

УДК 532.64

Влияние скорости образования капли при растекании по микроструктурированной поверхности на краевой угол*

Г.В. Кузнецов¹, Д.В. Феоктистов², Е.Г. Орлова¹, И.Ю. Зыков¹,
К.А. Батищева¹

¹Томский политехнический университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: lafleur@tpu.ru

Представлены экспериментальные зависимости макрокраевого угла и диаметра растекания капли дистиллированной воды по твердой микроструктурированной поверхности от среднеарифметического отклонения профиля поверхности (Ra) и расхода жидкости (G). Установлено, что при изменении G от 0,005 до 0,02 мл/с краевой угол уменьшается, а при расходе жидкости больше 0,02 мл/с — увеличивается. При малых значениях G (0,005–0,01 мл/с) диаметр капли растет на протяжении всего процесса растекания. В диапазоне G от 0,02 до 0,16 мл/с на завершающей стадии растекания зафиксирован пиннинг контактной линии — постоянство диаметра. Сформулирована гипотеза о механизме процесса пиннинга: он обусловлен равенством нулю суммы всех сил, действующих на каплю (инерции, вязкости, трения, тяжести, поверхностного натяжения).

Ключевые слова: макрокраевой угол, скорость образования капли, пиннинг, микроструктурированная поверхность.

Введение

В теплообменниках с высокой интенсивностью теплопередачи достаточно типичны ручейковые течения жидкости по наклонной поверхности (также на ней возможна реализация режима капельной конденсации [1]). Установлено [2, 3], что капельные и ручейковые системы охлаждения во многих случаях более эффективны по сравнению с пленочными вследствие повышенной интенсивности теплоотдачи на линии раздела «подложка–капля–смесь воздуха и паров капли». Капельным технологиям в последнее время уделяется повышенное внимание [4–9] в связи с перспективами существенного увеличения эффективности многих технологических процессов за счет возможной оптимизации процесса испарения капель и последующего использования продуктов парообразования. Закономерности этого фазового перехода во многом определяются условиями смачивания жидкостью материала подложки.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 15-19-10025).

Наиболее изучены процессы смачивания и растекания на поверхностях из стекла [10–12], покрытых воском [13] или полимерными пленками [14]. Однако практически отсутствуют результаты экспериментальных исследований влияния микрорельефа металлических поверхностей на макрокраевой угол θ (характеризующий наклон поверхности жидкости к плоскости, на которую проецируется профиль твердой поверхности [15]) и диаметр растекания капли при различных скоростях ее образования. Известно [15], что в условиях смачивания жидкостью материала ($90^\circ > \theta > 0^\circ$) увеличение шероховатости поверхности вызывает уменьшение макрокраевого угла. В отсутствие смачивания ($\theta > 90^\circ$) увеличение шероховатости приводит к росту макрокраевого угла. Для описания процессов растекания каплей была разработана теория [15], основой которой являются уравнения Юнга в условиях смачивания идеально гладкой поверхности и Венцеля–Дерягина — шероховатой. Вместе с тем, используемое при анализе макрокраевых углов уравнение Венцеля–Дерягина по существу не учитывает расположение выступов и канавок на поверхности, а также скорость образования капли (объемного расхода жидкости). Авторы [15] полагали, что расчет макрокраевых углов с использованием уравнения Венцеля–Дерягина возможен только в случае, если шероховатость поверхности образована параллельно расположенными канавками. При хаотичном расположении последних значения макрокраевых углов могут не согласовываться со значениями, полученными по уравнению Венцеля–Дерягина. К настоящему времени отсутствуют результаты экспериментальных исследований влияния шероховатости (расположения канавок на поверхности) при различной скорости образования капли на макрокраевой угол.

Целью предлагаемой работы является экспериментальное определение зависимостей макрокраевого угла и диаметра растекания каплей (d) от расхода жидкости (в диапазоне от 0,005 до 0,16 мл/с) и степени шероховатости подложки, изготовленной из нержавеющей стали.

1. Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проведены с использованием теневой и шлирен оптических систем на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1 [16–18]. В оптической теневой системе источник света 1, матовое стекло 2, щит с отверстием 3 и коллимирующая линза 4 формировали пучок плоскопараллельного света,

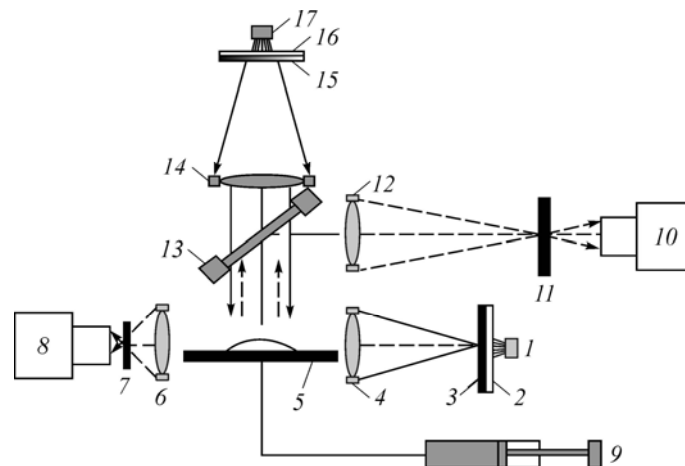


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

1, 17 — источники света, 2, 16 — матовые стекла, 3, 7, 11 — щиты с отверстием, 4, 14 — коллимирующие линзы, 5 — подложка, 6, 12 — конденсирующие линзы, 8, 10 — высокоскоростные камеры, 9 — шприцевый насос, 13 — делитель пучка, 15 — кодирующий фильтр.

освещающего каплю на подложке 5. Конденсирующая линза 6 и объектив камеры 8 применялись для проецирования изображения на сенсор последней. Для уменьшения погрешностей, обусловленных влиянием внешних источников света на результаты измерений, устанавливался непрозрачный щит с отверстием 7 в фокусе линзы 6. В шпирен-системе источник некогерентного света 17, матовое стекло 16 и кодирующий фильтр 15 формировали световой поток со ступенчатым уменьшением интенсивности по пространству. Пучок света от источника 17 проходил через коллимирующую линзу 14, которая преобразовывала его в плоскопараллельный световой поток. Далее он отражался от делителя пучка 13 и направлялся на подложку 5 и к линзе 12, фокусировался на щите 11 и через объектив проецировался на сенсор камеры 10. Шприцевым насосом 9 жидкость выдавливалась с нижней стороны подложки 5 через отверстие диаметром 2 мм. В процессе эксперимента контролировались объем (0,3 мл) и расход (от 0,005 до 0,16 мл/с) дистиллированной воды. Преимуществом такого способа образования капли по сравнению с традиционными методами ее нанесения на подложку шприцом-дозатором [19, 20] является уменьшение погрешности в задании начального объема.

При проведении экспериментов использовались две высокоскоростные видеокамеры Fastvideo-500M. Скорость видеозаписи варьировалась (табл. 1) в зависимости от расхода жидкости. Регистрация изображений капли проводилась одновременно по двум координатным направлениям. С использованием оборудования шпирен-системы контролировалась осесимметричность объекта исследования. Теневым методом были получены видеокадры профиля капли, по результатам анализа которых и определялись ее геометрические параметры (макроразовый угол и диаметр). В экспериментах использовались три подложки из нержавеющей стали с различной шероховатостью. Поверхность первой подложки не обрабатывалась (образец № 1 в табл. 2). Две другие подвергались обработке путем бомбардировки частицами Al_2O_3 размерами 10 и 100 мкм (соответственно образцы № 2 и № 3 в табл. 2). По результатам предварительных экспериментов определялись области варьирования факторов (табл. 2). Профиль подложек (расположение выступов и впадин на поверхности) и среднее арифметическое отклонение профиля Ra (параметр, характеризующий шероховатость) были получены при исследовании поверхностей на профилометре «Micro Measure 3D station». Достоверность полученных результатов подтвердилась значениями случайных погрешностей, рассчитанных при повторении серии экспериментов. Относительная погрешность измерения макроразового угла составила не более 3,7 %, контактного диаметра — менее 1,5 %.

Таблица 1

Скорости видеозаписи процесса растекания и расход жидкости

Скорость видеозаписи, кадр/с	Расход жидкости, мл/с
10	0,005
20	0,01
40	0,02
80	0,04
160	0,08
320	0,16

Таблица 2

Основные факторы

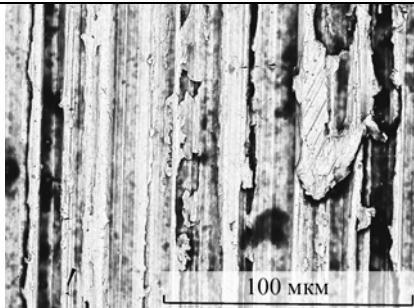
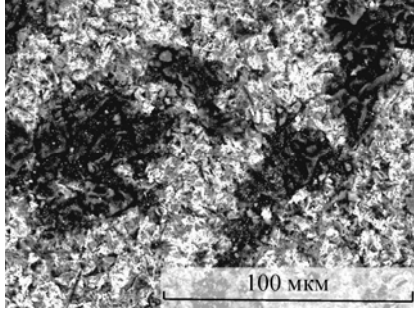
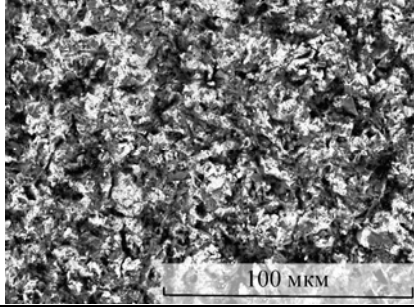
Факторы	Значения
Объем жидкости, мл	0,3
Объемный расход жидкости (G), мл/с	0,005; 0,01; 0,02; 0,04; 0,08; 0,16
Параметр шероховатости Ra поверхности из нержавеющей стали, мкм	Образец № 1 — $Ra = 1,500$ Образец № 2 — $Ra = 1,554$ Образец № 3 — $Ra = 4,590$
Смачивающая жидкость	Недеаэрированная дистиллированная вода

2 Результаты экспериментов

Микроструктура образцов № 1–3 (табл. 2) исследовалась с использованием настольного сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM3030. Фотокадры и описание поверхности подложек представлены в табл. 3.

Таблица 3

Микроструктура подложек

Подложка	Фотография микроструктуры поверхности	Описание
Образец № 1 ($Ra = 1,500$ мкм)		Шероховатость подложки сформирована продольно расположенными канавками.
Образец № 2 ($Ra = 1,554$ мкм)		Шероховатость подложки сформирована хаотично расположенными канавками.
Образец № 3 ($Ra = 4,590$ мкм)		Шероховатость подложки сформирована хаотично расположенными канавками.

Результаты экспериментов (табл. 4) позволили установить, что скорость образования капли на поверхностях всех образцов влияет на макрокраевой угол. Он уменьшается с увеличением расхода жидкости, начиная с $G = 0,005$ мл/с, и достигает минимального значения при $G = 0,02$ мл/с. При дальнейшем росте расхода (свыше $0,02$ мл/с) установлено увеличение θ . Следует отметить, что такие зависимости получены для поверхностей с шероховатостью, образованной как продольно, так и хаотично расположенными канавками. При этом отклонения макрокраевого угла от некоторого характерного для данного варианта шероховатости поверхности среднего значения зависят от рельефа шероховатости. Так, при продольном расположении канавок максимальные отклонения θ составляют 6° , а при хаотично расположенных канавках — 11° . Значения Ra при этом отклоняются менее чем на 4 %. Можно сделать вывод, что рельеф поверхности, по которой растекается капля, существенно влияет на зависимость θ от G . Скорее всего, это связано с тем, что при продольном расположении канавок жидкость движется по поверхности с существенно меньшим сопротивлением, чем при хаотичном расположении. Этот

Таблица 4

Макрокраевые углы смачивания при различных скоростях роста капли

Подложка	Расход дистиллированной воды (скорость роста капли), мл/с					
	0,005	0,010	0,020	0,040	0,080	0,160
Образец № 1 ($Ra = 1,500$ мкм)	78°	77°	76°	80°	81°	82°
Образец № 2 ($Ra = 1,554$ мкм)	89°	84°	83°	91°	93°	94°
Образец № 3 ($Ra = 4,590$ мкм)	97°	95°	83°	84°	85°	89°

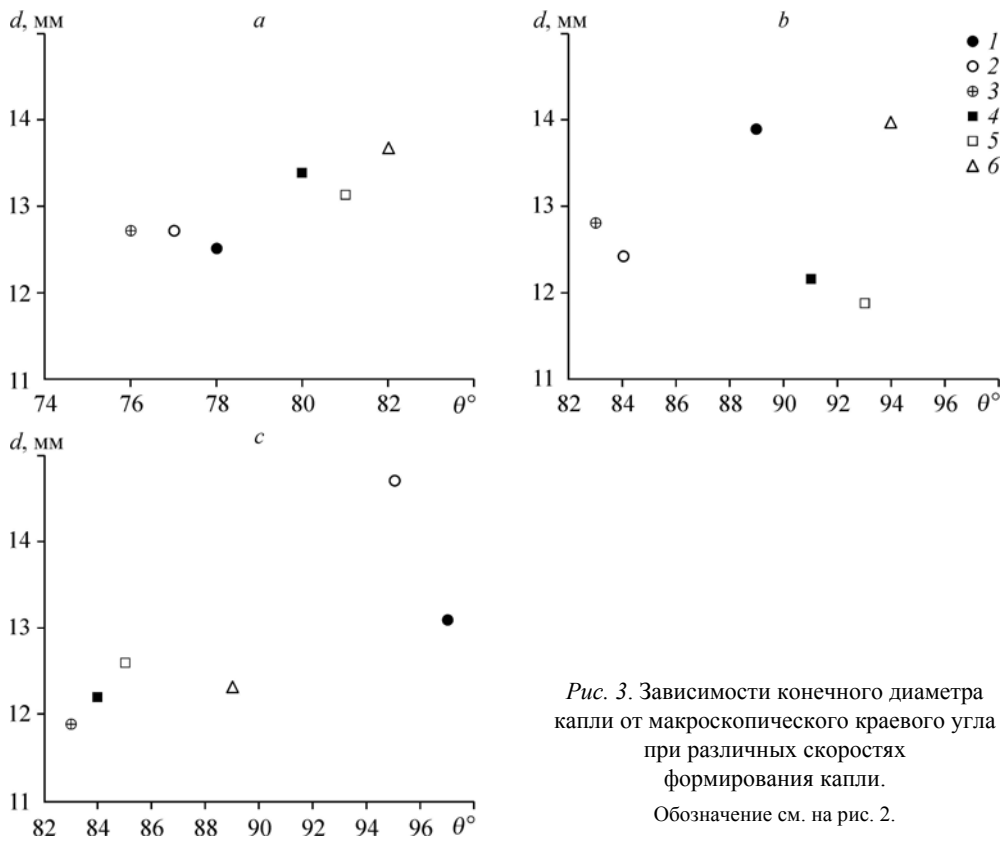
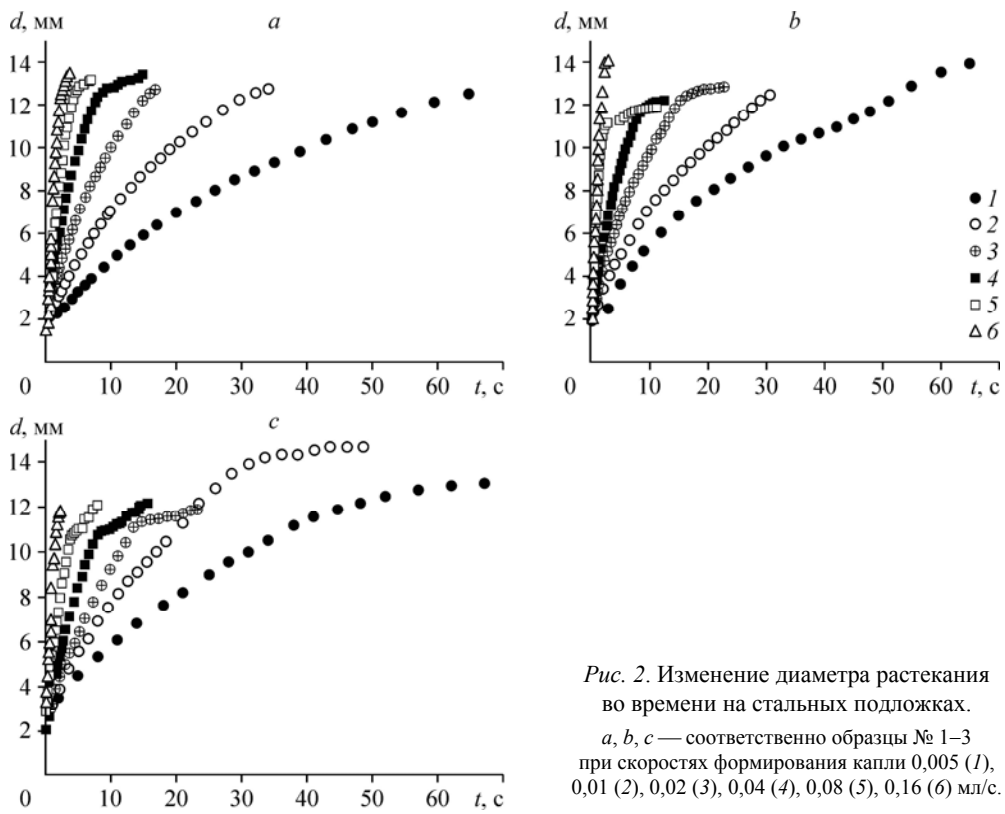
вывод подтверждают полученные при $Ra = 4,590$ мкм результаты, иллюстрирующие связь θ и G при растекании по подложке с хаотично расположенными канавками (табл. 4). Максимальный перепад θ при изменении G от 0,005 до 0,16 мл/с составляет 14°.

Установлено, что при среднем арифметическом отклонении профиля $Ra = 4,590$ мкм и G , изменяющемся до 0,01 мл/с, смачивание отсутствует (угол $\theta > 90^\circ$ [15]). При повышении скорости образования капли до 0,02 мл/с происходит смачивание жидкостью поверхности (значение θ изменяется в диапазоне $90^\circ > \theta > 0^\circ$). При G свыше 0,02 мл/с с увеличением Ra макрокраевой угол растет. Отметим, что наибольшие значения θ зафиксированы на подложке со средним арифметическим отклонением профиля $Ra = 1,554$ мкм (шероховатость подложки сформирована хаотически расположенными канавками). Смачивание при этом отсутствует ($\theta > 90^\circ$). При $Ra = 4,590$ мкм значение угла изменяется в диапазоне $90^\circ > \theta > 0^\circ$ (имеет место смачивание поверхности).

Можно сделать вывод о том, что помимо шероховатости поверхности на смачивание значительно влияет скорость образования капли. При растекании капли на поверхности, шероховатость которой образована хаотично расположенными канавками, возможна инверсия смачивания. В проведенных экспериментах установлено, что последняя зависит от скорости образования капли. Выводы [15], полученные на основе термодинамического анализа уравнения Венцеля–Дерягина, о том, что увеличение шероховатости вызывает уменьшение макрокраевого угла в условиях смачивания, а в отсутствие смачивания $\theta > 90^\circ$ увеличение Ra приводит к росту макрокраевого угла, не согласуются с экспериментальными значениями θ , полученными в настоящем исследовании.

Известно [9], что параметром, характеризующим смачивание поверхностей, является контактный диаметр (d) капли. Значение d характеризует и процесс капельной конденсации (конденсат образуется на поверхности охлаждения, как правило, в виде отдельных капель). На рис. 2 представлены зависимости изменения диаметра растекания по стальной поверхности при различных скоростях образования капли во времени. Анализ результатов проведенных экспериментов показал влияние расхода жидкости на диаметр растекания. При малых значениях G (0,005, 0,01 мл/с) диаметр увеличивается на протяжении всего процесса растекания. В диапазоне изменения G от 0,02 до 0,16 мл/с на завершающей стадии зафиксирован пиннинг контактной линии, при котором диаметр изменяется незначительно (при $d \approx \text{const}$ скорость перемещения линии трехфазного контакта стремится к нулю, происходит формирование равновесного контактного угла капли). Режим пиннинга линии трехфазного контакта характеризуется постоянством диаметра смоченной площади при одновременном увеличении высоты капли. В проведенных экспериментах этот режим зафиксирован до момента завершения формирования капли (т.е. жидкость продолжала поступать через отверстие).

Зависимости конечного диаметра капли от макроскопического краевого угла при различных скоростях образования капли на исследуемых образцах представлены на рис. 3. По результатам анализа представленных здесь данных явной зависимости конечного диаметра капли от макроскопического краевого угла при различных скоростях формирования капли установить не удалось.



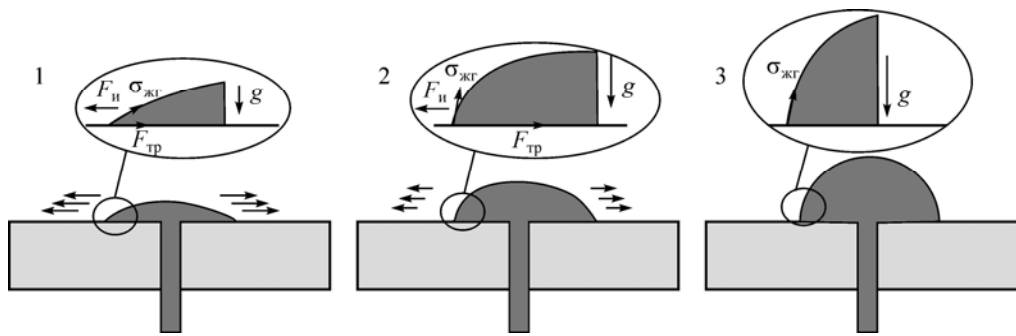


Рис. 4. Схема, описывающая процесс растекания с обозначением действующих сил.

$F_{и}$, $F_{тр}$, $\sigma_{жг}$, g — силы инерции, трения, поверхностного натяжения и тяжести соответственно.

Проведя анализ результатов выполненных экспериментов, можно выделить ряд особенностей, характеризующих механизм исследуемого процесса растекания. Так, стабилизация диаметра (пиннинг) при определенных скоростях образования капли ($0,02 < G < 0,16$ мл/с) (рис. 2) на различных по шероховатости поверхностях (табл. 2) обусловлена равенством нулю суммы сил, действующих на каплю (инерции, вязкости, трения, тяжести, поверхностного натяжения) (рис. 4). Отметим, что в рассмотренном случае (для больших капель) кроме сил тяжести (g), поверхностного натяжения ($\sigma_{жг}$) и трения ($F_{тр}$), следует принимать во внимание силы инерции ($F_{и}$) и вязкости, играющие, например, большую роль при свободном падении капель [21–23]. Очевидно, деформация капли в значительной степени зависит от ее высоты и условий трения на подложке. В проведенных экспериментах установлено слабое влияние шероховатости поверхности подложки (рис. 2) на условия деформации капли при малых скоростях ее образования. В этом случае силы тяжести доминируют над силами инерции, и зависимость $d(t)$ незначительно отклоняется от линейной.

При большой скорости образования капли (при интенсивном притоке жидкости) силы трения на шероховатой поверхности, препятствующие растеканию капли, растут быстрее сил тяжести, инициирующих растекание. Несмотря на рост капли по высоте, жидкость при интенсивном увеличении массы капли, приходящейся на единицу площади, в большей степени заполняет элементы шероховатости (канавки), следовательно, растёт ее давление — капля как бы «прилипаёт» к смачиваемой поверхности.

Заключение

По результатам экспериментальных исследований установлено влияние свойств поверхности (микроструктуры, среднеарифметического отклонения профиля) и расхода жидкости на макрокраевой угол и диаметр растекания капли. Выделены два характерных диапазона влияния расхода жидкости на краевой угол: до 0,02 мл/с и свыше 0,02 мл/с. Установлено, что такая зависимость характерна для поверхностей с шероховатостью, образованной как продольно, так и хаотично расположенными канавками. Также установлено влияние скорости образования капли на контактный диаметр. При малых значениях G (0,005, 0,01 мл/с) диаметр капли монотонно увеличивался в течение всего процесса растекания. Режим пиннинга контактной линии зарегистрирован при больших скоростях образования капли (от 0,02 до 0,16 мл/с).

Список литературы

1. Алексеев С.В., Бобылев А.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. Регулярные волны на вертикально стекающих ривулетах при разных углах смачивания // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 3. С. 371–384.
2. Зайцев Д.В., Кириченко Д.П., Кабов О.А. Влияние смачиваемости подложки на разрыв локально нагреваемой пленки жидкости // Письма в Журн. техн. физики. 2015. Т. 41, № 11. С. 79–85.
3. Зайцев Д.В., Кабов О.А., Чеверда В.В., Буфетов Н.С. Влияние волнообразования и краевого угла смачивания на термокапиллярный разрыв стекающей пленки жидкости // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42, № 3. С. 449–455.
4. Kato K., Wakimoto T., Yamamoto Y., Ito T. Dynamic wetting behavior of a triple-phase contact line in several experimental system // Exp. Thermal and Fluid Sci. 2015. Vol. 60. P. 354–360.
5. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Non-isothermal desorption of droplets of complex compositions // Thermal Sci. 2012. Vol. 16, No. 4. P. 997–1004.
6. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L. Boiling crisis in droplets of ethanol water solution on the heating surface // J. of Engng Thermophysics. 2013. Vol. 22, No. 1. P. 1–6.
7. Janardan N., Panchagnula M.V. Effect of the initial conditions on the onset of motion in sessile drops on tilted plates // Colloids Surf., A. 2014. Vol. 456. P. 238–245.
8. Somalinga S., Bose A. Numerical investigation of boundary conditions for moving contact line problem // Phys. Fluids. 2000. Vol. 12. P. 499–510.
9. 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.
10. Roux D.C.D., Cooper-White J.J. Dynamics of water spreading on a glass surface // J. Colloid Interface Sci. 2004. Vol. 277. P. 424–436.
11. Rioboo R., Marengo M., Tropea C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces // Exp. Fluids. 2002. Vol. 33. P. 112–24.
12. Gunjal P.R., Ranade V.V., Chaudhari R.V. Computational study of a single-phase flow in packed beds of spheres // AIChE J. 2005. Vol. 51. P. 59–78.
13. Ganesan S. On the dynamic contact angle in simulation of impinging droplets with sharp interface methods // Microfluid and Nanofluidics. 2013. Vol. 14. P. 615–625.
14. Wang Y., Sang D.K., Du Z., Zhang C., Tian M., Mi J. Interfacial structures, surface tensions, and contact angles of diiodomethane on fluorinated polymers. // J. Phys. Chem. C. 2014. Vol. 118. P. 10143–10152.
15. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: «Химия», 1976. 232 с.
16. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Режимы растекания капли воды по подложкам с различной смачиваемостью // Инж.-физ. журнал. 2016. Т. 89, № 2. С. 310–315.
17. Orlova E.G., Feoktistov D.V., Batishcheva K.A. Dynamic contact angle and three-phase contact line of water drop on copper surface // IOP Conference Series: Materials Sci. and Engng. 2015. Vol. 93. P. 012010-1–012010-6.
18. Gatapova E.Ya., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // Colloids Surf., A. 2014. Vol. 441. P. 776–785.
19. Pierce E., Carmona F., Amirfazli A. Understanding of sliding and contact angle results in tilted plate experiments // Colloids Surf., A. 2008. Vol. 323. P. 73–82.
20. Brutin D., Zhu Z., Rahli O., Xie J., Liu Q., Tadrist L. Sessile drop in microgravity: creation, contact angle and interface // Microgravity Sci. Technol. 2009. Vol. 21. P. 67–76.
21. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журн. техн. физики. 2014. Т. 84, № 7. С. 15–23.
22. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение одиночных капель и потока распыленной жидкости при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 4. С. 597–604.
23. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Движение совокупности капель мелкодисперсной жидкости во встречном потоке высокотемпературных газов // Письма в Журн. техн. физики. 2014. Т. 40, № 12. С. 11–18.

*Статья поступила в редакцию 15 сентября 2016 г.,
после переработки — 20 сентября 2017 г.*