

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. Режимы испарения капель воды на медных подложках // Коллоидный журнал. – 2016. – Т.78. – С.335-339.
2. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Evaporation of water solution droplets on a horizontal heating surface // International Journal of Energy Technology – 2012. – P. 1-7.
3. Люлин Ю.В., Кабов О.А. Измерение массовой скорости испарения в горизонтальном слое жидкости, частично открытом в движущийся газ // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т.39. – С. 88-94.
4. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, №1. – С. 17-22
5. Семенов А. А., Зайцев Д. В., Феоктистов Д.В., Кузнецов Г. В., Кабов О. А. Экспериментальное исследование испарения капли жидкости на нагреваемой твердой поверхности // Теплофизика и аэромеханика. - 2015 - Т. 22 - №. 6. - С. 801-804.

МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ЛИНИИ В УСЛОВИЯХ РАСТЕКАНИЯ КАПЛИ ПО ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

¹ Д.В. Феоктистов, ^{1,2} Л.С. Жидкова, ^{1,2} К.А. Батищева
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, ²5БЗБ

Известно [1-17], что капля, помещенная на твердую поверхность, растекается, стремится принять равновесное состояние. Характеристиками, используемыми для описания растекания капли по твердой поверхности являются: динамический краевой угол, скорость движения линии трехфазного контакта (ЛТК) и диаметр пятна контакта. Наиболее значимой из них является динамический краевой угол. Известны [18-20], теории процесса растекания, в которых ДКУ математизирован в виде функциональных зависимостей от скорости перемещения ЛТК.

В настоящих исследованиях проведено обоснование возможности применения положений комбинированной теории процесса растекания (как наиболее интегрированной так, как она учитывает адсорбцию и десорбцию молекул, силы вязкостного трения в объеме жидкости) к описанию натекания/оттекания капли жидкости по полированной и структурированной поверхностям алюминиевых подложек.

В комбинированной теории предполагается, что равновесный контактный угол зависит от скорости перемещения ЛТК [18]:

$$\theta_D^3 = (\theta_0(U))^3 \pm (9\mu U / \sigma) \ln(L/L_m)$$

$$\text{где } \theta_0(U) = \arccos \left[\cos \theta_D \mp (2k_B T / \sigma \lambda^2) \operatorname{arcsinh}(U / 2k_0 \lambda) \right]$$

Исследования проводились на установке принцип действия установки подробно описан в [21]. В экспериментах использовались две подложки, изготовленные из алюминия. Поверхность одной полировалась, на вторую наносилась микроструктура лазерной обработкой. Поверхности исследовались с помощью профилометра «Micro Measure 3D station» (рис.1). Установлены средние арифметические отклонения профиля $Ra=0,0558\text{мкм}$ и $Ra=4,2096\text{ мкм}$ соответственно для полированной и структурированной подложки. На микроскопе «Hitachi-3000M» исследована микроструктура. Их фотоизображение приведено на рис. 1.

Расход жидкости, подаваемый электронным насосом варьировался в следующем диапазоне: 0,05 мл/с, 0,07 мл/с, 0,09 мл/с, 0,11 мл/с.

Обработка экспериментальных данных и сопоставление с моделью [18] проводилась методом наименьших квадратов. Для оценки согласования данных получен коэффициент детерминации R^2 . Результаты определения параметров комбинированной модели для полированной поверхности приведены в табл. 1

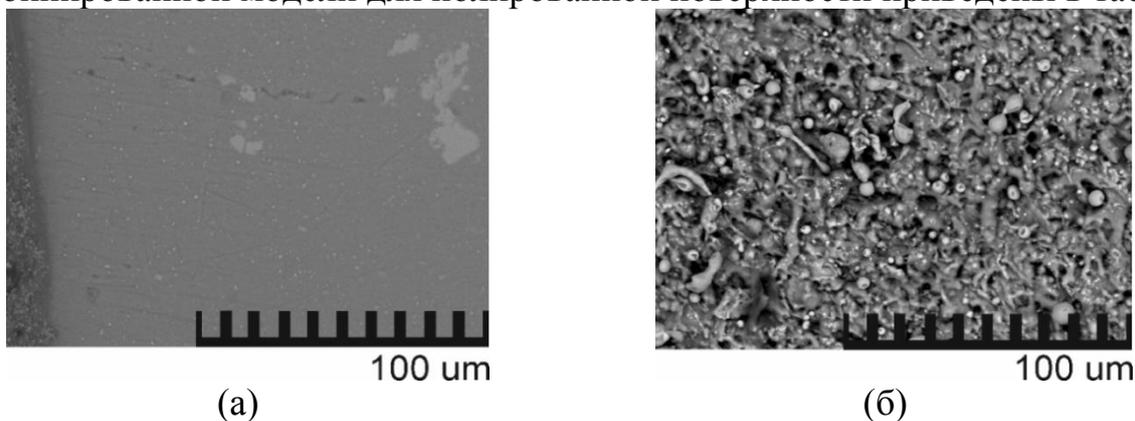


Рис. 1. Поверхность подложек ($\times 1000$): (а) полированная; (б) структурированная

Табл. 1. Параметры полированной поверхности

Расход жидкости, мл/с	Динамический контактный угол	Экспериментально установленный статический угол $\theta_0, ^\circ$	Расчетные параметры			
			$\theta_0, ^\circ$	$k^0, 10^3 s^{-1}$	$\lambda, \text{нм}$	R^2
0,05	Наступающий	96,5	96,2	507,0	2,30	0,990
	Отступающий		95,5	8639,4	0,46	0,997
	Наступающий/ отступающий		91,6	0,47	3,02	0,758
0,07	Наступающий	92,8	92,8	6693,1	0,56	0,998
	Отступающий		92,4	49,4	1,69	0,991
	Наступающий/ отступающий		90,4	4,69	2,73	0,650
0,09	Наступающий	85,3	87,0	5084,9	1,14	0,992
	Отступающий		84,2	7287,7	0,62	0,999
	Наступающий/ отступающий		80,5	0,863	2,98	0,634
0,11	Наступающий	99,0	99,4	1443,2	2,03	0,973
	Отступающий		0,096	8210,8	0,096	0,957
	Наступающий/ отступающий		96,7	1,80	4,85	0,765

Установлено, что комбинированная модель хорошо согласуется с экспериментальными результатами на полированной поверхности. Это объясняется тем, что она учитывает одновременно трение контактной линии и силы вязкости в объеме жидкости. Также стоит отметить, что значения отступающего ДКУ в сравнении с наступающим согласуются лучше.

В таблице 2 представлены результаты параметров комбинированной модели для структурированной поверхности.

Установлено, что зависимости наступающего/отступающего ДКУ от скорости перемещения ЛТК на структурированной поверхности лучше согласуются с комбинированной моделью по сравнению с полированной. Так, при расходе жидкости 0,05 мл/с коэффициент детерминации на полированной поверхности для комбинированной модели равен $R^2=0,758$, на структурированной – $R^2=0,975$. Отличие коэффициентов детерминации связано с разным значением гистерезисов КУ на двух поверхностях.

Табл. 2. Параметры модели для структурированной поверхности

Расход жидкости, мл/с	Эксперимен- тально уста- новленный ста- тический угол $\theta_0, ^\circ$	Комбинированная модель			
		$\theta_0, ^\circ$	$k^0,$ $10^3 \Gamma\mu$	$\lambda, \text{ нм}$	R^2
0,05	71,9	69,7	132,8	1,59	0,975
0,07	80,2	74,2	4,71	1,75	0,965
0,09	75,8	76,2	394,0	1,07	0,980
0,11	78,9	77,3	534,3	1,02	0,989

Также установлено, что помимо шероховатости и химической неоднородности поверхностей, на значение гистерезиса влияет форма микроструктуры поверхности, ее пористость. Так, на полированной поверхности со средним арифметическим отклонением профиля $Ra = 0,0558$ мкм гистерезис КУ составляет 5° , а на поверхности, структура которой создана лазерной обработкой, с $Ra = 4,2096$ он не превышает и 2° .

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-6810.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. Режимы испарения капель воды на медных подложках // Коллоидный журнал. – 2016. – Т. 78. – С.335-339.
2. Зайцев Д.В., Чиннов Е.А., Кабов О.А., Марчук И.В. Экспериментальное исследование волнового течения пленки жидкости по нагреваемой поверхности // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – В. 6. – С. 31-37.
3. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Evaporation of water solution droplets on a horizontal heating surface.// International Journal of Energy Technology – 2012. – P. 1-7.
4. Li X., Zhang L., Ma X., Zhang H. Dynamic characteristics of droplet impacting on prepared hydrophobic/superhydrophobic silicon surfaces // Surface and Coatings Technology. – 2016. – V. 307. – P. 243-253.
5. Люлин Ю.В., Феоктистов Д.В., Афанасьев И.А., Чачило Е.С., Кабов О.А., Кузнецов Г.В. Измерение скорости испарения с локальной поверхности слоя жидкости под действием потока газа // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – С. 1-7.
6. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of water droplets shape influence on mathematical modeling results of its evaporation in motion through a high-temperature gas // Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – V. 2014. – Article Number. 920480. – P. 1-8.

7. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Бельков Н.С. Влияние условий теплопередачи на характеристики зажигания жидкого топлива // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – В. 7-8. – С. 9-12.
8. Накоряков В.Е., Мисюра С.Ю., Елистратов С.Л. Кризис кипения в каплях этанола раствора воды на поверхности нагрева // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 22 – С. 1-7.
9. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Испарение капель жидкости с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и Аэро-механика. – 2016. – Т. 23. – С. 17-22.
10. Kirichenko D.P., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Levitation of Liquid Microdroplets above A Solid Surface Subcooled to the Leidenfrost Temperature // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 72. – Article number. 01046.
11. Sivkov A., Shanenkova Y., Saigash A., Shanenkov I. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity // Surface and Coatings Technology. – 2016. – V. 292. – P. 63-71.
12. Oko A., Claesson P.M., Niga P., Swerin A. Measurements and dimensional scaling of spontaneous imbibition of inkjet droplets on paper // Nordic Pulp and Paper Research Journal. – 2016. – V. 31. – Issue 1. – P. 156-169.
13. Basu S., Shravan S. Preparation and characterization of petroleum sulfonate directly from crude // Petroleum Science and Technology. – 2008. – Volume 26. – Issue 13. – P. 1559-1570.
14. Sivkov A.A., Pak A.Y., Nikitin D.S., Rakhmatullin I.A., Shanenkov I.I. Plasmodynamic synthesis of nanocrystalline structures in the C-N system // Nanotechnologies in Russia. – 2013. – V. 8. – Issue 7-8. – P. 489-494.
15. Люлин Ю.В., Кабов О.А. Измерение массовой скорости испарения в горизонтальном слое жидкости, частично открытом в движущийся газ // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – С. 88-94.
16. Накоряков В.Е., Мисюра С.Ю. Пузырьковое кипение в каплях чистой воды и в каплях водного раствора соли // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 458. – №4. – С. 410-414.
17. Накоряков В.Е., Елистратов С.Л., Мисюра С.Я. Особенности диссоциации газовых гидратов при тепловом воздействии // Журнал технической теплофизики. – 2013. – Т. 22. – В. 3. – С. 169-173.
18. Petrov P.G., Petrov J.G. A combined molecular-hydrodynamic approach to wetting kinetics // Langmuir. – 1992. – №8 – P.1762-1767.
19. Blake T. D., Haynes J. M. Kinetics of liquidliquid displacement // Journal of Colloid and Interface Science. – 1969. – V. 30. – Issue 3. – P.421-423.
20. Voinov O. V. Hydrodynamics of Wetting // Journal of Fluid Dynamics. – 1976. – V. 11. – Issue 5. – P. 714-721.
21. Orlova E.G., Malyhina E.R., Feoktistov D.V., Zhidkova L.S. Dynamic Wetting and Dewetting: Comparison of Experiment with Theories // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 72. – Article number. 01062.