

УДК 532.6

DOI: 10.15372/PMTF202315333

## МНОВЕТВЕВОЙ ГИСТЕРЕЗИС СОСТОЯНИЙ КАПЛИ, СИДЯЩЕЙ НА ЦИКЛИЧНО РАСТЯГИВАЕМОЙ ЭЛАСТИЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. А. Дехтярь\*, А. Е. Дубинов\*,\*\*

\* Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

\*\* Саровский физико-технический институт — филиал Научно-исследовательского ядерного университета “Московский инженерно-физический институт”, Саров, Россия  
E-mails: valerik128@mail.ru, dubinov-ae@yandex.ru

Экспериментально изучались состояния жидких капель альбумина, сидящих на горизонтальной эластичной циклично растягиваемой, а затем ослабляемой несмачиваемой подложке. Обнаружен многоветвевой гистерезис состояний капли. Число ветвей гистерезиса можно регулировать за счет изменения закона движения подложки.

Ключевые слова: эластичная подложка, жидкая капля, альбумин, растяжение-ослабление, многоветвевой гистерезис

**Введение.** Гистерезис состояний жидкостей при смачивании — важное гидродинамическое явление, возникающее в зонах контакта жидкостей с твердыми поверхностями [1–4]. Наиболее известным является гистерезис краевых углов смачивания жидкой капли, находящейся на подложке [5–10], проявляющийся в неравенстве краевого угла натекания и краевого угла оттока жидкости на поверхности. В работе [11] отмечено, что указанное явление может играть важную роль в процессах формирования порошковых покрытий, струйной печати, а также в процессах осаждения малых частиц припоая при монтаже элементов микроэлектроники.

В процессе исследования смачиваемости поверхностей появилось новое направление — эластокапиллярность [12–14]. В рамках этого направления изучается взаимодействие поверхностных сил в жидкостях и сил упругости в эластичной подложке. Процесс смачивания жидкостей в каплях, находящихся на эластичных растянутых подложках, исследовался в работах [15, 16], причем в [16] измерялась величина гистерезиса краевых углов смачивания в каплях.

В данной работе экспериментально изучаются состояния жидких капель, находящихся на горизонтальной эластичной растягиваемой подложке. Под состоянием капли будем понимать длину ее основания вдоль направления растяжения подложки и краевой угол смачивания.

**1. Оборудование и материалы.** Для проведения экспериментов было создано специальное механическое устройство, схема которого показана на рис. 1. На горизонтальном гладком столе размещалась длинная эластичная подложка, один край которой закреплялся механическим зажимом, а другой оставался свободным.

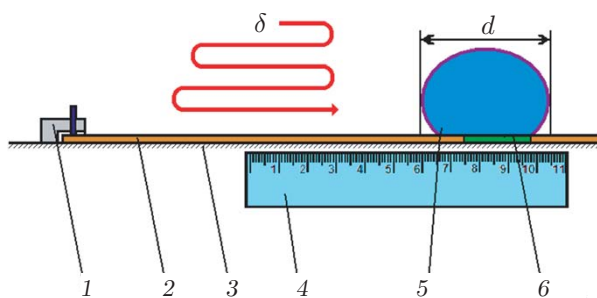


Рис. 1. Схема экспериментального устройства:

1 — зажим, 2 — резиновая лента, 3 — стол, 4 — линейка, 5 — исследуемая капля, 6 — маркер

В качестве эластичной подложки была выбрана резиновая лента (использовался известный в медицине бинт Мартенса из 100 %-й резины, из которого нарезались ленты необходимых размеров). Для каждой ленты были выбраны следующие размеры: ширина — 1,5 см, длина — до 15 см, толщина — 0,5 мм. Лента имела достаточно гладкую рабочую поверхность с неровностями, высота которых существенно меньше 100 мкм. На ленту наносился специальный маркер, что позволяло отслеживать относительное удлинение ленты при растяжении.

В экспериментах использовался 10 %-й водный раствор альбумина человека с добавками  $\text{CH}(\text{CH}_2)_6\text{COONa}$  ( $2,8 \div 3,4$  г/л) и  $\text{NaCl}$  ( $90 \div 160$  моль/л). Раствор произведен НПО “Микроген”. Для визуализации жидкость была подкрашена чернилами. Согласно [17, 18] раствор имеет поверхностное натяжение, равное 49,2 мН/м. Следует отметить, что альбумин не смачивает резину (измеренный контактный угол неподкрашенного раствора альбумина на резине —  $118^\circ$ , подкрашенного —  $99^\circ$ ) и является слаболетучей жидкостью, поэтому уменьшением объема капли вследствие испарения можно пренебречь.

**2. Методика экспериментов.** Состояния капли регистрировались в боковом ракурсе с помощью цифрового микроскопа Celestron (модель 44302-A) в режиме видеозаписи [19]. Видеозаписи разделялись на отдельные кадры, по которым определялись значения относительного удлинения ленты  $\delta$ , длина области контакта капли с поверхностью ленты  $d$  (длина основания капли) и контактный угол смачивания  $\theta$ .

Эксперименты проводились при температуре  $22^\circ\text{C}$  и давлении окружающего воздуха 100 кПа, измеренном барометром, по следующей программе циклического растяжения-ослабления ленты. Сначала лента растягивалась за свободный конец до достижения относительного удлинения  $\delta_0$ . В этом положении на ленту наносилась капля альбумина. Далее лента растягивалась до достижения относительного удлинения  $\delta_1$ , а затем, после небольшой паузы, натяжение ленты уменьшалось до величины  $\delta_2$ . В следующих циклах осуществлялось удлинение до величины  $\delta_3$  и последующее ослабление до  $\delta_4$ , удлинение до величины  $\delta_5$  и последующее ослабление до  $\delta_6$  и, наконец, удлинение до величины  $\delta_7$  и последующее уменьшение натяжения до значения  $\delta_8 \approx 1,1$ . Заметим, что движение ленты осуществлялось с малой скоростью ( $d\delta/dt < 0,1 \text{ с}^{-1}$ ), смена цикла происходила после паузы длительностью несколько секунд.

**3. Результаты экспериментов.** Было проведено более 10 экспериментов, в которых наблюдались увеличение и уменьшение длины основания капли синхронно с циклами растяжения и ослабления натяжения ленты. Более детальное исследование динамики величины  $d$  показало, что при одних и тех же значениях  $\delta$  величина  $d$  принимает различные значения в зависимости от предыстории, т. е. наблюдается гистерезис состояний капли.

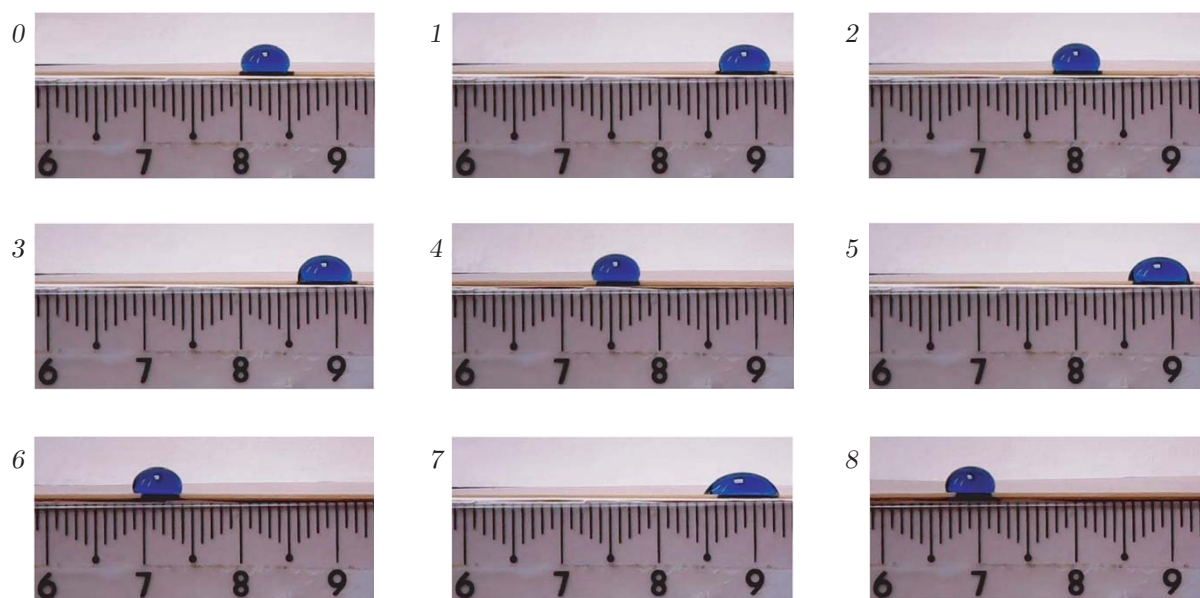


Рис. 2. Кадры видеозаписи движения капли:  
0 — начальное положение капли, 1–8 — моменты смены цикла

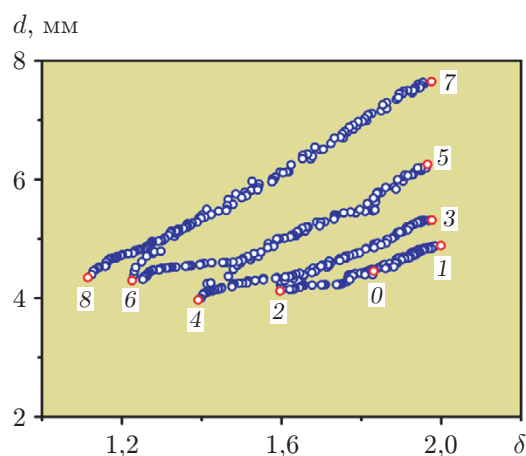


Рис. 3. Экспериментальная зависимость  $d(\delta)$ :  
0 — начальное положение капли, 1–8 — моменты смены цикла

На рис. 2 представлены кадры видеосъемки положения капли, полученные в одном из экспериментов в моменты времени, соответствующие смене цикла. Для данного эксперимента были выбраны следующие значения относительного удлинения ленты при смене цикла:  $\delta_0 = 1,8$ ,  $\delta_{1,3,5,7} \approx 2$ ,  $\delta_2 = 1,6$ ,  $\delta_4 = 1,4$ ,  $\delta_6 = 1,2$ . На рис. 2 видно, что состояния капли в моменты смены цикла 1, 3, 5, 7 при одном и том же значении  $\delta$  существенно различаются. В то же время в моменты смены цикла 2, 4, 6, 8 при различных значениях  $\delta$  значения величины  $d$  приближенно равны:  $d_2 \approx d_4 \approx d_6 \approx d_8$ .

После оцифровки видеозаписи строился график зависимости  $d(\delta)$  (рис. 3). На рис. 3 видно, что состояние капли описывается многоветвевым гистерезисом с числом ветвей, равным числу циклов растяжения и ослабления натяжения ленты.

На рис. 4 представлен график зависимости контактного угла смачивания  $\theta$  от относительного удлинения  $\delta$ , на котором наблюдается многоветвевой гистерезис. Следует отме-

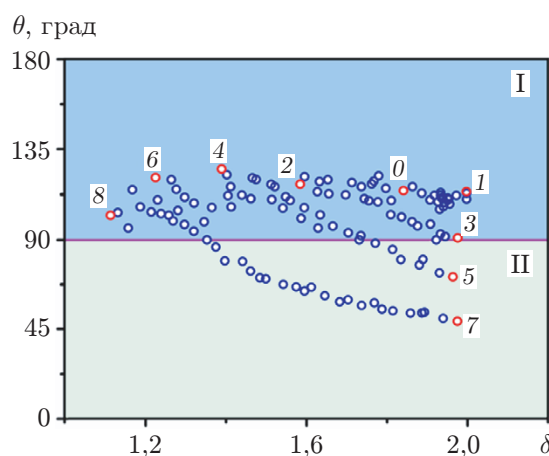


Рис. 4. Экспериментальная зависимость  $\theta(\delta)$ :

0 — начальное положение капли, 1–8 — моменты смены цикла; I — область смачиваемости, II — область несмачиваемости

тить, что кривая зависимости несколько раз пересекает границу областей смачиваемости и несмачиваемости, причем эти пересечения происходят при различных значениях  $\delta$ .

Ясно, что число ветвей многоветвевое гистерезиса можно увеличить. Для этого необходимо, чтобы значения относительного удлинения при смене циклов с четными номерами 2, 4, 6, 8, ... уменьшались в каждом последующем цикле:  $\delta_2 > \delta_4 > \delta_6 > \delta_8 > \dots$ .

**4. Обсуждение результатов.** Поведение капли при многоцикловом растяжении и ослаблении натяжения ленты можно объяснить следующим образом. В соответствии с представлениями [2] о характере движения капли по подложке выделяются два предельных режима поведения капли при растяжении ленты: режим идеального проскальзывания и режим идеального пиннинга. Первый режим характеризуется тем, что растягиваемая лента не захватывает основание капли, при этом размер и форма капли не меняются. В этом случае графики зависимостей  $d(\delta)$  и  $\theta(\delta)$  представляют собой горизонтальные прямые. Второй режим характеризуется тем, что капля полностью закреплена на ленте, расширяется и меняет форму по мере растяжения ленты. Графики зависимостей  $d(\delta)$  и  $\theta(\delta)$  в режиме пиннинга представляют собой наклонные прямые с максимально возможным углом наклона.

В действительности характер движения капли на растягиваемой, а затем ослабляемой ленте отличается от характера движения, соответствующего идеальным режимам: графики зависимостей  $d(\delta)$  и  $\theta(\delta)$  представляют собой набор отрезков почти прямых линий с углами наклонов  $\theta = 0 \div \theta_{\max}$  (значение  $\theta_{\max}$  достигается при идеальном пиннинге). В [2] такие режимы называются сильным или слабым пиннингом. Чем больше угол наклона, тем сильнее пиннинг.

На рис. 3, 4 видно, что графики зависимостей  $d(\delta)$  и  $\theta(\delta)$  представляют собой набор линий с разными углами наклона. При этом переход с одного отрезка на другой отрезок с иным углом наклона означает переход от режима слабого пиннинга (проскальзывания) к режиму сильного пиннинга или наоборот. В результате происходит переход с одной ветви гистерезиса на другую.

Существует большое количество работ, в которых изучается гистерезис с несколькими ветвями (см., например, [20–24]). Каждая такая ветвь обычно называется частной ветвью гистерезиса [25]. Все частные ветви гистерезиса охватываются предельной петлей гистерезиса, минимальное и максимальное значения координаты которой определя-

ют величину гистерезиса. При этом размерность величины гистерезиса совпадает с размерностью управляющего параметра (входная величина гистерезиса) или размерностью управляемой величины (выходная величина гистерезиса). В рассматриваемом случае входная величина гистерезиса безразмерная, так как управляющая величина — относительное удлинение подложки, а выходная величина гистерезиса может иметь размерность длины (миллиметр) или угла (градус).

Фактически в данной работе зарегистрированы частные ветви гистерезиса состояний капли на эластичной циклично растягиваемой подложке, в то время как предельная петля гистерезиса не была получена.

Можно предположить, что входная величина гистерезиса соответствует растяжению, при котором высота капли становится меньше критической величины [1], задаваемой формулой [26, 27]

$$h_{cr} = 2\sqrt{\gamma/(\rho g)} \sin(\theta/2).$$

Здесь  $\gamma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\rho$  — плотность жидкости;  $\theta$  — контактный угол для жидкости на твердом основании;  $g$  — ускорение свободного падения.

**Заключение.** Таким образом, в работе экспериментально обнаружен новый многоветвевой гистерезис состояний капли на эластичной циклично растягиваемой подложке. Число ветвей гистерезиса можно регулировать за счет изменения закона движения подложки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **de Gennes P.-G.** Capillarity and wetting phenomena. Drops, bubbles, pearls, waves / P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré. N. Y.: Springer-Verlag, 2004.
2. **Bormashenko E. Yu.** Wetting of real surfaces. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2013.
3. **Израелашвили Дж. Н.** Межмолекулярные и поверхностные силы. М.: Науч. мир, 2011.
4. **Butt H.-J., Liu J., Koynov K., et al.** Contact angle hysteresis // *Current Opinion Colloid Interface Sci.* 2022. V. 59, N 1. 101574.
5. **Сумм Б. Д.** Гистерезис смачивания // *Сорос. образоват. журн.* 1999. Т. 5, № 7. С. 98–102.
6. **Dubov A. L., Mourran A., Möller M., Vinogradova O. I.** Contact angle hysteresis on superhydrophobic stripes // *J. Chem. Phys.* 2014. V. 141, N 7. 074710.
7. **Ahmed G., Koursari N., Kuchin I. V., Starov V. M.** Hysteresis of contact angle of sessile droplets on deformable substrates: Influence of disjoining pressure // *Colloids Surfaces. A: Physicochem. Engng Aspects.* 2018. V. 546, N 1. P. 129–135.
8. **Ravazzoli P. D., Cuellar I., González A. G., Diez J. A.** Contact-angle-hysteresis effects on a drop sitting on an incline plane // *Phys. Rev. E.* 2019. V. 99, N 4. 043105.
9. **Barrio-Zhang H., Ruiz-Gutiérrez É., Armstrong S., et al.** Contact-angle hysteresis and contact-line friction on slippery liquid-like surfaces // *Langmuir.* 2020. V. 36, N 49. P. 15094–15101.
10. **Dubinov A. E., Iskhakova D. N., Lyubimtseva V. A.** An inversion of contact angle hysteresis when a liquid drop slides up on an inclined plane under the spark discharge action // *Phys. Fluids.* 2021. V. 33, N 6. 061707.
11. **Борисов В. Т., Черепанов А. Н., Предтеченский М. Р., Варламов Ю. Д.** Влияние смачиваемости на поведение жидкой капли после ее соударения с твердой подложкой // *ПМТФ.* 2003. Т. 44, № 6. С. 64–69.
12. **Liu J.-L., Feng X.-Q.** On elastocapillarity: A review // *Acta Mech. Sinica.* 2012. V. 28, N 4. P. 928–940.

13. **Style R. W., Jagota A., Hui C.-Y., Dufresne E. R.** Elastocapillarity: Surface tension and the mechanics of soft solids // *Annual Rev. Condens. Matter Phys.* 2017. V. 8, N 1. P. 99–118.
14. **Bico J., Reyssat E., Roman B.** Elastocapillarity: When surface tension deforms elastic solids // *Annual Rev. Fluid Mech.* 2018. V. 50, N 1. P. 629–659.
15. **do Nascimento R. M., Schmitt J.-F., Sarig U., et al.** Surface wettability of a natural rubber composite under stretching: A model to predict cell survival // *Langmuir*. 2021. V. 37, N 15. P. 4639–4646.
16. **Cho S. J., Nam H., Ryu H., Lim G.** A rubberlike stretchable fibrous membrane with anti-wettability and gas breathability // *Adv. Funct. Materials*. 2013. V. 23, N 45. P. 5577–5584.
17. **Кочурова Н. Н., Медведев И. А., Дмитровская М. В. и др.** Поверхностное и межфазное натяжение водного раствора природной белковой системы // *Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 4. Физика и химия*. 2004. № 1. С. 69–73.
18. **Dubinov A. E., Kozhayeva J. P., Lyubimtseva V. A., Selemir V. D.** Hydrodynamic and physicochemical phenomena in liquid droplets under the action of nanosecond spark discharges: A review // *Adv. Colloids Interface Sci.* 2019. V. 271, N 1. 101986.
19. **Dekhtyar V. A., Dubinov A. E.** Visualization of liquids flows in microfluidics and plasma channels in nanosecond spark microdischarges by means of digital microscopy // *Scientific Visual.* 2023. V. 15, N 1. P. 1–16.
20. **Ikeda K.** Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system // *Optics Comm.* 1979. V. 30, N 2. P. 257–261.
21. **Machida M., Koyama T., Tachiki M.** Dynamical breaking of charge neutrality in intrinsic Josephson junctions: Common origin for microwave resonant absorptions and multiple-branch structures in the I–V characteristics // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 83, N 22. P. 4618–4621.
22. **Gelfgat A. Yu., Bar-Yoseph P. Z., Yarin A. L.** Stability of multiple steady states of convection in laterally heated cavities // *J. Fluid Mech.* 1999. V. 388, N 1. P. 315–334.
23. **Neimark A. V., Ravikovitch P. I., Vishnyakov A.** Inside the hysteresis loop: Multiplicity of internal states in confined fluids // *Phys. Rev. E*. 2002. V. 65, N 3. 031505.
24. **Ding J., Sun H., Zhou S.** Hysteresis and linear stability analysis on multiple steady-state solutions to the Poisson — Nernst — Planck equations with steric interactions // *Phys. Rev. E*. 2020. V. 102, N 5. 053301.
25. **Крайзмер Л. П.** Устройства хранения дискретной информации. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961.
26. **Sharma A., Ruckenstein E.** Dewetting of solid by the formation of holes in macroscopic liquid films // *J. Colloid Interface Sci.* 1989. V. 133, N 2. P. 358–368.
27. **Dekhtyar V. A., Kolesov H. N., Dubinov A. E.** Plasma Moses effect: production of stationary circular holes in the liquid films by a DC corona discharge // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2023. V. 51, N 2. P. 451–455.

*Поступила в редакцию 6/VI 2023 г.,  
после доработки — 21/I 2024 г.  
Принята к публикации 29/I 2024 г.*