

**Бесланеева Замира Олеговна,**  
Кабардино-Балкарский государственный  
университет им. Х.М. Бербекова,  
Нальчик

**Карданов Мухамед Анзорович,**  
студент, КБГУ им. Х.М. Бербекова, Нальчик

**Тенгизов Ислам Хусенович,**  
студент, КБГУ им. Х.М. Бербекова, Нальчик

## О РАЗМЕРНОМ ЭФФЕКТЕ СМАЧИВАЕМОСТИ В КАПИЛЛЯРАХ

**Аннотация:** В работе рассматривается размерный эффект смачивания поверхности твердого тела нанокapлей с учетом линейного натяжения; обсуждается влияние линейного натяжения контура смачивания на формирование краевого угла; приводятся результаты расчетов величин высоты поднятия жидкости в капиллярах.

**Ключевые слова:** краевой угол смачивания, растекание жидкости, нанокapля, линейное натяжение.

Исследования смачивания и растекания жидкости по поверхности твердых тел имеют давнюю историю. Опубликовано большое число работ, в том числе специальные монографии [1-3]. В исследованиях смачивания в макросистемах «капля – поверхность» достигнуты значительные успехи. Большое значение для науки и практики материаловедения имеют исследования размерных эффектов поверхностных свойств вещества, включая поверхностные энергии и натяжения, адгезия и смачивания, которые начались еще в 60-х годах в работах Дерягина Б.В., Щербакова Л.М., Задумкина С.Н. и других. Они продолжают в работах Хоконова Х.Б., Самсонова В.М., Гладких Н.Т., Дукарова С.В [4-6] и других.

На рис.1 представлена схема контакта капли с поверхностью подложки при  $\theta < 90^\circ$ . Для каплей радиусами  $r < 10^5$  нм можно пренебречь влиянием силы тяжести на форму капли, а форму сегмента лежащей капли можно считать сферической.

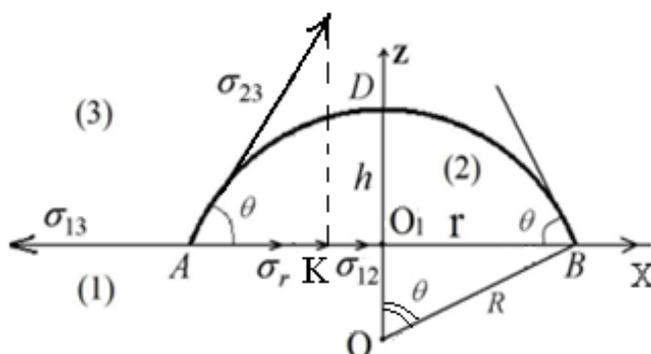


Рис.1. Краевой угол капли на плоской поверхности. 1 – твердое тело, 2 – жидкость, 3 – газ, R и r – радиусы сферической капли и периметра смачивания,  $\sigma_{ij}$  – поверхностные натяжения на границах 13, 23 и 12;  $\sigma_r$  – линейное натяжение на линии периметра смачивания.

Основной характеристикой процесса смачивания является угол смачивания  $\theta$  поверхности твердого тела жидкой каплей (рис.1). Из рис.1 видно, что имеет место



соотношение  $\sin \theta = r/R$ . Зависимость  $\theta$  от поверхностных натяжений  $\sigma_{ij}$  выражается уравнением Юнга

$$\cos \theta = (\sigma_{13} - \sigma_{12}) / \sigma_{23}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$  и  $\sigma_{23}$  – поверхностные натяжения на границах твердое тело – жидкость, твердое тело – газ и жидкость – газ, причем  $\sigma_{23}(R) = \sigma_{23}(\infty)(1 - a/R)$ .

Когда радиус основания сегмента нанокapли  $r < 50$  нм (рис.1), следует учитывать влияние так называемого *линейного натяжения*  $\sigma_r$ , на зависимость  $\theta$  от  $r$ . Линейное натяжение представляет собой избыточную линейную силу  $\gamma_l$ , действующую на частицы вдоль линии контакта трех фаз (например, вдоль контура смачивания) и приходящуюся на единицу длины:

$$\gamma_l = \frac{\Delta F_l}{\Delta l} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta F_l$  определяется как избыточная свободная энергия частиц единицы длины линии смачивания по отношению к свободной энергии частиц в поверхностном слое. Линейная сила направлена вдоль линии смачивания и действует на каждую частицу. В случае *искривленной линии смачивания с радиусом кривизны  $r$  результирующая линейная сила  $\gamma_l(r)$  направлена к центру кривизны* и создает одномерное линейное натяжение  $\sigma_r(r)$ , зависящее от радиуса:

$$\sigma_r(r) = \frac{\gamma_l(r)}{r} \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right]. \quad (3)$$

В состоянии равновесия системы капля – подложка (рис.1) имеет место равенство нулю векторной суммы поверхностных и линейных натяжений, действующих на каждую точку линии смачивания:

$$\sum_{i,j=i} \vec{\sigma}_{ij} + \vec{\sigma}_r = 0 \quad (4)$$

Выражение (4) есть аналог уравнения Неймана. Отсюда условие равновесия линии смачивания для точки А будет (см. рис.1):

$$-\sigma_{13} + \sigma_{12} + \sigma_{23}(R) \cos \theta(R, r) + \sigma_r(r) = 0 \quad (5)$$

Здесь учтено, что  $\sigma_{23}$  зависит от  $R$ , а угол смачивания – от  $R$  и  $r$ .

Из условия равновесия (5) с учетом соотношений (1) и (3) получим

$$\cos \theta(R, r) = \cos \theta(R) - \frac{\sigma(r)}{\sigma_{23}(R)}, \quad (6)$$

где  $\theta(R, r)$  – угол смачивания каплей радиусами сферического сегмента  $R$  и его основания на плоскости  $r$ ,  $\theta(\infty)$  – угол смачивания поверхности подложки макрокапель.

В случае нанокapли при учете размерных зависимостей  $\sigma_{23}(R)$  и  $\sigma_r(r)$  из (6) с учетом (1) и (3) получим



$$\cos \theta(R, r) = \left[ \cos \theta(\infty) - \frac{\gamma_l(r)}{\sigma_{23}(\infty) \cdot r} \right] \left( 1 + \frac{2a}{R} \right) \quad (7)$$

Уравнение (7) устанавливает зависимость угла смачивания поверхности подложки от радиусов кривизны нанокapли  $R$  и периметра смачивания  $r$ . Из (7) видно, что как при  $0 < \theta < \pi/2$ , так и при  $\pi/2 < \theta < \pi$  линейное натяжение приводит к уменьшению радиуса периметра смачивания  $r$ , следовательно, к увеличению краевого угла при уменьшении радиуса  $r$  линии смачивания.

Как отмечено в [3,5] для линейной цепочки металлических наночастиц радиусами  $R < 30$  нм величина  $\gamma_l \geq 10^{-6}$  мН, поэтому влияние линейного натяжения на  $\theta(R, r)$  будет заметным при  $R < 20$  нм.

В КБГУ создана экспериментальная установка на базе модернизированного теневого электронного микроскопа, в камере которого впервые удалось получать нанокapли, посадить их на острие кантилевера, перенести и контактировать с чистой поверхностью подложки в избранной точке, наблюдать картину смачивания нанокapлей чистой поверхности [4,5]. Оказалось, что капля размером 130 нм смачивает поверхность, а капли диаметрами меньше 32 нм плохо или совсем не смачивают поверхность.

#### Расчет величин высоты поднятия жидкости в капилляре

Используя формулу Жюлена можно определить значения высоты поднятия воды и крови в капиллярной трубке.

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r(\rho - \rho_0)g} \quad (8)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\rho_0$  – плотность воздуха,  $r$  – радиус капилляра,  $g$  – ускорение свободного падения. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты расчетов высоты поднятия жидкости  $h$  в капилляре в зависимости от радиуса капилляра  $r$ .

для воды				
$\sigma$ , мН/м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\theta(r)$ , град	$r$ , нм	$h$ , м
82,5	1000	30	10	1428,9
			20	741,45
			30	476,3
			50	285,78
		60	10	825,0
			20	412,5
			30	275,0
			50	165,0



для крови				
$\sigma$ , мН/м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\theta(r)$ , град	$r$ , нм	$h$ , м
60,0	1060	30	2500	3,92
			3000	3,268
			3500	2,801
			4000	2,45
		60	2500	2,264
			3000	1,887
			3500	1,62
			4000	1,42

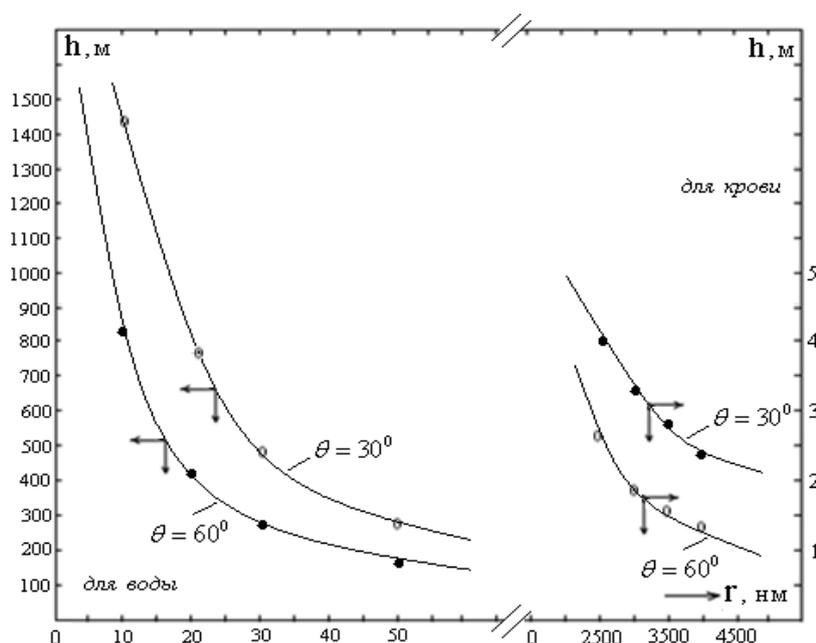


Рис.2. Высота поднятия жидкости (воды и крови) в капилляре радиусами  $r=10-50$  нм (вода) и  $r=2500-4000$  нм (кровь) при углах смачивания  $\theta(r) = 30^\circ$  и  $\theta(r) = 60^\circ$ .

Эти расчеты показали, что значения высот поднятия воды при  $\theta(r) = 30^\circ$  составляют в среднем около 733,110 м, а при  $\theta(r) = 60^\circ$  419,375 м; для крови около 3,110 м и 1,798 м соответственно.

#### Выводы

1. Получено уравнение зависимости угла смачивания поверхности твердого тела от размера нанокapли
2. Впервые в камере электронного микроскопа получена нанокapля и обеспечено ее визуальное контактирование с поверхностью твердого тела. Показано, что нанокapли олова размерами меньше 20 нм не смачивают чистую поверхность пленки золота.
3. Проведены расчеты высоты поднятия жидкости в капиллярах. Расчетные данные показали, что с уменьшением угла смачивания жидкость в капилляре поднимается выше. Средние значения высоты поднятия жидкости составляют около 576,242 м и 2,454 м.



*Список литературы:*

1. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия. – 1976. – 232 с.
2. Русанов А.И. К теории смачивания упругодеформированных тел. Сведения эффектов деформации к линейному натяжению // Коллоид. ж. – 1977. – Т.39, №4. – С. 704-710.
3. Чижик С.П., Гладких Н.Т., Ларин В.И., Григорьева Л.К., Дукаров С.В. Размерные эффекты при смачивании в ультрадисперсных системах // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1985. – №12. – С.111-121.
4. Тегаев Р.И., Хоконов Х.Б., Карамурзов Б.С. и др. Метод и экспериментальная установка для визуального позиционирования наноконтактов // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т.72, № 10. – С. 1439-1442.
5. Бесланеева З.О., Таова Т.М., Хоконов Х.Б. Смачиваемость поверхности твердого тела наноразмерной каплей и линейное натяжение // Известия РАН. Серия физическая. – 2014. – Т.78, № 8. – С. 1046-1050.
6. Щербаков Л.М., Самсонов В.М. О размерных эффектах при смачивании поверхности твердого тела ультрадисперсными частицами жидкостей и расплавов // Поверхность. Физика, химия, механика. –1995. –№3. – С. 95-102.

