УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО - АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ИСПАРЕНИЕ ВОДЯНЫХ КАПЕЛЬ

Терехов В.И.[1], Шишкин Н.Е.[1], Ли Х.-К.[2]

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2]*Национальная лаборатория по многофазным потокам Сианьского университета, Сиань, Китайская народная республика*

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-08-91156 - ГФЕН-а).

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование испарения капель воды, содержащие поверхностно- активное вещество (ПАВ) - додецилсульфат натрия. Начальное массовое содержание ПАВ не превышало ~ 0,15%. Капли чистой воды и с ПАВ испарялись в потоке сухого воздуха в диапазоне температур T_0 = ~ (20 ÷ 90)0С и скорости V_O ~ 2 ÷ 5 м/с. Начальный диаметр капель был равен d_0 ~2 мм, при этом число Рейнольдса составляло Re = 500 ÷ 2000.

Опытное исследование скорости испарения капли и температуры ее поверхности, проведенные с помощью инфракрасного микроскопа, показали, что добавление ПАВ в базовую жидкость (вода) оказывет существенное влияние как на характер изменения температуры испаряющихся капель по времени, так и на закономерностях тепло - и массопереноса. Повышение температуры воздуха приводит к ослаблению влияния ПАВ на скорость испарения.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к процессам испарения жидких пленок и капель, содержащих поверхностно-активное вещество (ПАВ), вызван возможностью управления силами поверхностного натяжения на межфазовой границе и, таким образом, воздействовать на тепломассообмен.

По мнению авторов [1], влияние добавки ПАВ на рост коэффициентов теплоотдачи при стекании жидких пленок по вертикальной стенке связано с пенообразованием, а не с поверхностным натяжением. Для капель жидкости ситуация более сложная по сравнению с пленочным. Дело в том, что размер капли в процессе испарения уменьшается, приводя к изменению характера циркуляционного течения внутри капли, ее состава и поверхностного натяжения. При этом на поверхности капли может формироваться монослой нерастворимых веществ из состава ПАВ, либо адсорбируемых из окружающего газа. Это отмечено в серии работ [2-7], результаты которых экспериментально и теоретически свидетельствуют о значительном снижении скорости испарения по сравнению с чистой жидкостью. Качественно по иному изменяется во времени температура поверхности капли с добавкой ПАВ [6,7].

Большое влияние на закономерности тепло массопереноса оказывает состав ПАВ, а также температура газа, в который происходит испарение капель. Так по данным работы [8] для капель воды при добавлении поливидона (PVP) происходит интенсификация тепломассообмена и скорости испарения. Этот эффект авторы объясняют прежде всего изменением поверхностного натяжения капель [9]. Существенное значение на скорость испарения оказывает и концентрация ПАВ, о чем наглядно свидетельствует большое число сценариев развития массообменных процессов при вариации состава ПАВ [6].

Несмотря на давнюю историю и прикладную значимость задачи, исследования в данном направлении далеки от своего завершения. В настоящей работе представлены результаты опытного изучения процесса испарения капель с добавкой ПАВ (додецилсульфат натрия) в потоке сухого воздуха при вариации его температуры и скорости.

© Терехов В.И., Шишкин Н.Е., Ли Х.-К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Опыты были проведены на аэродинамическом стенде с нагревом воздуха до 100ºС и практически с нулевой влажностью ($\varphi < 1 \div 2$ %). Исследуемые капли подвешивались на выходе воздушного канала, скорость обдува составляла $V_o = 2 \div 6$ м/с. Чтобы несколько скомпенсировать силу тяжести и избежать срыва капли с нити, поток направлялся вертикально снизу вверх. Начальный диаметр капли был равен ~ 2 мм.

Жидкости с помощью шприца выдавливались на кончик асбестовой нити, при этом размер нити не превышал 25 мкм, что существенно минимизировало кондуктивный теплоприток к объекту исследования. В качестве добавки поверхностно-активного вещества служил додецилсульфат натрия, называемый также лаурилсульфат натрия, который относится к классу анионных ПАВ [10]. Его химическая формула $C_{12}H_{25}OSO_3$- Na^+. Он нетоксичен, используется в зубных пастах, пищевой промышленности и моющих растворах. Данный ПАВ является хорошим смачивателем и пенообразователем. Для опытов использовался раствор ПАВа в дистиллированной воде при его массовой концентрации 0.15 %. В отдельных опытах при нагреве воздушной струи подвешивалась капля с концентрацией ПАВ 0.07 %.

В экспериментах фиксировалась с помощью термографической камеры Thermo Tracer TH7102MV температура поверхности и размер капель при испарении. Для всех термографических снимков определялись гистограммы температуры поверхности изменяющейся во времени, которые позволили фиксировать минимальные, средние и максимальные её значения. По контурам капель находилось изменение диаметра испаряющихся капель. Более подробное описание методики эксперимента и погрешностей измерения представлено в работах [11,12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ температуры поверхности капель по полученным термографическим гистограммам показал значительное влияние ПАВ на характер её изменения в процессе испарения.

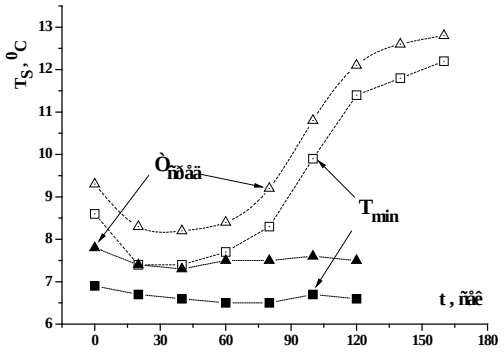

Рис.1 Температура поверхности испаряющихся капель - темные точки – чистая вода, светлые – вода и 0.15% ПАВ; T_c = 19.8 ºС, V_c = 3.2 м/с.

Если для капель чистой воды средняя температура и вместе с ней её минимальные значения быстро стабилизируются и практически совпадают с величиной при адиабатном испарении жидкости [11], то при наличии ПАВ температура поверхности вначале снижалась, а после достижения минимума она в 1,5 – 2 раза повышалась по сравнению с чистой водой (рис.1). Подобная тенденция изменения температуры по времени при испарении капель с ПАВ наблюдалась и в опытах [6]. Можно предположить, что с увеличением концентрации частиц на поверхности замедляется испарение жидкости и как следствие – подъём температуры.

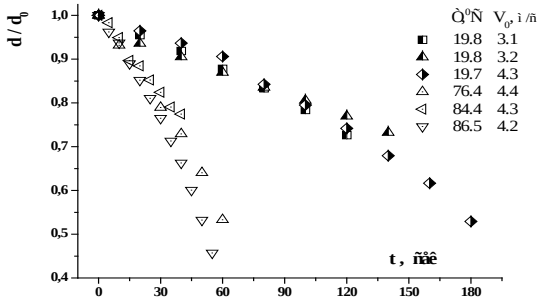

Рис.2 Изменение диаметра испаряющихся капель воды при разных температурах (d_0 ~ 2.0 ÷ 2.3 мм).

Изучение скорости испарения проводилось по уменьшению с течением времени диаметра капель. Результаты измерения для капель чистой воды представлены на рис.2, где указаны их начальные диаметры и параметры воздушного потока.

Эта серия экспериментов была проведена в качестве тестовых и для сопоставительно-

го анализа с результатами опытов испарения капель вожы при наличии ПАВ. Как видно, в исследованных диапазонах, отличие по начальным диаметрам и скоростям струи не так значительно влияет, как температура обтекающей струи. С увеличением температуры потока капли испаряются, как и следовало ожидать, более интенсивно.

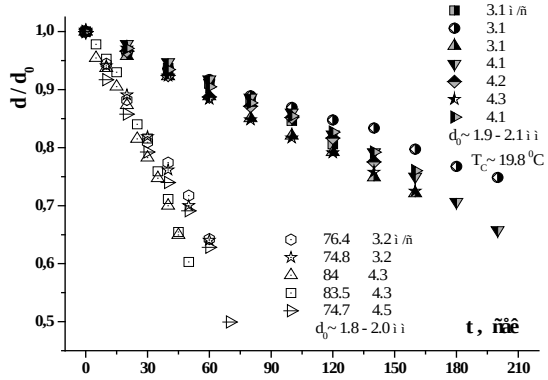

Рис.3 Влияние начальных параметров на скорость изменения диаметра капель с 0.15 % ПАВ.

Аналогичная картина наблюдалась и с каплями, в которые добавлялся ПАВ (рис.3). Здесь

также как для чистой воды (рис.2) вариация размера капель и скорости их обдува слабо влияли на интенсивность испарения и опытные точки группируются в две области, отличающихся температурой потока.

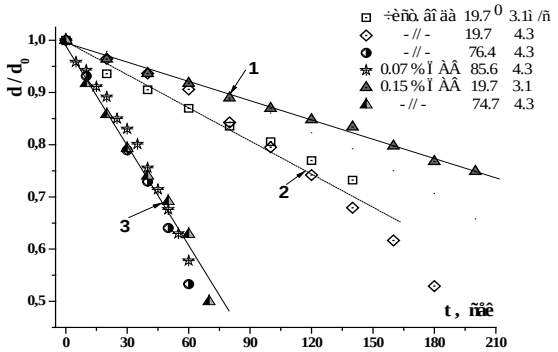

Рис.4 Влияние ПАВ и температуры воздушной струи на изменение диаметра капель.

Прямое сопоставление между опытами с чистой водой и с примесью ПАВ демонстрируется на рис.4, где подобраны опыты с близкими исходными параметрами. Отметим основные особенности поведения опытных данных. При малых температурах газа (~20ºС) наличие ПАВ (линия 1) приводит к снижению скорости испарения по сравнению с чистой жидкостью (линия 2). В то же время, для высокой температуры газа (~80ºС) опытные точки как для чистой воды, так и при наличии ПАВ с различной концентрацией практически совпадают между собой (линия 3). Одной из возможных причин такого поведения скорости испарения может быть деструкция ПАВ с повышением температуры жидкости. Однако это явление требует более глубоких исследований, как тепломассопереноса, так и структурных особенностей поведения ПАВ при различных температурах.

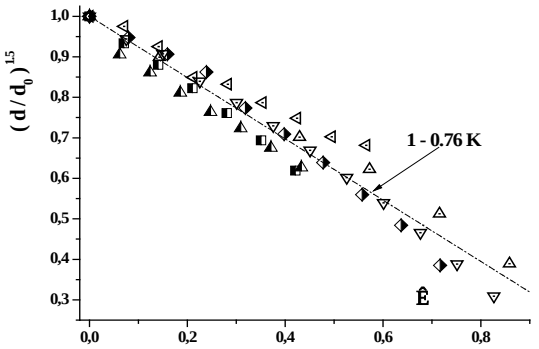

Рис.5 Обобщение опытных данных по испарению капель воды, представленных на рис.2, обозначения те же.

Обобщение опытных данных по скорости испарения капель жидкости производилось с использованием методики, изложенной в работах [11,13]. Из уравнения теплового баланса на поверхности испаряющейся капли, адиабатичности процесса испарения и соотношения для коэффициента теплоотдачи [14]

$$Nu = 2 + 0{,}53 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \qquad (1)$$

с преобладанием конвективного переноса (Re >> 1, в экспериментах Re_0=500 ÷ 2000) можно получить следующую зависимость для изменения диаметра капли по времени

$$(d/d_0)^{3/2} = 1 - A \cdot \frac{Re_0^{0..5} \cdot Fo}{Ku}, \qquad (2)$$

где $Fo = t \cdot a_o / d_0^2$ - число Фурье, $Ku = r/[c_{po}(T_o - T_s)]$ – критерий Кутателадзе, характеризующий фазовый переход на поверхности капли; r и c_{po} – скрытая теплота парообразования и теплоемкость газа, а T_s и T_0 – температура парогазовой смеси на поверхности капли (линия насыще-

ния) и в окружающем потоке воздуха, соответственно.

В отличие от известного квадратичного закона испарения (закон d_2) [15], справедливого для малых значений числа Рейнольдса ($Re_0 \to 0$ и Nu = 2); при больших числах Рейнольдса, как следует из (2), имеет место закон (d/d_0) 3/2.

Результаты обобщения опытных данных об испарении чистой воды (рис.2) приведены на рис.5. Из рисунка следует, что закон “3/2” приводит к хорошему обобщению экспериментальных точек.

Опытные точки, приведенные на рис.5 описываются эмпирической зависимостью

$$(d/d_0)^{3/2} = 1 - 0.76 \cdot K, \qquad (3)$$

при этом коэффициент K имеет значение близкое к расчетной формуле (2) с учетом дополнительного теплопритока к капле через поддерживающую нить, определенного по методике работы [16].

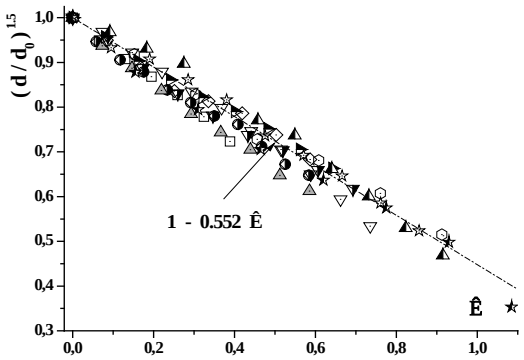

Рис.6 Обобщение опытных данных по испарению жидких капель содержащих ПАВ (обозначения см. на рис.4).

В случае добавки поверхностно-активного вещества скорость испарения капли снижается. Это видно из рис.6, где приведены результаты измерений изменения диаметра капель по времени. Опытные точки в таком представлении имеют тенденцию к обобщению и удовлетворительно описываются линейной корреляционной формулой

$$(d/d_0)^{3/2} = 1 - 0.552 \cdot K \qquad (4)$$

Следует подчеркнуть, что вследствие отсутствия надежных данных по теплофизическим свойствам ПАВ, свойства жидкости капель при наличии ПАВ принимались как дистиллированой воды. Естественно, что такое допущение может привести к качественным изменениям закономерностей тепломассообмена капель и требует отдельного рассмотрения.

Если сравнить данные рис.6 с результатами, полученными для чистой воды (рис.5), или же линейные соотношения (3) и (4), то можно сделать важный вывод о том, что добавление ПАВ приводит к значительному снижению скорости испарения. Уменьшения угла наклона линейных аппроксимаций составляет ~ 35%, что даст в итоге примерно такое же отличие в значениях поперечного потока вещества на поверхности испаряющейся капли, а также кэффициентов тепло -и массоотдачи. Полученные в настоящей работе результаты качественно совпадают с данными работ [6,7], где также было обнаружено уменьшение скорости испарения капель с добавками ПАВ в неподвижной газовой среде.

Анализ современного состояния проблемы гидродинамики и тепломассопереноса капель жидкости при наличии ПАВ и результаты проведенных авторами исследований, свидетельствуют о том, что в ней остается большое число неизученных вопросов. Это относится прежде всего к влиянию ПАВ на циркуляцию жидкости внутри капли, что может привести к принципиальным изменениям характеристик сопряженного тепломассопереноса. Остается важным и практически неисследованным вопрос о влиянии концентрации ПАВ и характера его изменения по времени по мере испарения капель при существенном изменения их объема. Это диктует необходимость проведения дальнейших детальных исследований процессов тепло-массопереноса при испарении капель, содержащих поверхностно-активные вещества, и определения наиболее значимых параметров, влияющих на межфазный тепломассоперенос.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований температуры и скорости испарения капель жидкости при наличии в них поверхностно-активного вещества (ПАВ) додецилсульфат натрия (C12H25OSO3- Na+) при различной концентрации, начальная величина которой была незначительной (не более 0.15 % по массе). Опыты проведены в широком диапазоне температур сухого воздушного потока (T_0 ~ 20 ÷ 100 ºC) и его скорости. Экспери-

ментальные исследования интенсивности испарения капли и температуры ее поверхности, проведенные с помощью инфракрасного микроскопа, показали, что добавление ПАВ в базовую жидкость (дистиллированная вода) оказывает значительное воздействие на тепло - и массоперенос. Наличие ПАВ приводит к существенному снижению скорости испарения, что качественно согласуется с результатами экспериментов работ [6,7] и противоречат исследованиям работы [8]. По мере повышения температуры воздушного потока влияние ПАВ ослабевает и при T0 ~ (75 ÷ 90)ºC перестает сказываться на закономерностях тепло- и массообмена.

Полученные результаты могут послужить основой для постановки в дальнейшем более обширных и детальных исследований при вариации свойств базовой жидкости и ПАВ, их концентраций и температур, для верификации численных моделей расчта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shan B.H., Darby R. The effect of evaporative heat transfer in vertical film flow // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1973. – V. 16. – P. 1889 – 1903.
2. Bradley R.S. The rate of evaporation of micro-drops in the presence of insoluble monolayers // J. Colloid. Sci. – 1955. – V. 10. – P. – 571-575.
3. Дерягин Б.В., Баканов С.П., Кургин Ю.С. О влиянии монослоев на испарение капель // ДАН.- 1960. – Т. 135. – С. 1417- 1420.
4. Борзилов В.А., Клепикова Н.В., Меркулович В.М. Влияние ПАВ на рост и испарение капли // Метеорология и гидрол. 1979. - № 5.– С. 41 -48.
5. Дерягин Б.В., Кургин Ю.С. Нестационарное испарение капли, покрытой адсорбционным слоем // ДАН. - 1964 – Т. 155. – С. 644 – 646.
6. Sadd P.A., Lamb J.A., Clift R. The effect of surfactants on heat and mass transfer to water drops in air // Chemical Engineering Science. – 1992. – V. 47. - No 17/18. – P. 4415-4424.
7. Mohsen A. Hashem. Effect of surfactants on mass transfer coefficients of single liquid drops // Alexandria Engineering Journal. – 2005. – V. 44. – P. 477 – 486.
8. Chen R.-H., Phuoc T. X., Martello D. Effect of nanoparticles on nanofluid droplet evaporation // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 2010. - V.53. - P. 3677 -3682.
9. Chen R.-H., Phuoc T. X., Martello D. // Surface tension of evaporating nanofluid droplets // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 2011. - V.54. - P. 2459 - 2466.
10. Поверхностно - активные вещества и моющие средства. // Справочник под ред. Абрамзона А.А. - Москва. 1993.
11. Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // Инж. физ. журн. - 2010.- №5. - С. 829 - 836.
12. Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Адиабатическое испарение бинарных смесей жидкости на поверхности пористого шара // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. - №2. - С. 253-259.
13. Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование испарения капель нано-жидкости в потоке сухого воздуха // Статья в настоящем номере.
14. Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation from drops // Chem. Eng. Prog. - 1952. - V. 48. - P. 141-146.
15. Spalding D.B. Some fundamentals of combustion. London, Butterworth's.- 1955.
16. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М. Изд. АН СССР. 1958.- С.92.