

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСПАРЕНИЯ ПОДВЕШЕННЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ

© 2021 г. В. И. Терехов¹, Н. Е. Шишкин¹, *

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 6300906, Россия

*e-mail: shishkin@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.

После доработки 03.06.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Представлены результаты экспериментального исследования скорости испарения подвешенных капель как чистой воды, так и содержащей ≈ 1.5 мас. % поверхностно-активного вещества – додецилсульфата натрия. Испарение происходило в конвективном потоке сухого воздуха при вариации его скорости в диапазоне $U_0 = 1\text{--}5$ м/с и температуры $T_0 = 20\text{--}80^\circ\text{C}$. Плотность потока массы с поверхности капель при наличии поверхностно-активного вещества была в 2–3 раза меньше по сравнению с чистой водой. Для капель, обтекаемых потоком сухого воздуха, изменение их диаметра можно описать комплексом критериев подобия и построить обобщенную линейную эмпирическую зависимость скорости испарения от термодинамических параметров.

DOI: 10.31857/S002329122006018X

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к процессам испарения жидких пленок и капель, содержащих поверхностно-активное вещество (ПАВ), вызван возможностью изменять с его помощью условия на межфазной границе и, таким образом, воздействовать на теплообмен.

К настоящему времени опубликовано большое число как экспериментальных, так и расчетных работ, посвященных изучению влияния ПАВ на процессы теплообмена в различных условиях. Так, в стекающих пленках жидкости эффекты воздействия ПАВ могут быть различными, начиная с сильной интенсификации теплообмена [1], до отсутствия влияния или даже подавления этого процесса [2]. Объясняется это взаимным влиянием большого числа факторов, таких как поверхностное натяжение и его зависимость от температуры, растворимость ПАВ в жидкости, его концентрация и др.

Еще более сложная картина наблюдается при кипении больших объемов жидкости, содержащей ПАВ [3–5]. Эффекты интенсификации теплообмена могут быть значительными и достигать порядка величины, однако обобщить экспериментальные данные не представляется возможным в силу многофакторности процесса и отсутствия полной и достоверной информации о механизмах обменных процессов. Тем не менее, в

последнее время получили развитие работы по активному управлению процессом кипения таких жидкостей путем электростатической адсорбции/десорбции ионогенных ПАВ на заряженной межфазной поверхности жидкость/твердое тело [4]. Имеются и иные возможности воздействия на теплообмен путем модификации поверхностей нагрева с учетом особенностей конкретных ПАВ.

Самостоятельный интерес представляет изучение процесса кипения одиночных капель, содержащих ПАВ, на нагретых поверхностях [6]. Эта задача имеет непосредственное отношение к проблеме интенсификации теплообмена при охлаждении поверхностей с помощью спреев, привлекающей в последнее время большое внимание [7, 8]. Кроме указанных факторов большое влияние в этом случае оказывает поведение угла смачивания, величина которого сильно зависит от свойств и концентрации ПАВ [9, 10] и поверхностного натяжения, знание которого принципиально важно при решении данной задачи. Экспериментальному и теоретическому определению величины поверхностного натяжения посвящено большое число исследований применительно как к коллоидным растворам [11], так и к каплям при наличии ПАВ [12, 13]. Снижение поверхностного натяжения приводит к существенной деформации капли и более раннему ее распа-

ду [14], а также к генерации вихревых структур внутри капли [15].

Существенное влияние добавки ПАВ могут оказывать на процессы адсорбции. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные [16] по неизотермической адсорбции паров воды бромидом лития при наличии малых добавок ПАВ. В работе [17] численно изучался механизм интенсификации адсорбции водяного пара на бромиде лития с учетом большого спектра воздействующих факторов. По мнению авторов, одним из определяющих является эффект Марангони, хотя этот механизм до конца не выяснен.

Большое влияние на процесс тепломассопереноса на межфазной границе газ–жидкость при наличии ПАВ может оказывать также уровень внешней турбулентности газовой фазы, о чем свидетельствуют данные экспериментальной работы [18]. Кроме того, по данным [19, 20] материал поверхности и степень ее шероховатости могут внести заметные изменения в величину угла смачивания и соответственно в интенсивность обменных процессов между жидкостью и стенкой.

Определяющий вклад в энергообмен на межфазной границе дают процессы испарения жидкости. Поэтому их интенсификация играет ключевую роль в повышении эффективности большого числа энерготехнологических процессов и стимулирует тем самым более глубокие исследования.

Эффект снижения скорости испарения слоя воды, покрытого пленками различных ПАВ, обнаружен давно [21, 22]. Теория этого явления была впервые предложена в работе [21], где полагалось, что наличие монослоя ПАВ на поверхности воды создает дополнительное сопротивление испарению воды. В дальнейшем модель монослоя совершенствовалась с учетом двух стадий процесса испарения: преодоление слоя молекулами воды и ее последующего испарения [23, 24].

В то же время, в литературе имеются данные, свидетельствующие о противоположном эффекте воздействия ПАВ на интенсивность испарения. Так, по данным работы [11] для капель воды при добавлении поливинилпирролидона скорость испарения возрастает, что вызвано изменением поверхностного натяжения.

Величина поверхностного натяжения может играть определяющую роль в процессе испарения как лежащих на поверхности, так и подвешенных капель. Ее значение зависит от многих факторов, таких как материал ПАВ и его концентрация, температура жидкой фазы и ее состав и др. Такой широкий спектр факторов, влияющих на поверхностное натяжение, может привести к сильному изменению скорости испарения капель как в сторону ее увеличения, так и уменьшения. Об этом

свидетельствуют полученные к настоящему времени экспериментальные данные [10, 25–28].

Несмотря на обширные исследования скорости испарения капель жидкостей, содержащих различные ПАВ, физика процесса во многом остается неясной. Можно отметить также отсутствие строгих моделей и теоретических подходов, что соответственно сдерживает создание физически обоснованных методов обобщения экспериментальных данных по скорости парообразования жидкостей сложного состава. Поэтому проведение новых систематических экспериментальных исследований и попытки их обобщения являются важным этапом в решении этой сложной проблемы.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию скорости испарения подвешенных капель жидкости, представляющей собой раствор анионного ПАВ, додецилсульфата натрия, в воде, при вариации параметров окружающего воздуха.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И УСЛОВИЯ ОПЫТОВ

Экспериментальное исследование испарения капель воды с ПАВ было проведено на установке, схематически показанной на рис. 1. Поток практически сухого воздуха с относительной влажностью менее 2% подавался со скоростью 1–5 м/с, степень турбулентности потока составляла примерно 5.5%, его температура изменялась в диапазоне 20–100°C. Чтобы компенсировать силу тяжести подвешенной капли и избежать ее срыва с нити, поток воздуха направлялся вертикально снизу вверх.

Жидкости с помощью шприца наносились на кончик асбестовой нити, размер которой не превышал 250 мкм, что существенно минимизировало приток тепла к объекту исследования, и по данным работы [30] он не превышал 8%. Начальный диаметр капли был равен примерно 2 мм. В качестве ПАВ служил, как уже сказано выше, додецилсульфат натрия ($C_{12}H_{25}OSO_3Na$), который относится к анионным ПАВ [30]. Он нетоксичен, используется в зубных пастах, пищевой промышленности и в моющих растворах, хороший смачиватель и пенообразователь. В экспериментах использовали раствор ПАВ в дистиллированной воде концентрацией 5×10^{-3} моль/л, что соответствовало 0.15 мас. %.

Измерения температуры поверхности капель как чистой воды, так и содержащей ПАВ, проведены с помощью тепловизионной камеры Thermo Tracer TH7102MV с неопределенностью 0.1°C. С использованием микротермографической насадки производились измерения размера (диаметра) капель с точностью около 0.07 мм и его изменение во времени. Это позволяло определять

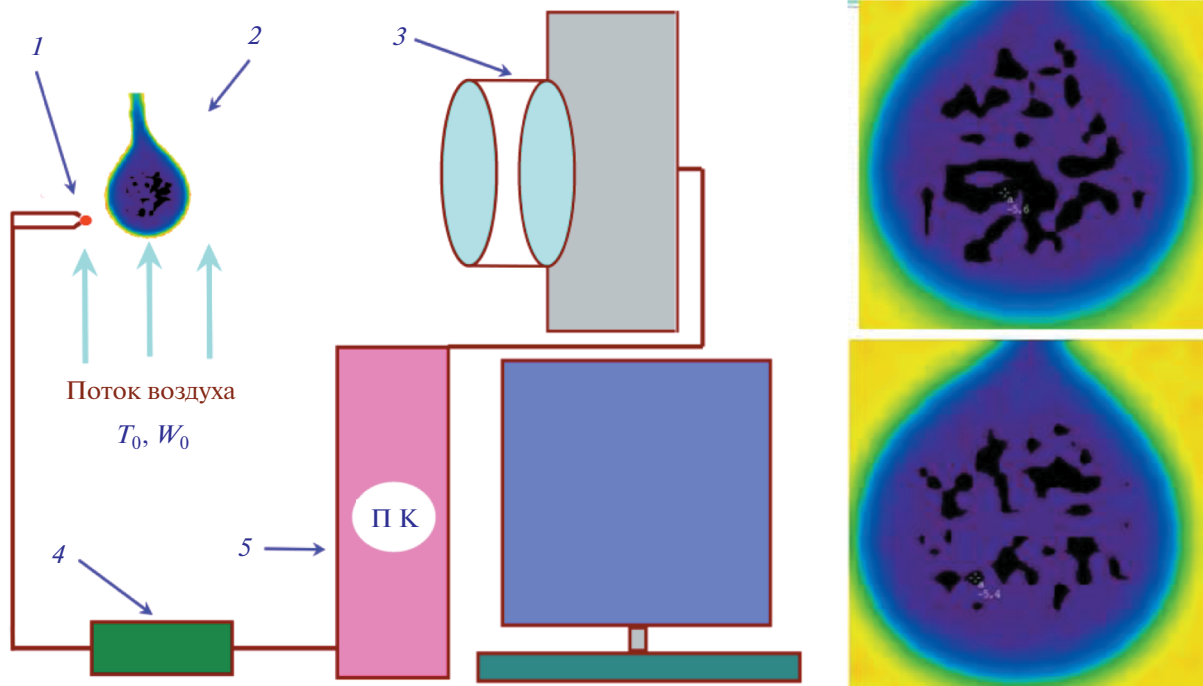


Рис. 1. Схема аэродинамической установки: 1 – термопара, 2 – подвешенная капля жидкости, 3 – тепловизор с микронасадкой, 4 – блок оцифровки и сбора сигналов термопары, 5 – персональный компьютер. Справа – вид каплей.

изменение массы капли в ходе испарения, величины массовых и тепловых потоков, а также критериев конвективного теплообмена. Более подробное описание методики эксперимента и погрешностей измерения представлено в работах [31, 32].

2. ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ

Измерения показали, что при испарении каплей различных чистых жидкостей, а также при наличии в них ПАВ, температура на поверхности каплей была неравномерной и не зависела от скорости обтекающей среды. Для каждого тепловизионного снимка строились гистограммы распределения температуры. Фиксировались значения минимальной, средней и максимальной температуры на поверхности капли. В работе анализировались минимальные значения температур поверхности каплей.

Изменение во времени температуры поверхности испаряющихся каплей чистой воды и содержащей ПАВ показано на рис. 2. При обтекании каплей воздухом комнатной температуры (рис. 2а) для каплей чистой воды температура поверхности быстро стабилизируется и сохраняется с течением времени вблизи значения, отвечающего режиму адиабатического испарения, когда подводимая конвекцией к капле теплота полно-

стью расходуется на фазовый переход. При наличии в капле додецилсульфата натрия ее температура в начальный период близка к температуре чистой жидкости, различие составляет порядка 1 градуса. По мере испарения капли с ПАВ температура ее поверхности монотонно возрастает и разница по сравнению с каплей чистой воды становится существенной. Можно предположить, что в процессе испарения капли концентрация ПАВ на поверхности возрастает, что приводит к замедлению испарения жидкости, и, как следствие, происходит подъем температуры.

Совершенно иначе ведет себя температура поверхности капли при обтекании ее воздухом повышенной температуры. Это видно на рис. 2б, где представлены результаты опытов при $T_0 \approx 76^\circ\text{C}$. В этом случае по истечении начального этапа охлаждения капли влияние ПАВ на распределение температуры поверхности практически исчезает, что может быть обусловлено разрушением адсорбционного слоя ПАВ по мере возрастания температуры жидкости.

3. ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ, СОДЕРЖАЩИХ ПАВ

Интенсивность испарения капли определялась по уменьшению с течением времени ее диаметра. На первом этапе изучалось испарение каплей чистой воды. Результаты измерений, пред-

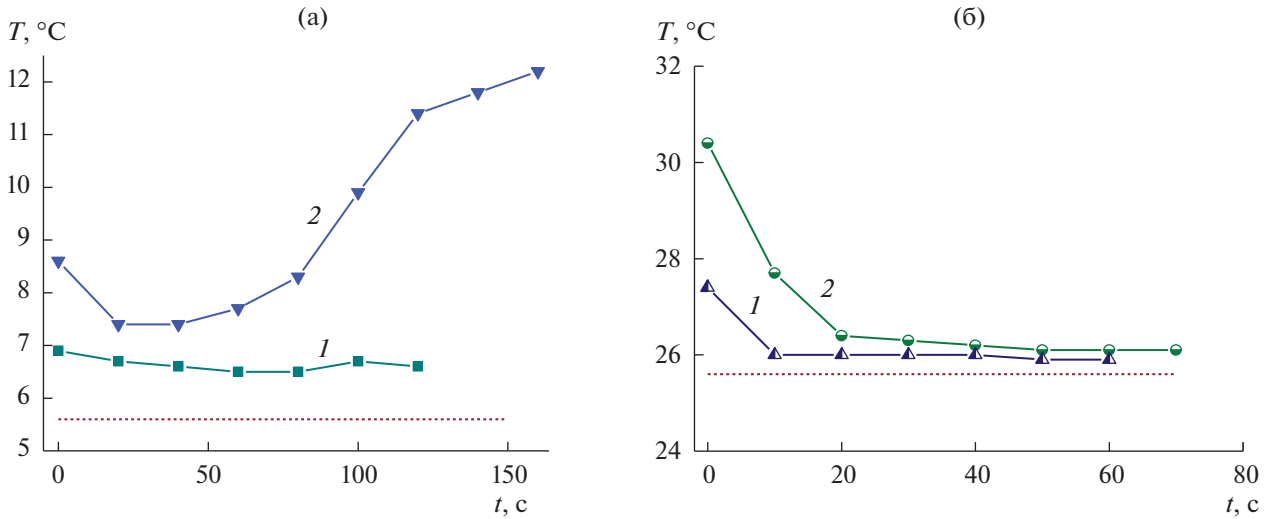


Рис. 2. Температура поверхности капли как функция времени ее испарения. (а) $T_0 = 19.8^\circ\text{C}$, $V_0 = 3.2$ м/с; (б) $T_0 = 76.4^\circ\text{C}$, $V_0 = 3.8$ м/с. 1 – Чистая вода, 2 – вода + 0.15 мас. % ПАВ. Пунктиром показана температура адиабатического испарения.

ставленные на рис. 3, можно условно разбить на две группы с сильно различающимися значениями температуры потока воздуха: низкой, $T_0 \approx 20^\circ\text{C}$, и высокой, $T_0 \approx 80^\circ\text{C}$. Видно, что различие в значениях начального диаметра и скорости потока (в исследованных диапазонах этих параметров) не так значительно сказывается, как температура обтекающего потока.

С увеличением температуры, как и следовало ожидать, скорость испарения возрастает. Аналогичная картина наблюдалась и для капель, содержащих ПАВ (рис. 4). В этом случае начальный

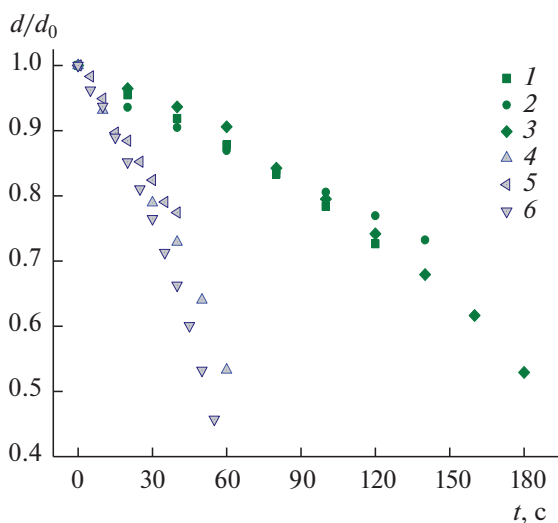


Рис. 3. Изменение во времени диаметра капель воды, испаряющихся при разной температуре воздуха. 1 – 3 – $T_0 = 19.8^\circ\text{C}$, $V_0 \approx 3.1, 3.2$ и 4.3 м/с; 4–6 – $T_0 \approx 80^\circ\text{C}$, $V_0 = 4.3$ м/с; $d_0 \sim 2.0$ – 2.3 мм.

размер капель и скорость обдувающего потока также вызвали незначительный по сравнению с температурой разброс экспериментальных данных.

Прямое сопоставление скорости испарения капель чистой воды и содержащей ПАВ дано на рис. 5 для практически идентичных условий проведения экспериментов. Можно отметить, что капли раствора ПАВ испаряются гораздо медленнее, и различие во времени испарения при данных условиях достигает двух раз.

Более наглядно о величине и характере скорости испарения капель можно судить по значению среднего по поверхности поперечного потока массы на межфазной границе. Эта величина

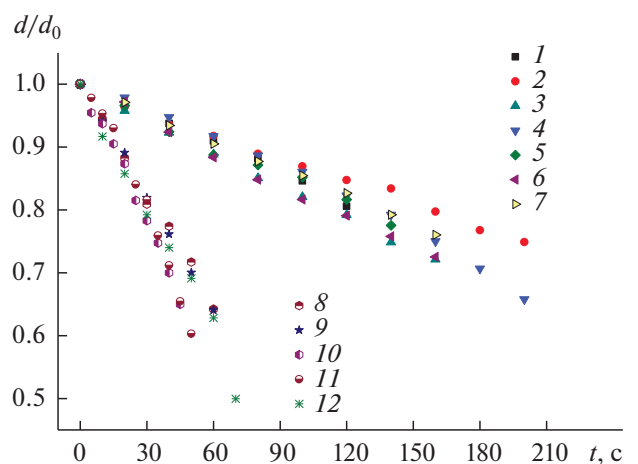


Рис. 4. Влияние начальных параметров на уменьшение во времени диаметра капель воды, содержащей ПАВ. 1–7 – $T_0 = 19.8^\circ\text{C}$, $d_0 \approx 2.0$ мм, $V_0 = 3.1$ – 4.2 м/с; 8–12 – $T_0 \approx 80^\circ\text{C}$, $d_0 \approx 1.9$ мм, $V_0 = 3.2$ – 4.5 м/с.

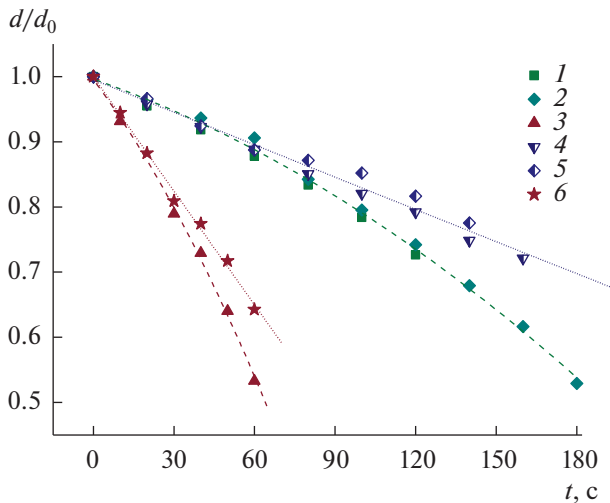


Рис. 5. Влияние ПАВ на уменьшение диаметра капель воды, испаряющихся при разной температуре воздуха: 1–3 – чистая вода, 4–6 – с добавлением ПАВ. $T_0 \approx 19.8^\circ\text{C}$ (1, 2, 4, 5) и $\approx 76^\circ\text{C}$ (3, 6); $d_0 \approx 2.0$ мм.

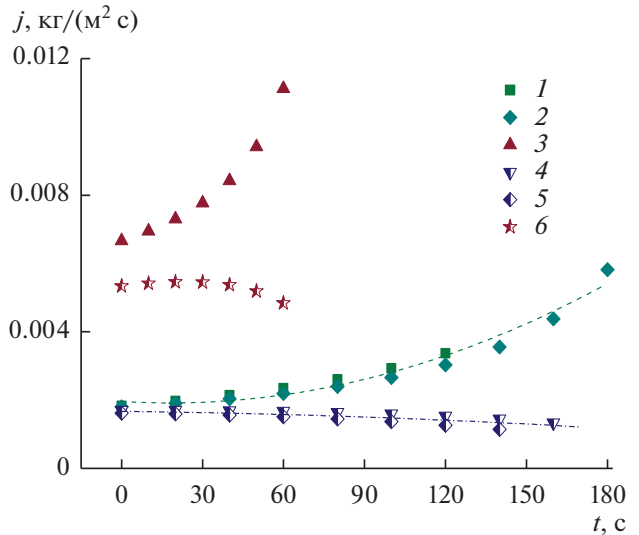


Рис. 6. Интенсивность испарения с поверхности капель чистой воды (1–3) и содержащей ПАВ (4–6). Обозначения соответствуют принятым на рис. 5.

определялась из измерений размера капли с последующим расчетом ее объема V и площади поверхности S . Плотность жидкости ρ рассчитывали исходя из измерений средней температуры капли. В итоге поперечный поток массы (кг/(м² с)) на межфазной границе определялся как

$$j = \frac{\rho dV}{S dt}.$$

По найденной величине j в дальнейшем рассчитывалась плотность теплового потока за счет испарения капли, а также известные критерии теории тепломассообмена.

Изменение интенсивности поперечного потока массы в процессе испарения капли демонстрирует рис. 6. Здесь сопоставлены экспериментальные данные для чистой воды, а также содержащей 0.15 мас. % ПАВ при двух заметно различающихся значениях температуры набегающего воздуха.

Отметим отличительные особенности поведения j при испарении капель воды в отсутствие и при наличии ПАВ.

Для капель чистой воды величина j значительно возрастает по мере испарения и уменьшения размера капли. Подобная картина поведения потока массы на испаряющейся поверхности отмечалась и ранее в работе [32]. Для капель с ПАВ величина j , наоборот, заметно снижается, что приводит к замедлению процесса испарения. Важно, что подобная тенденция наблюдается при различной температуре воздуха с той лишь разницей, что при высоких значениях температуры отличие в значениях j становится более ярко выраженным. Принципиальным является также и тот

факт, что поперечный поток вещества, несмотря на малое содержание в каплях ПАВ, значительно (в два и более раз) уменьшается по сравнению с испарением чистой воды. Это говорит о сильной блокировке испарения жидкости слоем ПАВ, концентрация которого быстро возрастает по мере уменьшения диаметра капли.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ОБОБЩЕНИЕ

Обобщение опытных данных по скорости испарения капель жидкости производилось с использованием методики, изложенной в работах [30, 32]. Если в процессе нагрева и испарении капли преобладает конвективный перенос теплоты, когда число Рейнольдса $Re \gg 0$, то из уравнения сохранения энергии на межфазной поверхности можно получить следующее соотношение:

$$(d/d_0)^{3/2} = 1 - A \frac{Re_0^{0.5} Fo}{Ku}, \quad (1)$$

где $Re_0 = U_0 d_0 / \nu$ – число Рейнольдса, $Fo = ta_0 / d_0^2$ – число Фурье, $Ku = r / [c_{pr}(T_0 - T_s)]$ – критерий фазового превращения Кутателадзе, r и c_{pr} – скрытая теплота парообразования и теплоемкость газа, а T_s и T_0 – температура парогазовой смеси на поверхности капли (линия насыщения) и в окружающем потоке воздуха соответственно. Для условий проведенных опытов число Рейнольдса изменялось в пределах $Re = 100-500$. Коэффициент A определяли путем аппроксимации результатов измерений в обобщенных координатах.

Результаты обобщения экспериментальных данных об испарении капель чистой воды в ука-

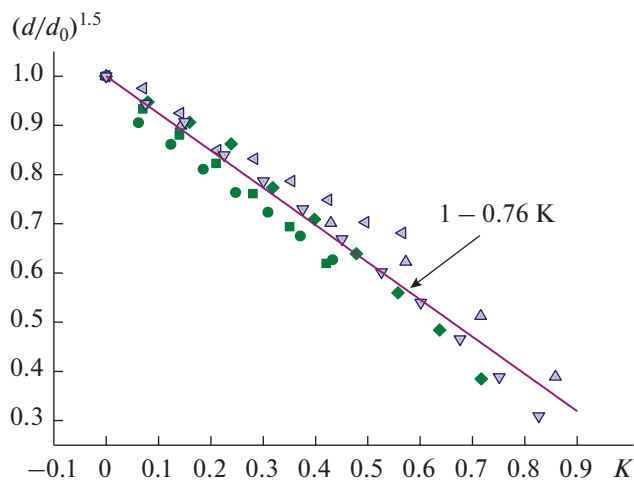


Рис. 7. Обобщение опытных данных по испарению каплей воды. Условия экспериментов и их обозначения соответствуют данным рис. 3.

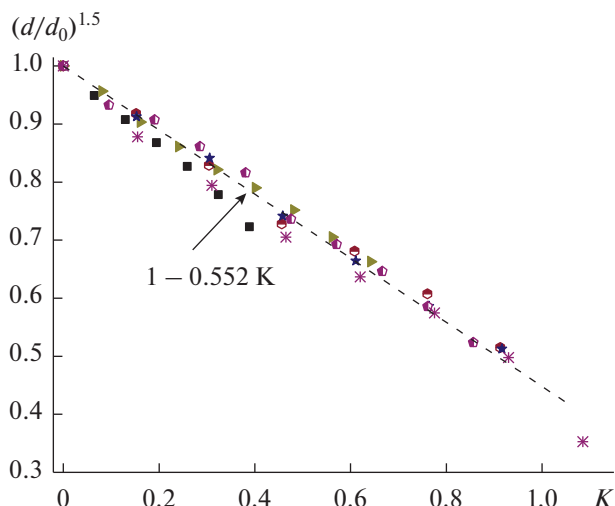


Рис. 8. Обобщение опытных данных по испарению каплей воды, содержащей ПАВ. Обозначения соответствуют принятым на рис. 4.

занных координатах представлены на рис. 7. По оси абсцисс здесь отложен критериальный комплекс, следующий из правой части соотношения (1):

$$K = \frac{Re_0^{0.5} Fo}{Ku} \quad (2)$$

Видно, что данные, полученные при различном начальном размере каплей, а также при вариациях скорости и температуры воздуха, могут быть обобщены и описаны линейным соотношением (1) с коэффициентом $A = 0.76$, близким к теоретическому значению.

Подобным образом ведут себя и капли, содержащие ПАВ. Этот вывод следует из данных рис. 8, где представлены результаты исследования испарения подвешенных каплей, для которых первичные данные изображены на рис. 4. Все теплофизические свойства при расчете критериев, входящих в соотношение (2), принимались теми же, что и для чистой воды.

Можно отметить, что и в данном случае экспериментальные данные можно обобщить и описать линейной эмпирической зависимостью с той лишь разницей, что коэффициент пропорциональности в ней $A = 0.552$ заметно меньше, чем при испарении каплей чистой воды. Это говорит о том, что небольшая добавка (0.15%) додецилсульфата натрия заметно снижает скорость испарения каплей воды в потоке сухого воздуха.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное экспериментальное исследование показало, что при использовании в качестве ПАВ додецилсульфата натрия происходит значи-

тельное снижение интенсивности испарения подвешенных каплей воды.

Температура поверхности каплей, содержащих ПАВ, при обдуве воздухом комнатной температуры возрастает по сравнению с температурой каплей чистой жидкости, что обусловлено ростом концентрации ПАВ по мере уменьшения объема капли в процессе испарения. По мере повышения температуры воздушного потока влияние ПАВ на температуру поверхности капли ослабляется.

Массообмен каплей, находящихся в потоке сухого воздуха, можно описать критериальными зависимостями как в случае чистой воды, так и воды, содержащей ПАВ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН по программе АААА-А17-117030310010-9.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shah B.H., Darby R.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 1973. V. 16. P. 1889.
2. *He F., Li J., Wang J., Wang L., Wang L.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 88. P. 406.
3. *Yang Y.M., Maa J.R.* // Chem. Eng. Res. Des. 2001. V. 79. P. 409.
4. *Cho H.J., Mizerak J.P., Wang E.N.* // Nat. Commun. 2015. V. 6. 8599.
5. *Elghanam R.I., El Fawal M.M., Aziz R.A., Skr M.H., Khalifa A.H.* // Ain Shams Eng. J. 2011. V. 2. P. 195.

6. *Qiao Y.M., Chandra S.* // Proc. R. Soc. London. A. 1997. V. 453. P. 673.
7. *Zhang W.-W., Li Y.-Y., Long W.-J., Cheng W.-L.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 126B. P. 363.
8. *Liu N., Yu Z., Liang Y., Zhang H.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 144. 118593.
9. *Gokhale S.J., Plawsky J.L., Wayner P.C.* // Langmuir. 2005. V. 21. P. 8188.
10. *Semenov S., Trybala A., Agogo H., Kovalchuk N., Ortega F., Rubio R.G., Starov V.M., Velarde M.G.* // Langmuir. 2013. V. 29. P. 10028.
11. *Chen R.-H., Phuoc T.X., Martello D.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. V. 53. P. 3677.
12. *Lunkenheimer K., Lind A., Jost M.* // J. Phys. Chem. B. 2003. V. 107. P. 7527.
13. *Aytouna M., Bartolo D., Wegdam G., Bonn D., Rafai S.* // Exp. Fluids. 2010. V. 48. P. 49.
14. *Stone H.A., Leal L.G.* // J. Fluid Mech. 1990. V. 220. P. 161.
15. *Saylor J.R., Grizzard N.K.* // Exp. Fluids. 2004. V. 36. P. 783.
16. *Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А.* // ПМТФ. 2004. Т. 45. С. 156.
17. *Daiguji H., Hihara E., Saito T.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. V. 40. P. 1743.
18. *McKenna S.P., McGillis W.R.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 539.
19. *Svitova T., Hill R.M., Radke C.J.* // Colloids Surf. A. 2001. V. 183–185. P. 607.
20. *Doganci M.D., Sesli B., Uyar H., Erbil Y.* // J. Colloid Interface Sci. 2011. V. 362. P. 524.
21. *Langmuir I., Schaefer V.J.* // J. Franklin Inst. 1943. V. 235. P. 119.
22. *Bradley R.S.* // J. Colloid Sci. 1955. V. 10. Is. 6. P. 571.
23. *Дерягин Б.В., Баканов С.П., Кургин Ю.С.* // ДАН. 1960. Т. 135. С. 1417.
24. *Дерягин Б.В., Кургин Ю.С.* // ДАН. 1964. Т. 155. С. 644.
25. *Sadd P.A., Lamb J.A., Clift R.* // Chem. Eng. Sci. 1992. V. 47. P. 4415.
26. *Hashem M.A.* // Alexandria Eng. J. 2005. V. 44. P. 477.
27. *Mekasut L., Molinier J., Angelino H.* // Chem. Eng. Sci. 1978. V. 33. P. 821.
28. *Agogo H., Semenov S., Ortega F., Rubio R.G., Starov V.M., Velarde M.G.* // Prog. Colloid Polym. Sci. 2012. V. 139. P. 1.
29. *Бочкарева Е.М., Лей М.-К., Терехов В.В., Терехов В.И.* // Инж.-физ. журн. 2019. Т. 92. С. 2208.
30. Поверхностно-активные вещества и моющие средства. Справочник / Под ред. Абрамзона А.А. М.: Гиперокс, 1993.
31. *Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч.* // Инж.-физ. журн. 2010. Т. 83. С. 829.
32. *Терехов В.И., Шишкин Н.Е.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 1. С. 51.