УДК 532.64

## СМАЧИВАНИЕ КАПЛЯМИ ЖИДКОСТИ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН РАЗЛИЧНОГО РАДИУСА

Х. П. Сяо, Л. Чэнь, Л. Ян

Колледж физических наук и технологий Педагогического университета Гуанси, 541004 Гуйлинь, Китай E-mails: xhup@126.com, 290627420@qq.com, yangli@mailbox.gxnu.edu.cn

Теоретически изучено поведение капель жидкости, находящихся между волокнами. С использованием предложенной модели показано, что капля жидкости, находящаяся между волокнами, может иметь три равновесные формы: бочкообразную, форму моста и форму столба. Установлено, что для капель малого объема переход от формы столба к форме моста и наоборот является обратимым. Для капель большого объема возможны переходы двух типов: переход от формы столба к форме моста в случае волокон, расположенных на достаточно большом расстоянии друг от друга, и переход от формы моста к бочкообразной форме, а затем к форме столба в случае близкорасположенных волокон. Для капель большого объема исследовано явление гистерезиса при различных расстояниях между волокнами. Показано, что полученные результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: волокна, смачивание, равновесные формы, бочкообразная форма капли, капли в форме моста и столба, гистерезис.

DOI: 10.15372/PMTF20220409

Введение. Результаты исследования смачивающей способности капель и их распределения на нитях широко применяются в текстильной промышленности [1, 2]. Результаты изучения деформированного состояния и устойчивости волоконно-оптических сетей при наличии на них капель жидкости используются при проектировании различных микроустройств [3].

В последнее время большое внимание уделяется исследованию равновесных форм капель, осаждающихся на горизонтальных волокнах [4–19]. В [6] изучены простейшие случаи растекания жидкостей и смачивания волокон, а также исследован подъем жидкости между волокнами, имеющими V-образное расположение, в результате действия капиллярных сил. Капли в форме мостов, образующиеся на горизонтально и вертикально расположенных волокнах, изучены в работах [7, 8]. В [9] предложена математическая модель процесса смачивания волокна каплей бочкообразной формы и предложен метод измерения угла смачивания капли и волокна. В работе [10] экспериментально установлено, что кинетика

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11665007) и в рамках Программы Фонда естественных наук Гуанси (грант № 2018GXNSFAA138190), Программы высшего образования в области науки и техники провинции Гуанси (грант № 2018KY0085) и Главной программы исследований и разработок в Гуанси (грант № АБ18221033).

растекания капель на волокнах удовлетворяет закону Лукаса — Уошберна. Также в [10] проведен количественный анализ процесса распространения капель и критических условий для случая закрепления капель на поверхности. В работе [11] предложена трехмерная модель капель в форме моста, расположенного между двумя одинаковыми волокнами, и вычислена капиллярная сила на фиксированном расстоянии между волокнами. В [12] с использованием метода конечных элементов определена зависимость длины смачиваемого участка от диаметра волокон, расстояния между ними, объема капли и угла смачивания. В работе [13] с помощью интерактивной программы Surface Evolver вычислена поверхностная энергия капель в форме столба и моста, расположенных между двумя одинаковыми цилиндрическими волокнами. В [14] экспериментально исследовано поведение жидкости на двух параллельных жестких волокнах и установлено, что процесс перехода формы капли жидкости небольшого объема (безразмерный объем составляет менее 700) в форму столба является обратимым, в случае больших объемов жидкости обнаружен гистерезис. В [15, 16] изучены равновесные состояния капли идеально смачивающей жидкости конечного объема на двух параллельных жестких волокнах различного радиуса и определено критическое расстояние между волокнами, при котором капля в форме столба принимает другие формы. В [17] с использованием кода LB3D50, реализующего решеточный метод Больцмана, проведено моделирование состояния капель жидкости между двумя параллельными цилиндрическими волокнами одинакового радиуса в случае их полного смачивания (угол смачивания равен  $\theta = 0^{\circ}$ ). Основное внимание уделялось изучению связи между поверхностной энергией и капиллярным давлением при изменении формы капли жидкости малого объема. С использованием этого метода можно моделировать процесс взаимодействия смачивающих жидкостей с волокнами, имеющими однородные поверхности.

Большинство указанных выше исследований выполнены для случая полного смачивания двух волокон одинакового радиуса при одном и том же значении угла смачивания. Таким образом, поведение капель жидкости между двумя параллельными цилиндрическими волокнами различного радиуса при различных углах смачивания, а также явление гистерезиса в этом процессе изучены недостаточно.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, выполненных для капель различного объема, предлагается модель для расчета поверхностной энергии в системе капля — волокно для капель различного объема при различных расстояниях между волокнами, а также изучается явление гистерезиса.

1. Эксперимент. С помощью микроскопа получены фотографии нелетучей жидкости, находящейся между двумя нейлоновыми волокнами радиусом R = 0,25 мм. На рис. 1 приведены фотографии капли, полученные при различном расстоянии между волокнами D. В зависимости от объема капли V происходят различные изменения ее формы при изменении расстояния D (начальное расстояние составляет 0,1 мм, а его приращение — 10 мкм). При небольшом объеме капли (V = 1 мкл) и уменьшении расстояния между волокнами до критического значения капля плавно удлиняется и принимает форму столба (см. рис. 1, a). По мере увеличения расстояния между волокнами столб превращается в каплю. Это означает, что процесс является обратимым. При большом объеме капли (V = 3,8 мкл) и уменьшении расстояния между волокнами D до критического значения капля внезапно принимает форму длинного столба жидкости. Увеличение расстояния между волокнами до некоторого критического значения приводит к мгновенному превращению столба в каплю. В случае капель малого объема процесс превращения капли в столб и наоборот имеет обратимый характер, в случае капель большого объема — гистерезисный характер.

**2.** Моделирование процесса изменения формы капли. На рис. 2 показаны капли различной конфигурации: капля в форме моста между двумя волокнами (жидкость частично обтекает волокна) (см. рис. 2, *a*) [13], капля бочкообразной формы (жидкость



Рис. 1. Эволюция формы капли при уменьшении  $(a, \delta)$  и увеличении (e, c) расстояния D между параллельными нейлоновыми волокнами радиусом R = 0.25 мм: a, e - V = 1.0 мкл, b, c - V = 3.8 мкл

полностью обтекает оба волокна) (см. рис. 2,6) и капля в форме столба (жидкость распространяется между волокнами) (см. рис. 2,6) [15]. Модели равновесных структур показаны на рис. 3 (при моделировании использовалась программа Rhino 3D). Мениски на обоих концах капли имеют сложную седлообразную форму.

Изменение формы капель моделировалось на основе следующих предположений:

1) форма моста описывается дугами окружностей;

2) поверхностная энергия на конечных участках не учитывается;

3) гравитационные эффекты не учитываются [20].

Согласно [8] при построении аналитического решения используется равенство возрастающей свободной энергии и рабочего давления. На среднем участке капли в форме моста, длина которого больше длины ее конечных участков, работа, затраченная на образование моста, равна

$$dW = -\frac{\gamma}{r} S \, dL.$$

Здесь L — длина смачиваемого участка, параллельного волокну;  $\gamma$  — поверхностное натяжение; S — площадь поперечного сечения, которая определяется равенством



Рис. 2. Формы капли: *а* — мост, *б* — бочкообразная форма, *в* — столб



Рис. 3. Трехмерные изображения (*a*, *b*) и вид сбоку (*b*, *c*) капли: *a*, *b* — капля в форме моста, *b*, *c* — капля бочкообразной формы

$$S = r^{2} [\sin(\theta_{1} + \beta_{1} + \theta_{2} + \beta_{2}) - (\pi - \theta_{1} - \beta_{1} - \theta_{2} - \beta_{2})] + r(R_{1} \sin\beta_{1} + R_{2} \sin\beta_{2}) [\cos(\theta_{1} + \beta_{1}) + \cos(\theta_{2} + \beta_{2})] - R_{1}^{2} (\beta_{1} - \sin\beta_{1} \cos\beta_{1}) - R_{2}^{2} (\beta_{2} - \sin\beta_{2} \cos\beta_{2}).$$
(1)

В результате удлинения капли в форме моста площадь смачиваемого участка первоначально не смоченных поверхностей становится равной (AC + BE) dL, а площадь поверхности раздела жидкости и воздуха — (AB + CE) dL (рис. 4). Поскольку в равновесном состоянии поверхностная энергия минимальна, ее изменение определяется следующим образом:

$$dE = [2(\pi - \theta_1 - \beta_1 - \theta_2 - \beta_2)r - (2\beta_1 R_1 \cos \theta_1 + 2\beta_2 R_2 \cos \theta_2)]\gamma dL.$$
 (2)

Из равенства dW = dE с учетом (1) следует уравнение для определения равновесных форм [8]

$$r^{2}[(\pi - \theta_{1} - \beta_{1} - \theta_{2} - \beta_{2}) + \sin(\theta_{1} + \beta_{1} + \theta_{2} + \beta_{2})] + r[(R_{1}\sin\beta_{1} + R_{2}\sin\beta_{2})(\cos(\theta_{1} + \beta_{1}) + \cos(\theta_{2} + \beta_{2})) - (2\beta_{1}R_{1}\cos\theta_{1} + 2\beta_{2}R_{2}\cos\theta_{2})] - R_{1}^{2}(\beta_{1} - \sin\beta_{1}\cos\beta_{1}) - R_{2}^{2}(\beta_{2} - \sin\beta_{2}\cos\beta_{2}) = 0.$$
(3)



Рис. 4. Поперечное сечение капли в форме столба:

 $R_1, R_2$  — радиусы цилиндрических волокон,  $\theta_1, \theta_2$  — углы смачивания капли и волокна,  $\beta_1, \beta_2$  — углы полузаполнения, определяющие положение трехфазной контактной линии, r — кривизна мениска, AB, CE, BE, AC — длины дуг

Радиус кривизны r вычисляется по формуле

$$r = \frac{D + R_1(1 - \cos\beta_1) + R_2(1 - \cos\beta_2)}{\cos(\theta_1 + \beta_1) + \cos(\theta_2 + \beta_2)},\tag{4}$$

зависимость между  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — по формуле

$$tg(\beta_1/2) = \left[ (D+2R_2)\cos((\theta_2 - \theta_1)/2)\sin(\beta_2/2) + D\sin((\theta_2 - \theta_1)/2)\cos(\beta_2/2) \right] /$$

$$/[(D+2R_1)\cos((\theta_2-\theta_1)/2)\cos(\beta_2/2) - (D+2R_1+2R_2)\sin((\theta_2-\theta_1)/2)\sin(\beta_2/2)].$$
 (5)

При заданных значениях параметров  $D, R_1, R_2, \theta_1, \theta_2$  из уравнения (3) с учетом (4), (5) можно вычислить параметры  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Длина капли в форме столба определяется по формуле l = V/S.

**3. Численное решение.** Радиус волокна  $R_1$  используется для введения следующих безразмерных величин: расстояния между волокнами  $\tilde{d} = D/(2R_1)$ , длины смачиваемого участка  $\tilde{l} = L/R_1$ , объема  $\tilde{V} = V/R_1^3$  и поверхностной энергии  $\tilde{E} = E/(\gamma R_1^2)$ .

4. Поверхностная энергия. При заданных радиусе волокна и угле смачивания устойчивая конфигурация капли соответствует минимуму поверхностной энергии системы, зависящей от объема жидкости и расстояния между волокнами [21–23]. Для одинаковых волокон ( $R_1 = R_2 = R$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ) из уравнений (2), (4) вычисляется поверхностная энергия капли, имеющей форму столба:

$$E = 2\gamma [(\pi - 2\beta)r - 2\beta R] \frac{V}{S}, \qquad r = \frac{D + 2R(1 - \cos\beta)}{2\cos\beta}$$

Поскольку бочкообразная форма капли и форма моста являются сложными формами, для них радиус  $R_l$  принимается равным эквивалентному радиусу сферической капли. Таким образом, поверхностная энергия для капель бочкообразной формы и капель в форме моста вычисляется по формуле

$$\begin{split} E &= 0.65 \cdot 4\pi \gamma \Big[ R_l^2 - \frac{R}{2} \sqrt{ \left( \sqrt{R_l^2 - (D/2)^2} - \sqrt{R_l^2 - (D/2 + 2R)^2} \right)^2 + 4R^2 - \\ &- R \sqrt{R_l^2 - (D/2)^2} - R \sqrt{R_l^2 - (D/2 + 2R)^2} \Big], \\ V_b &= \frac{4}{3} \pi R_l^3 - \pi R^2 \sqrt{R_l^2 - (D/2)^2} - \pi R^2 \sqrt{R_l^2 - (D/2 + 2R)^2} , \end{split}$$



Рис. 5. Зависимость критического объема жидкости  $V_{cr} = V_{cr}/R^3$  от расстояния между волокнами при  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$  и различных значениях радиуса волокон: I — область, в которой капля имеет бочкообразную форму, II — область, в которой капля имеет форму моста; 1 - R = 0,1 мм, 2 - R = 0,15 мм, 3 - R = 0,2 мм

$$E = 0.24 \, \frac{\gamma V_d C}{(D/2 + 2R)^2},$$

$$V_d = \frac{CV}{(D/2 + 2R)^2 [4\pi (D/2 + 2R) + 8(C - D/2 - 2R) - 4\pi R]},$$

$$C = \frac{1}{2} \left[ \frac{8}{\pi} \left( \frac{D}{2} + 2R \right) + \sqrt{\left( \frac{D}{2} + 2R \right)^2 \left( \frac{64}{\pi^2} + \frac{16\pi - 32}{\pi} \right) - 16R \left( \frac{D}{2} + 2R \right)} \right]$$

где *С* — длина большей оси капли в форме моста, параллельной волокнам. Константы 0,24 и 0,65 являются эмпирическими коэффициентами и учитывают, что форма исследуемой капли не является сферической.

На рис. 5 приведена зависимость критического объема жидкости  $\tilde{V}_{cr} = V_{cr}/R^3$  от расстояния между волокнами при  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$  и различных значениях радиуса волокон. Видно, что с увеличением расстояния между волокнами критический объем быстро увеличивается. Если объем жидкости меньше  $V_{cr}$ , устойчивой является конфигурация капли в виде моста, если объем жидкости больше  $V_{cr}$ , устойчива капля бочкообразной формы [13]. При относительно небольшом объеме ( $\tilde{V} < 700$ ) кривые зависимости  $\tilde{V}_{cr}(\tilde{d})$  пересекаются. В случае если угол смачивания и объем капель большие, а расстояние между волокнами небольшое, принятые выше три предположения практически не влияют на результаты расчета [24–29].

5. Капли небольшого объема между волокнами с различными радиусами. На рис. 6 показаны поперечные сечения капли в форме столба. Изменение формы начинается при быстром сжатии жидкости. С увеличением расстояния D углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  увеличиваются до максимальных значений, равных  $\pi$  [30–32], при которых форма мениска моста меняется с выпуклой на вогнутую. При  $\beta > \pi/2$  и  $\beta < \pi/2$  имеет место равенство  $D = (R_1 + R_2)(\pi - 2)/2$  (при  $\beta = \pi/2$   $r = \infty$ ), при  $\beta_1 = \beta_2 = \pi$  — равенство  $D = 2\sqrt{2R_1R_2}$ . Для капли в форме столба расстояние  $D = 2\sqrt{2R_1R_2}$  является максимальным и совпадает с расстоянием, определенным в работе [15]. При  $\beta > \pi$  капли в форме столба не существует.



Рис. 6. Поперечные сечения капли в форме столба при  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ :  $a - \beta < \pi/2, \ \delta - \beta = \pi/2, \ \epsilon - \beta = \pi$ 



Рис. 7. Зависимость длины смачиваемого участка l от расстояния d при  $R_1 = 225$  мкм,  $R_2 = 150$  мкм,  $\theta_1 = \theta_2 = 0^{\circ}$  и различных значениях объема  $\tilde{V}$ : линии — результаты расчетов, полученные в данной работе, точки — экспериментальные данные работы [15];  $1 - \tilde{V} = 88, 2 - \tilde{V} = 280, 3 - \tilde{V} = 527$ 

На рис. 7 приведена зависимость параметра l от расстояния d при  $R_1 = 225$  мкм,  $R_2 = 150$  мкм,  $\theta_1 = \theta_2 = 0^{\circ}$  и различных значениях объема  $\tilde{V}$ . Длина смачиваемого участка  $\tilde{l}$  уменьшается с увеличением расстояния  $\tilde{d}$ . На рис. 7 видно, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

6. Капли небольшого объема между волокнами одинакового радиуса. В случае волокон с одинаковыми радиусами  $(R_1 = R_2)$  и  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$  площадь поперечного сечения в равенстве (1) вычисляется по формуле

$$\begin{split} \frac{S}{R^2} &= 2 \Big\{ 2 \, \frac{r}{R} \, \sin\beta \cos\left(\theta + \beta\right) - \beta + \sin\beta \cos\beta - \\ &- \frac{r^2}{R^2} \left[ (\pi/2 - \theta - \beta) - \sin\left(\theta + \beta\right) \cos\left(\theta + \beta\right) \right] \Big\}, \end{split}$$

аналогичной формуле, приведенной в работе [8]. При  $\beta = \pi/2$ , dE = 0 получаем  $D/(2R) = \pi/2 - 1 \approx 0.57$ , что согласуется с результатами работ [8, 14]. При  $\beta = \pi D/(2R) = \sqrt{2}$ , что согласуется с результатами работы [14].



Рис. 8. Зависимость длины участка смачивания  $\tilde{l}$  от расстояния между волокнами  $\tilde{d}$ : линия — результаты расчетов, выполненных в настоящей работе при R = 0,1 мм,  $\tilde{V} = 900$ , точки — экспериментальные данные [14], полученные при  $373 < \tilde{V} < 1500$ , 0,125 мм < R < 0,175 мм (1 — переход капли от бочкообразной формы к форме столба, 2 — переход капли от формы столба к форме моста, а затем к бочкообразной форме)

**7. Капли большого объема между волокнами одинакового радиуса.** Проведено сравнение результатов вычислений с экспериментальными данными [14]. На рис. 8 приведены зависимости длины смачиваемого участка  $\tilde{l}$  от расстояния между волокнами  $\tilde{d}$ . Видно, что результаты расчетов, полученные в настоящей работе, хорошо согласуются с экспериментальными данными [14].

8. Гистерезис. На рис. 9–11 приведены зависимости поверхностной энергии от расстояния между волокнами ( $d_{cd}$  — критическое расстояние, при котором происходит переход капли от формы столба к форме моста, а затем к бочкообразной форме,  $d_{bc}$  — критическое расстояние, соответствующее переходу капли от бочкообразной формы к форме



Рис. 9. Зависимость поверхностной энергии от расстояния между волокнами при  $\tilde{V} = 100, R_1 = R_2 = 0,1$  мм,  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ :

 $a - \tilde{E} = -300 \div 50, \ \delta - \tilde{E} = 0 \div 50; \ 1$  — капля в форме моста, 2 — капля бочкообразной формы, 3 — капля в форме столба; стрелки — направления, в которых происходит изменение расстояния между волокнами, штриховые линии — состояния, которые не реализуются



Рис. 10. Зависимость поверхностной энергии от расстояния между волокнами при  $\tilde{V} = 800, R_1 = R_2 = 0,1$  мм,  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ :  $a - \tilde{E} = -4000 \div 1000, \, \delta, \, s - \tilde{E} = 0 \div 350 \, (\delta$  — переход капли от формы столба к форме моста, s — переход капли от формы моста к бочкообразной форме, а затем к форме столба); остальные обозначения те же, что на рис. 9

столба). Поверхностные энергии  $\tilde{E}$  для капли бочкообразной формы и капли в форме моста практически не зависят от расстояния между волокнами, в то время как поверхностная энергия  $\tilde{E}$  для капли в форме столба увеличивается с увеличением расстояния между волокнами. При небольших объемах капли ( $\tilde{V} = 100$ ) поверхностная энергия капли в форме моста меньше энергии капли бочкообразной формы, поэтому форма моста более устойчива. Если расстояние между волокнами достаточно большое, капля в форме столба сжимается, принимая форму моста. По мере сближения волокон капля в форме моста постепенно удлиняется, принимая форму столба, что свидетельствует об обратимости превращения этих двух форм на критическом расстоянии  $d_{cd} = \sqrt{2}$ . При больших объемах капли ( $\tilde{V} = 800$ , 2000) форма столба является энергетически предпочтительной. По мере увеличения расстояния от значения  $d_{bc}$  до значения  $d_{cd}$  возникают капли бочкообразной формы и капли в форме столба. При критическом расстоянии  $d_{cd}$  капли становятся закругленными (принимают форму моста), поскольку угол полузаполнения медленно увеличивается, приближаясь к значению, равному  $\pi$  (см. рис. 6). При уменьшении расстояния капля в форме моста принимает бочкообразную форму, поскольку такое состояние более устойчиво. При



Рис. 11. Зависимость поверхностной энергии от расстояния между волокнами при  $\tilde{V} = 2000, R_1 = R_2 = 0,1$  мм,  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ :  $a - \tilde{E} = -9000 \div 2000, \delta, s - \tilde{E} = 200 \div 800$  ( $\delta$  — переход капли от формы столба к форме моста, s — переход капли от формы моста к бочкообразной форме, а затем к форме столба); остальные обозначения те же, что на рис. 9

дальнейшем уменьшении расстояния между волокнами капля бочкообразной формы на критическом расстоянии  $d_{bc}$  принимает форму длинного столба. Таким образом, в случае капель малого объема, как правило, капли в форме столба принимают форму моста. Для капель большого объема имеет место гистерезис: с увеличением расстояния между волокнами d капля в форме столба принимает форму моста, а с уменьшением расстояния dкапля в форме моста постепенно принимает бочкообразную форму, а затем форму столба.

Для капель большого объема существует два значения критического расстояния  $d_{bc}$ и  $d_{cd}$ , при которых происходит переход из одной формы в другую. Эти критические расстояния были вычислены для капель различного объема (рис. 12), проведено также сравнение с экспериментальными данными. Таким образом, модель, предложенная в данной работе, достаточно точно описывает обнаруженный в эксперименте гистерезис [14].

Тем не менее существует небольшое различие теоретических и экспериментальных результатов. Это может быть обусловлено тем, что использование второго предположения (см. п. 2) вносит больше ошибок в вычисление энергии, либо тем, что гистерезис имеет место только при наличии фиксированной контактной линии.



Рис. 12. Зависимости критического расстояния от объема капель при  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ , R = 0.1 мм:

точки — экспериментальные данные [14], линии — результаты расчета, полученные в данной работе;  $1-\tilde{d}_{cd},\,2-\tilde{d}_{bc}$ 

Заключение. В данной работе изучены структуры капли нелетучей жидкости, находящейся между двумя параллельными цилиндрическими волокнами и имеющей форму столба, бочкообразную форму или форму моста. В экспериментах наблюдается изменение формы капли, которая зависит от ее объема и расстояния между волокнами. Установлено, что переход от одной формы к другой зависит от величины поверхностной энергии. Капля малого объема в форме столба принимает форму моста и наоборот. Установлено, что для капель большого объема возможны переходы двух типов: переход от формы столба к форме моста в случае волокон, расположенных на достаточно большом расстоянии друг от друга, и переход от формы моста к бочкообразной форме, а затем к форме столба в случае близкорасположенных волокон. Наличие обратимого перехода для капли малого объема и гистерезиса для капли большого объема подтверждают экспериментальные данные и результаты, полученные в других работах.

Результаты, полученные в данной работе, позволяют определить механизмы переноса воды и сорбции влаги в текстильных изделиях и доставки микро- и наножидкостей через нити. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании микрофлюидных устройств, а также при разработке косметических средств, например жидкостей для ухода за волосами.

## ЛИТЕРАТУРА

- Heine R. D. Wetting and spreading dynamics // Plasma Process. Polymers. 2008. V. 5. P. 206–208.
- 2. Kissa E. Wetting and wicking // Textile Res. J. 1996. V. 66. P. 660–668.
- Zhong W. Surface tension, wetting and wicking // Thermal and moisture transport in fibrous materials. S. l., 2006. P. 136–155.
- 4. Chou Y. H., Hong S. J., Liang Y. E., et al. Equilibrium phase diagram of drop-on-fiber: Coexistent states and gravity effect // Langmuir. 2011. V. 7. P. 3685–3692.
- Sun X. H., Lee H. J., Stephen M., Eugene W. Profile of capillary bridges between two vertically stacked cylindrical fibers under gravitational effect // Appl. Surface Sci. 2018. V. 441. P. 791–797.

- Miller B., Coe A. B., Ramachandran P. N. Liquid rise between filaments in a Vconfiguration // Textile Res. J. 1967. V. 37. P. 919–924.
- Princen H. M. Capillary rise between two cylinders // J. Colloid Interface Sci. 1969. V. 30. P. 69–75.
- Princen H. M. Capillary phenomena in assemblies of parallel cylinders. 3. Liquid columns between horizontal parallel cylinders // J. Colloid Interface Sci. 1970. V. 34. P. 171–184.
- 9. Carroll B. J. The accurate measurement of contact angle, phase contact areas, drop volume and laplace excess pressure in drop-on-fiber systems // J. Colloid Interface Sci. 1976. V. 57. P. 488–491.
- Keis K., Kornev K. G., Neimark A. V., Kamath Y. K. Towards fiber-based micro and nanofluidics // Nanoengineered nanofibrous materials. Dordrecht; Boston; L.: Kluwer Acad. Publ., 2004. P. 175–182.
- 11. Virozub A., Haimovich N., Brandon S. Three-dimensional simulations of liquid bridges between two cylinders: Forces, energies, and torques // Langmuir. 2009. V. 25. P. 1283–1284.
- Bedarkar A., Wu X. F., Vaynberg A. Wetting of liquid droplets on two parallel filaments // Appl. Surface Sci. 2010. V. 256. P. 7260–7264.
- Wu X. F., Bedarkar A., Vaynberg K. A. Droplets wetting on filament rails: Surface energy and morphology transition // J. Colloid Interface Sci. 2010. V. 341. P. 326–332.
- 14. Protiere S., Duprat C., Stone H. A. Wetting on two parallel fibers: drop to column transitions // Soft Matter. 2012. V. 9. P. 271–276.
- Sauret A., Boulogne F., Cébron D., et al. Wetting morphologies on an array of fibers of different radii // Soft Matter. 2015. V. 11. P. 4034–4040.
- Sauret A., Boulogne F., Soh B., et al. Wetting morphologies on randomly oriented fibers // Europ. Phys. J. E. 2015. V. 38. 62.
- Fang W., Schiller U. D. Hysteresis in spreading and retraction of liquid droplets on parallel fiber rails // Soft Matter. 2021. V. 17. P. 5486–5498.
- Aziz H., Tafreshi H. V. Competing forces on a liquid bridge between parallel and orthogonal dissimilar fibers // Soft Matter. 2019. V. 15. P. 6967–6977.
- Élfego R. G., Rodrigo L. A. Lattice-Boltzmann simulations of the dynamics of liquid barrels // J. Phys.: Condensed Mater. 2020. V. 32. P. 214007–214010.
- Persson B. N. J. Wet adhesion with application to tree frog adhesive toe pads and tires // J. Phys.: Condensed Matter. 2007. V. 19. 376110.
- Cooray H., Huppert H. E., Neufeld J. A. Maximal liquid bridges between horizontal cylinders // Proc. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engng Sci. 2016. V. 472, iss. 2192. 20160233.
- McHale G., Newton M. I., Carroll B. J. The shape and stability of small liquid drops on fibers // Oil Gas Sci. Technol. 2001. V. 56. P. 47–54.
- McHale G., Newton M. I. Global geometry and the equilibrium shapes of liquid drops on fibers // Colloids Surfaces A: Physicochem. Engng Aspects. 2002. V. 206. P. 79–86.
- Erle M. A., Dyson D. C., Morrow N. R. Liquid bridges between cylinders, in a torus, and between spheres // AIChE J. 1971. V. 17. P. 115–121.
- Lian G., Thornton C., Adams M. J. A theoretical study of the liquid bridge forces between two rigid spherical bodies // J. Colloid Interface Sci. 1993. V. 161. P. 138–147.
- Kralchevsky P. A., Nagayama K. Capillary bridges and capillary-bridge forces // Studies Interface Sci. 2001. V. 10. P. 469–502.
- Van Honschoten J. W., Tas N. R., Elwenspoek M. The profile of a capillary liquid bridge between solid surfaces // Amer. J. Phys. 2010. V. 78. P. 277–286.
- Broesch D. J., Dutka F., Frechette J. Curvature of capillary bridges as a competition between wetting and confinement // Langmuir. 2013. V. 29. P. 15558–15564.

- Hongwen R., Su X., Wu S.-T. Effects of gravity on the shape of liquid droplets // Optics Comm. 2010. V. 283. P. 3255–3258.
- 30. Duprat C., Protiere S. Capillary stretching of fibers // Frontiers Phys. 2015. V. 111. 56006.
- Duprat C., Protiere S., Beebe A. Y., Stone H. A. Wetting of flexible fibre arrays // Nature. 2012. V. 482. P. 510–513.
- 32. Teixeira P. I. C., Teixeira M. A. C. The shape of two-dimensional liquid bridges // J. Phys.: Condensed Matter. 2019. V. 32. 034002.

Поступила в редакцию 15/I 2021 г., после доработки — 18/X 2021 г. Принята к публикации 25/X 2021 г.