды.

3. СРАВНЕНИЕ С ЖИДКИМ ГЕЛИЕМ

Взаимодействие, удерживающее частицы у поверхности воды, описывается теорией, построенной в работе [9] для объяснения поверхностных явлений в жидком гелии, который смачивает все микрочастицы. При этом реализуется картина, представленная на рис. 7 [9]. Частица радиуса R_0 и объема V расположена на расстоянии z от поверхности жидкости. Взаимодействие частицы с поверхностью гелия характеризуется потенциалом [9]

$$v(z) = V \frac{23}{640\pi^2} \hbar c \frac{(\varepsilon_L - \varepsilon_V)(\varepsilon_A - \varepsilon_L)}{(z^2 - R_0^2)^2}, \quad (2)$$

где ε_V , ε_L и ε_A — диэлектрические проницаемости соответственно газовой, жидкой фаз и примесной частицы.

Представление $v(z)$ в виде (2) получено в приближении $\varepsilon_L - 1 \ll 1$, $\varepsilon_A - 1 \ll 1$, что имеет место для шарика, выполненного из твердого водорода в жидком гелии: $\varepsilon_L = 1.057$, $\varepsilon_A = 1.25$. Для воды мы не можем привести аналог $v(z)$ в виде (2). Однако, согласно общей теории дисперсионных сил [19, 20], знак $v(z)$ определяется знаком $(\varepsilon_L - \varepsilon_V)(\varepsilon_A - \varepsilon_L)$, что, конечно, согласуется с выражением (2). Так как всегда $\varepsilon_L > \varepsilon_V$, из (2) следует, что, например, пузырек ($\varepsilon_A = 1$) притягивается к поверхности жидкости. Если качественно принять, что $\varepsilon_A < \varepsilon_L$ для гранул ПА-12 в воде, это объяснит их притяжение к границе раздела вода–воздух.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главной целью нашего исследования было отделить эффекты взаимодействия частиц с водой от их взаимодействия друг с другом. Эксперименты с подвешенными каплями позволили наблюдать два типа микрочастиц — чистых и грязных. Обнаружен эффект дробления капли воды по мере ее высыхания с образованием мелких капель, покрывающих микрочастицы. Показано, что деление частиц на легкие ($\rho_A < \rho_L$) и тяжелые ($\rho_A > \rho_L$, $(\rho_A - \rho_L)/\rho_L \ll 1$), имеющее место в объеме воды, неприменимо к ее поверхности. Тяжелые частицы прилипают к поверхности воды, локализуясь под ней.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Л. П. Межову-Деглину за обсуждения и М. В. Лебедеву за помощь в выполнении эксперимента.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания №0033-2019-001 (ИТФ) и при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант №075-15-2019-1893 (ИФТТ)).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. von Kameke, F. Huhn, G. Fernandez-Garcia et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 074502 (2011).
2. N. Francois, H. Xia, H. Punzmann, and M. Shats, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 194501 (2013).
3. С. В. Филатов, М. Ю. Бражников, А. А. Левченко, *Письма в ЖЭТФ* **102**, 486 (2015).
4. S. V. Filatov, A. V. Poplevin, A. A. Levchenko et al., *Results Phys.* **27**, 104446 (2021).
5. А. А. Левченко, Л. П. Межов-Деглин, А. А. Пельменев, *Письма в ЖЭТФ* **106**, 233 (2017).
6. A. Pelmenev, A. Levchenko, and L. Mezhev-Deglin, *J. Low Temp. Phys.* **205**, 200 (2021).
7. A. Pelmenev, A. Levchenko, and L. Mezhev-Deglin, *Materials* **14**, 7514 (2021).
8. А. А. Левченко, Е. В. Лебедева, Л. П. Межов-Деглин et al., *Low Temp. Phys.* **45**, 469 (2019).
9. А. М. Дюгаев, Е. В. Лебедева, *Письма в ЖЭТФ* **106**, 755 (2017).
10. P. Singh and D. D. Joseph, *J. Fluid Mech.* **530**, 31 (2005).
11. D. Feng and A. V. Nguyen, *Adv. Colloid Interface Sci.* **248**, 69 (2017).
12. J. Lee, *Colloids Interfaces* **2**, 18 (2018).
13. A. J. Hurd and D. W. Schaefer, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 1043 (1985).
14. B. P. Binks, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **9**, 6298 (2007).
15. M. P. Boneva, N. C. Christov, K. D. Danov et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **9**, 6371 (2007).
16. D. O. Grigoiev, J. Kragel, V. Dutschk et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **9**, 6447 (2007).
17. K. Kolegov and L. Barash, *Adv. Colloid Interface Sci.* **285**, 102271 (2020).
18. C. W. Extrand, *Adv. Colloid Interface Sci.* **248**, 136 (2002).
19. Е. М. Лифшиц, *ЖЭТФ* **29**, 94(1955).
20. И. Е. Дзялошинский, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский, *ЖЭТФ* **37**, 229 (1959).