

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

**МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
2009 г.**

**ВЫП. II  
ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
2010

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДИНАМИЧЕСКОГО КРАЕВОГО УГЛА КАПЛИ\*****А.С. УСАНИНА**

*Представлены результаты экспериментального исследования процесса растекания одиночной первоначально сферической капли по твердой горизонтальной сухой поверхности. Эксперименты проведены для случая частичного смачивания. Получены экспериментальные зависимости динамического краевого угла от времени и капиллярного числа.*

**EXPERIMENTAL STUDY  
OF A DROP DYNAMIC CONTACT ANGLE****A.S. USANINA**

*The results of experimental study of a single initially spherical drop spreading on a solid horizontal dry surface are presented. The experiments were made for partial wetting case. The experimental relations of dynamic contact angle from time and capillary number were found.*

Закономерности процессов смачивания и растекания капли по твердой поверхности представляют практический интерес в целом ряде отраслей современной техники и технологии. В качестве примеров можно привести процессы спайки, смазки, пропитки материалов в машиностроении, процессы струйной покраски в полиграфии, процессы нанесения лакокрасочных материалов, защитных, упрочняющих покрытий на конструкционные материалы и т.д. При анализе вышеперечисленных процессов необходимы адекватные модели динамического взаимодействия одиночной капли с твердой поверхностью для различных режимов и параметров взаимодействия. В первую очередь нужно знать динамику линии трехфазного контакта как функцию времени и безразмерных критериев подобия процесса взаимодействия.

Одной из важнейших количественных характеристик процесса растекания капли по твердой поверхности является динамический краевой угол  $\theta_d$ , определяющий линию раздела трех фаз – твердой поверхности, жидкости и газообразной среды. Динамический краевой угол, отличающийся от стационарного краевого угла  $\theta$ , наблюдается с момента соприкосновения капли с подложкой до установления равновесной формы капли. В процессе растекания капли по плоской поверхности значение  $\theta_d$  меняется от  $\pi$  до некоторого стационарного значения краевого угла  $\theta > 0$  (в случае частичного смачивания) или  $\theta = 0$  (в случае полного смачивания).

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных аналитическому, численному и экспериментальному исследованию динамического краевого угла, до

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 09-08-90700 моб\_ст, № 08-08-00064а) и в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

настоящего времени не создано полной и экспериментально подтвержденной теории для описания данной характеристики процесса растекания капли.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса растекания капли по твердой поверхности с образованием пленки жидкости при малых скоростях столкновения  $u \approx 0$ . Для экспериментов были выбраны две жидкости: вода и водно-глицериновый раствор (75 % глицерина). Физико-химические свойства жидкостей приведены в таблице. В качестве твердой поверхности использовалось стекло. Эксперименты проводились при температуре среды 21°C.

Таблица

Физико-химические свойства жидкостей в эксперименте

Жидкость	$\mu$ , Па·с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma \cdot 10^{-3}$ , Н/м
Вода	0,001	1000	73
Водно-глицериновый раствор	0,037	1192	66,3

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из капилляра 1, горизонтального столика 2, масштабной линейки 3, источника света 4, подложки 5, видеокамеры 6 и компьютера 7. Подложка приводилась в строго горизонтальное положение с помощью регулирования столика 2. Диаметр капилляра 1 варьировался в диапазоне  $0,3 < d < 2,2$  мм.

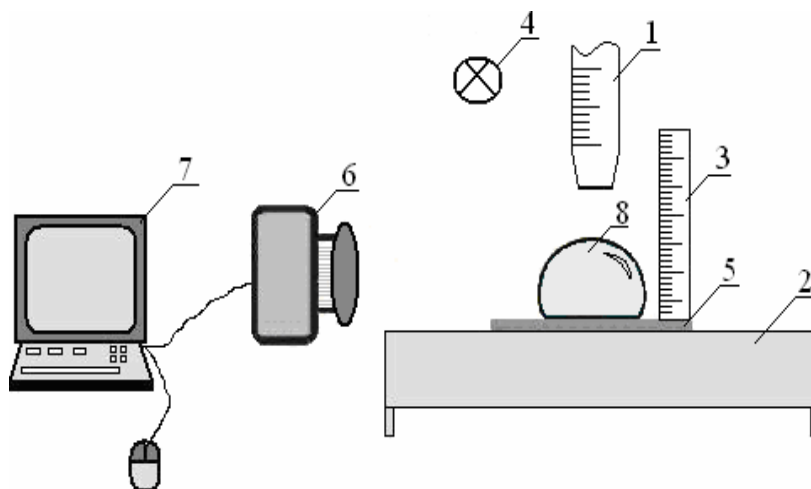


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – капилляр; 2 – горизонтальный столик; 3 – масштабная линейка; 4 – источник света;  
5 – подложка; 6 – видеокамера; 7 – компьютер; 8 – капля

Диаметр капли определялся весовым и визуальным методами. В весовом методе на электронных весах (серии ЕК-400Н) определялась масса 20 капель с дальнейшим расчетом их диаметра по формуле  $D = (6m/\pi\rho)^{1/3}$ , где  $m$  – масса одной капли,  $\rho$  – плотность жидкости.

В визуальном методе для определения геометрических размеров капли, а также геометрических масштабов процессов, протекающих в поле съемки, в плоскости отрыва капли от капилляра устанавливалась масштабная линейка. Измерение диаметра капли и других линейных размеров (радиус площади контакта, высота капли) проводилось при помощи программы для обработки изображения ImageJ.

Погрешность весового метода составляла 0,5 %, а погрешность визуального метода – 5 %. В дальнейших расчетах использовались значения диаметров капель, измеренных первым методом. Диаметры исходных капель, измеренных весовым методом, варьировались в диапазоне  $2,4 < D < 4,3$  мм.

Плотность воды и водно-глицеринового раствора измерялась пикнометрическим способом. Коэффициент динамической вязкости жидкостей определялся по формуле  $\mu = \nu \rho$ , где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, определяемый посредством вискозиметра ВПЖ-4. Погрешность определения коэффициента  $\mu$  равна 1,5 %. Значения коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  брались из табличных данных [1].

Значения динамических краевых углов измерялись при помощи компьютерной программы ImageJ с погрешностью 5 %. Погрешность в измерении динамического краевого угла возникает из-за искажения изображения и зависит от разрешения видеосистемы. Данная программа рассчитывает значение краевого угла по наклону касательной в точке пересечения контура капли с подложкой. Статический краевой угол капель воды и водно-глицеринового раствора при их растекании по стеклу равен  $9^\circ$  и  $34 \pm 2^\circ$  соответственно.

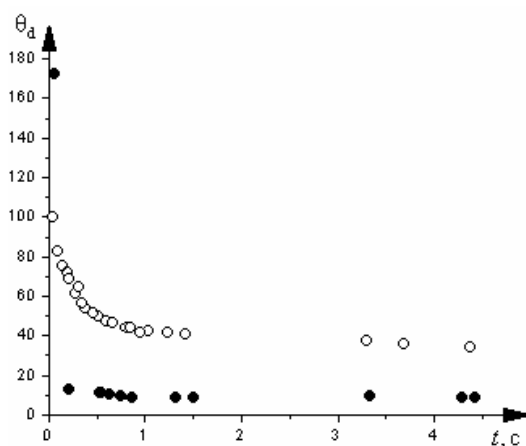


Рис. 2. Зависимость динамического краевого угла от времени:  
○ – водно-глицериновый раствор; ● – вода

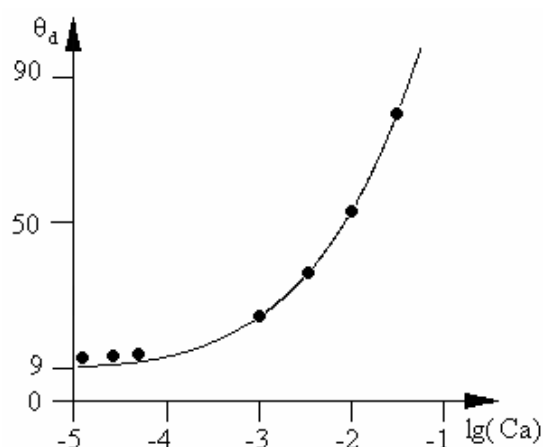


Рис. 3. Зависимость динамического краевого угла от капиллярного числа:  
● – экспериментальные точки; сплошная линия – кривая Хоффмана

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости динамических краевых углов от времени для капель воды и водно-глицеринового раствора диаметром 2,4 мм и 3,8 мм соответственно. В начальной стадии растекания капли ( $t < 0,01^\circ$  для воды,  $t < 0,6^\circ$  для водно-глицеринового раствора) происходит резкое снижение значения динамического краевого угла, а затем  $\theta_d$  слабо уменьшается, постепенно достигая стационарного значения. Время достижения стационарного значения краевого угла в сильной степени зависит от параметров подложки, на которой растекается капля, а именно от уровня ее загрязненности, шероховатости, наличия примесей. Поэтому перед каждым экспериментом стеклянная подложка тщательно очищалась.

На рис. 3 показана зависимость динамического краевого угла от капиллярного числа  $Ca$  для капли воды, растекающейся по стеклу. Капиллярное число  $Ca = \mu V / \sigma$  (где  $V$  – скорость движения линии трехфазного контакта) представляет собой безразмерную скорость движения линии контакта трех фаз и характеризует соотношение вязких сил и сил поверхностного натяжения. Для сравнения на рис. 3 сплошной линией показана универсальная кривая Хоффмана [2], коэффициент смещения которой равен  $7 \cdot 10^{-5}$ . Из рисунка видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с кривой Хоффмана и при малых капиллярных числах ( $Ca < 1$ ) выполняется зависимость  $\theta_d \sim Ca^{1/3}$ , которая носит название закон Хоффмана–Воинова–Тэннера [3].

В работе показано экспериментально, что поведение динамического краевого угла не зависит от значения стационарного краевого угла. В процессе растекания первоначально сферической капли величина  $\theta_d$  уменьшается до его стационарного значения. На примере капли воды показано, что динамический краевой угол является функцией скорости движения линии трехфазного контакта. Для получения зависимости  $\theta_d(Ca)$  при  $Ca > 0$  необходимы дальнейшие исследования с применением высокоскоростной видеокамеры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гороновский И.Т.* Краткий справочник по химии. Киев, 1974.
2. *Hoffman R.* A study of the advancing interface. I. Interface shape in liquid-gas systems // *J. Colloid Interface Science*. 1975. Vol. 50, № 2. P. 228–241.
3. *Kistler S.F.* Hydrodynamics of wetting // *Journal C. Berg (Ed). Wettability*. New York, 1993. P. 311–429.