УДК 532.663

ВЛИЯНИЕ ВДУВА ВОЗДУХА ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ НА ПОРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Низовцев М.И.[1], Стерлягов А.Н.[1], Шлюпиков М.Ю.[2]

[1]Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН
[2]Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Роосия

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РФФИ №15-08-00687

АННОТАЦИЯ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований испарения капель воды на различных пористых поверхностях при вдуве через них воздуха. С применением метода инфракрасной термографии получены данные по изменению средней температуры на поверхности испаряющейся капли с течением времени при различной интенсивности вдува.

ВВЕДЕНИЕ

Тепло- и массоперенос при испарении капель жидкости является актуальной научной проблемой. Исследованиями в этой области занимались выдающиеся ученые XIX и XX века - Максвелл, Ленгмюр, Ландау [1-3]. В настоящее время активно продолжаются работы, связанные с испарением капель на различных поверхностях [4, 5]. Интерес к исследованиям испарения капель жидкости связан и обусловлен разнообразными практическими приложениями, начиная от возможности проведения медицинской диагностики и решения проблем биостабильности белка до выбора оптимальных режимов сушки красителей, разработки современных методов печати для струйных принтеров, создания наноструктур и ряда других направлений.

Процессы тепло- и массопереноса в испаряющейся капли жидкости взаимосвязаны и существенно осложняются влиянием фазовых переходов в нестационарных условиях. Для описания динамики испарения капли кроме уравнения диффузии пара с поверхности и уравнения теплопроводности, целесообразно привлекать уравнение Навье-Стокса для описания гидродинамических потоков в капле. Аналитическое описание данных процессов достаточно сложно, а расчетные методы имеют ограничения, так как не учитывают все многообразие процессов. Для моделирования этих процессов необходимы эффективные нестационарные модели расчета. Это сложная задача, которая в полной мере пока не решена, однако в своих частных аспектах она в последние годы решается некоторыми исследователями [6].

Помимо численного моделирования большое внимание уделяется экспериментальным исследованиям испарения капель жидкости. В большинстве экспериментальных исследований, как правило, с помощью фото и видеоаппаратуры изучается изменение формы, размера, радиуса кривизны капли и т.д. [7, 8]. Об изменении температуры капель в процессе испарения обычно получают информацию из локальных измерений с помощью контактных методов. Данный подход не дает данных о распределении температуры на поверхности и ее изменении с течением времени, что особенно важно, учитывая нестационарность процессов испарения. В последние годы стали активно использоваться современные бесконтактные методы. Однако, ограниченные характеристики используемой тепловизионной аппаратуры не позволили авторам получить детальные данные для более глубокого анализа.

Большинство работ, посвященных испарению капель на поверхности, относятся к исследованиям подвешенных капель жидкости, или лежащих на непроницаемой поверхности. Кроме того в последнее время появились работы по исследованиям испарения капель на микроструктурированных поверхностях [8, 9]. Большой интерес также представляют исследования испарения капель жидкостей на проницаемых поверхностях пористых материалов при вдуве через них газов, что может внести существенные особенности в процессы тепло- и массопереноса. Вдув газа или жидкости через проницаемые пористые стенки в основной поток изучался в том числе для защиты рабочих поверхностей энергетических

© Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Шлюпиков М.Ю.

устройств от воздействия высокотемпературных потоков газа [10]. В данных исследованиях в основном изучалось формирование пристенных газовых завес и не рассматривались вопросы влияния вдува на испарение капель жидкостей на пористых поверхностях. Таким образом, экспериментальные исследования испарения капель жидкостей на поверхностях пористых материалов при вдуве воздуха представляют не только научный, но и практический интерес для различного энергетического оборудования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментальных исследований в Институте теплофизики СО РАН была создана установка для исследования испарения капель жидкости на поверхностях пористых материалов, продуваемых воздухом.

Во время эксперимента воздух, поступающий от компрессора, подводился к рабочему участку установки. При этом вентилем производилась регулировка расхода воздуха, а ротаметром – его измерение. В вертикальном положении над рабочим участком располагалась тепловизионная камера. Сбоку от рабочего участка в горизонтальном положении располагался цифровой микроскоп. Температура воздуха, поступающего от компрессора к рабочему участку, и температура на поверхности пористой пластины измерялись термопарами. Во время экспериментов термогигрометром измерялась температура и влажность окружающего воздуха. Все данные с измерительной аппаратуры поступали на персональный компьютер.

На рис. 1 изображен рабочий участок установки, который представлял собой герметичную камеру с подводом воздуха от компрессора. Герметичность камеры рабочего участка обеспечивалась плотной установкой пластины из исследуемого пористого материала в верхней части камеры. Воздух, подаваемый от компрессора, поступал под пластину и продувался сквозь нее в направлении снизу-вверх. Продуваемая площадь пластины S из пористого материала составляла около 7 см^2. Расход подаваемого воздуха G в экспериментах варьировался от 0 до 2,5 м^3/час. Таким образом, средняя по поверхности пластины скорость воздуха $V = G/S$ на пластине, в эксперименте изменялась от 0 до 1 м/с.

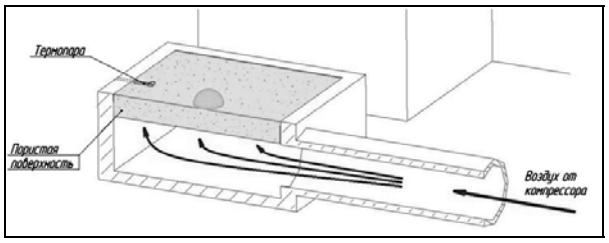

Рис. 1 Рабочий участок экспериментальной установки.

Эксперименты по исследованию испарения капель проводились следующим образом, сначала при включении компрессора через пористую поверхность с помощью вентиля устанавливался поток воздуха фиксированной скорости. После этого сверху на пористую поверхность помещалась капля дистиллированной воды объемом 5 мкл. Капля воды формировалась с помощью капельного дозатора «Thermo Scientific» с точностью 0,1 мкл.

В процессе испарения капли методом инфракрасной термографии в различные моменты времени определялось распределение температуры на поверхности капли. В экспериментах использовалась тепловизионная камера NEC TH 7102WV, позволяющая регистрировать распределение температуры на поверхности капли с точностью 0,1 °С. Измерения проводились с применением микрообъектива TH 71-377, это позволило определять температуру с пространственным разрешением 100 мкм. В целях калибровки и для определения коэффициента излучения поверхности дополнительно выполнялись контактные измерения температуры пористой поверхности термопарой. Кроме того процесс испарения капли воды регистрировался цифровым микроскопом KS-is Digiscope II, что позволяло фиксировать изменение геометрических размеров капли в процессе испарения.

В качестве проницаемого материала для вдува в экспериментах использовались два образца: пористая пластина из меди и пластина из волокнистого полипропилена. Удельный вес пластины из меди составлял 4590 кг/м^3, а пластины из полипропилена – 149 кг/м^3. Пористая пластина из меди имела толщину 3 мм и общую пористость 51% при характерном размере пор 0,1 мм. Поверхность пластины из меди для гидрофобизации смазывалась вакуумным маслом. Пластина из волокнистого полипропилена имела толщину 3 мм и общую пористость 84% при характерном размере пор 1 мм. Гидрофобизация поверхности полипропилена не проводилась.

Эксперименты по испарению капель жидкости проводились в комнатных условиях: при постоянной температуре и влажности воздуха (t = 25,5 °С, φ = 40%). Согласно Id – диаграммы для данных условий эксперимента температура мокрого термометра (адиабатного испарения) t_m = 17,1 °С. Во всех экспериментах использовали капли дистиллированной воды объемом 5 мкл и температурой t = 25,2 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С помощью микрофотосъемки в экспериментах были получены фотографии испаряющихся капель воды. В качестве примера на рис. 2 представлены фотографии капель в начальный момент времени на различных пористых поверхностях без вдува.

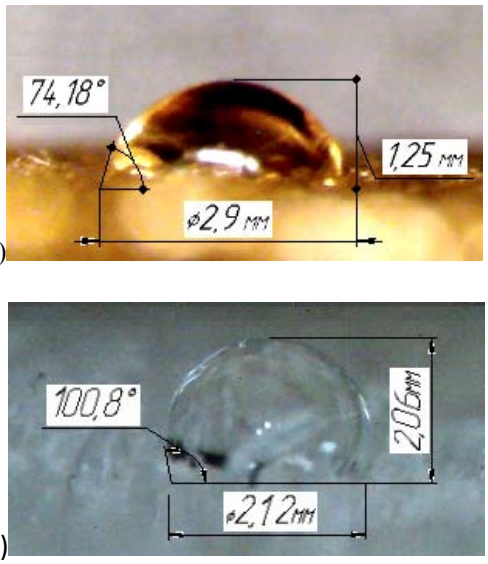

Рис. 2 Микрофотография капли воды в начальный момент времени без вдува: а) пористая пластина из меди, б) пластина из волокнистого полипропилена.

Из рис. 2 следует, что на медной поверхности капля воды из-за лучшей смачиваемости растекалась больше, чем на поверхности полипропилена. В результате на медной пластине диаметр капли был больше, а высота – меньше, чем на поверхности полипропилена. По микрофотографиям был определен объем капель в начальный момент времени. Для рассматриваемых поверхностей он составлял 4,97мкл, и несущественно отличался от начального объема капли 5мкл. Таким образом, капли воды находились на поверхности и практически не проникали внутрь используемых пористых материалов.

С применением метода ИК-термографии был проведен цикл экспериментов по исследованию испарения капель воды на поверхностях пористых материалов, продуваемых воздухом с различной скоростью. В экспериментах с помощью тепловизионной камеры фиксировалось распределение температуры в различные моменты времени. В качестве примера на рис. 3 представлена характерная термограмма поверхности капли на пористой пластине из меди через 1 минуту после начала эксперимента при вдуве воздуха, $V = 1$ м/с.

Из рис. 3 следует, что температура поверхности капли была ниже температуры медной пластины, что обусловлено охлаждением капли вследствие процесса испарения. Распределение температуры на поверхности капли было неравномерное и изменялось с течением времени, что существенно усложняло анализ. Поэтому в качестве количественного критерия была выбрана средняя температура поверхности капли. Так, на представленной термограмме средняя температура поверхности капли составляла 20,1°С.

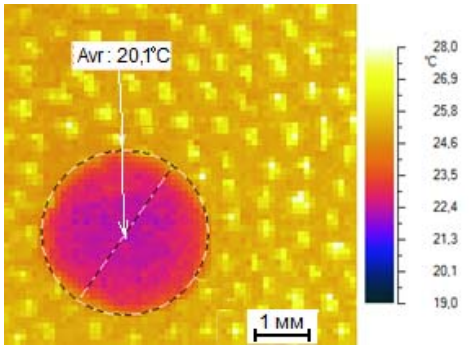

Рис. 3 Температура поверхности капли воды на пластине из пористой меди при вдуве воздуха, $V = 1$ м/с через 1 минуту с начала эксперимента.

На основании выполненных экспериментов были получены зависимости изменения с течением времени средней температуры капли, лежащей на пластине из пористой меди, при различной интенсивности вдува (рис. 4).

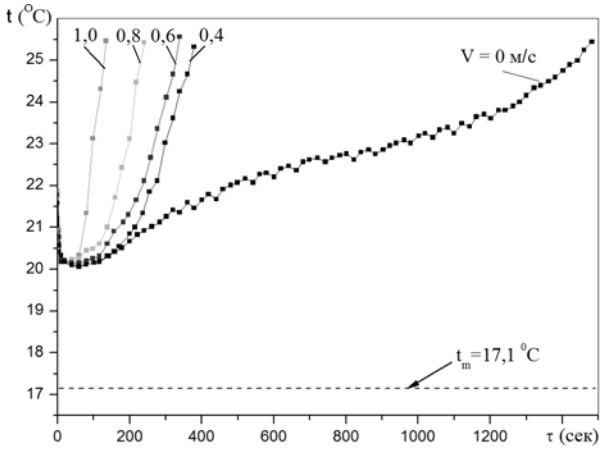

Рис. 4 Изменение средней температуры поверхности капли воды на пластине из пористой меди при различной интенсивности вдува

Были проведены аналогичные эксперименты по испарению капель воды на поверхности пластины из волокнистого полипропилена, продуваемой воздухом. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

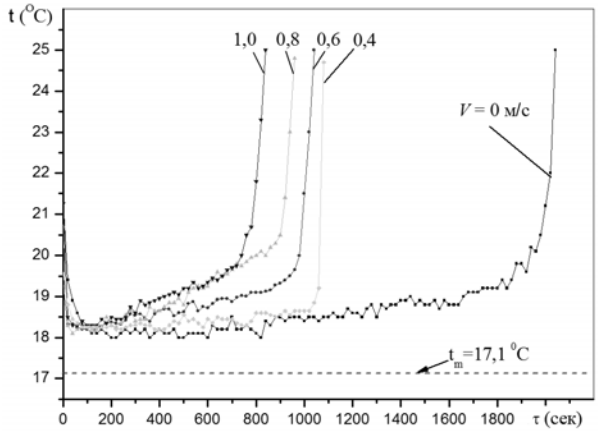

Рис. 5 Изменение средней температуры поверхности капли воды на пластине из волокнистого полипропилена при различной интенсивности вдува

Представленные на рис. 4 и рис. 5. результаты показывают, что в начальный период во всех экспериментах температура капель резко снижалась, это было обусловлено процессами испарения. При этом температура поверхностей капель не достигала температуры адиабатного испарения 17,1 °С, что вероятно было связано с подводом тепла к каплям от поверхности материалов. В дальнейшем при отсутствии вдува наблюдалось постепенное повышение температуры капель до их полного испарения. При наличии вдува наблюдался более быстрый рост температур капель, и существенно снижались времена их испарения, причем, чем больше была скорость потока воздуха – тем меньше было время испарения.

Для анализа изменения температуры поверхности капель с течением времени на различных пористых поверхностях рассмотрим в сравнении полученные данные для различных материалов (рис. 6). Представленные на рисунке 6а. результаты показывают, что без вдува воздуха для капли на медной пористой пластине понижение температуры в начальный период достигало 20 ^{0}C, а для пластины из волокнистого полипропилена – 18 ^{0}C. Такая разница в понижении температур капель, очевидно, связана с тем, что теплопроводность меди существенно больше теплопроводности полипропилена, и поэтому подвод тепла к капле для медной пластины осуществлялся более интенсивно. По этой же причине последующее повышение температуры поверхности капли на пластине из полипропилена происходило более медленно, чем на поверхности пористой меди. Капля на поверхности полипропилена испарялась медленнее (время испарения 2050 с), чем на поверхности медной пористой пластины (время испарения 1480 с.).

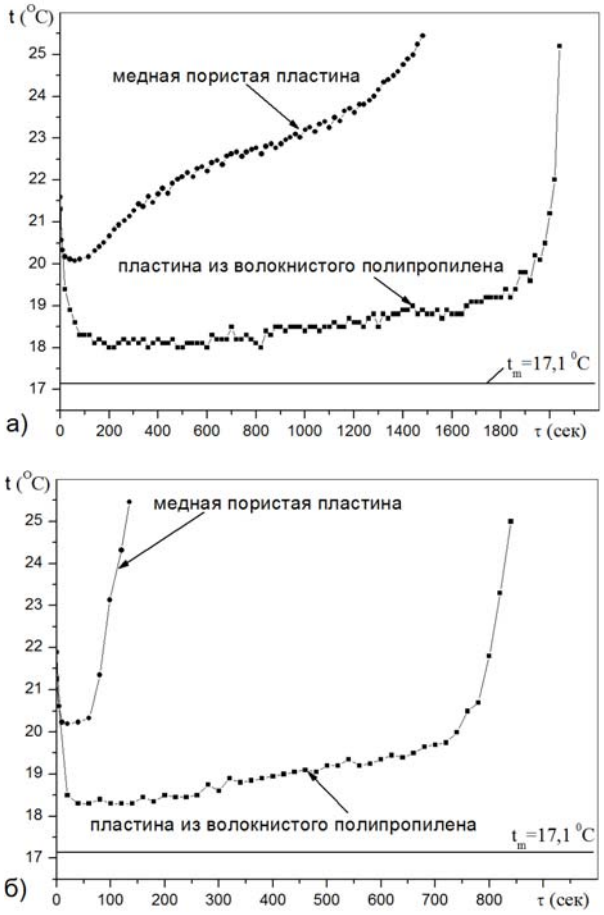

Рис. 6 Изменение средней температуры капли воды на поверхности пористых материалов: а) без вдува, б) при скорости вдува 1м/с.

При скорости вдува V = 1 м/с (рисунок 6б) наблюдалась ситуация аналогичная случаю без вдува. В начальный период температура поверхности капли на медной пластине была выше, чем на пластине из полипропилена и не достигала температуры адиабатного испарения. Можно также отметить, что при наличии вдува капля воды на поверхности полипропилена также как и без вдува испарялась медленнее, чем на поверхности медной пластины. По сравнению со случаем без вдува наблюдалось снижение времени испарения капли, как для поверхности полипропилена (время испарения 840 с.), так и для поверхности медной пластины (время испарения 130 с.). Таким образом, вдув воздуха интенсифицировал процессы испарения капли воды на поверхностях пористых материалов.

ВЫВОДЫ

На экспериментальной установке был выполнен цикл исследований испарения капель воды на поверхностях пористых материалов при вдуве воздуха. Использование бесконтактного метода инфракрасной термографии позволило исследовать эволюцию тепловых полей поверхностей капель при их испарении. С помощью полученных в экспериментах термограмм исследована динамика изменения средней температуры поверхностей капель при испарении на пористых поверхностях при различных скоростях вдува.

В экспериментах обнаружено существенное понижение температуры поверхности капли на начальном периоде испарения, как для пористой медной пластины, так и для пластины из волокнистого полипропилена. Во всех экспериментах наименьшее значение температуры поверхности капли превышало температуру адиабатного испарения, что обусловлено подводом тепла от поверхности материала. Для медной пластины наименьшее значение температуры поверхности капли при испарении было выше, чем для капли на поверхности полипропилена, что обусловлено более высоким коэффициентом теплопроводности меди и соответственно более интенсивным подводом тепла.

Полученные данные показывают, что испарение капель воды на пластине из полипропилена происходит медленнее, чем на медной пластине при одинаковых скоростях продуваемого воздушного потока. При увеличении скорости воздушного потока время испарения капель уменьшалось, как на пористой медной поверхности, так и на поверхности волокнистого полипропилена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maxwell J.C., 1890. Diffusion, Collected scientific papers, Cambridge 2, 625.
2. Langmuir I. The evaporation of small spheres / Phys. Rev. 1918, No. 5, pp. 368-370.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1989. 736 с.

   Landau L.D., Lifshic E.M. Hydrodynamics. M.: Science, 1989. 736 s.
4. Lee C.Y., Zhang B. J., Park J., Kim. K.J. Water droplet evaporation on Cu based hydrophobic surfaces with nano and micro-structures / Int. J. Heat Mass Transf. 2012. 55, pp. 2151-2159.
5. Shin H.D., Choi K.C., Kang T.Y., Lee H.S. Local aggregation characteristics of a nanofluid droplet during evaporation / Int. J. Heat Mass Transf. 2014, 72, pp. 336–344.
6. L.Yu. Barash, T.P. Bigioni, V.M. Vinokur, and L.N. Shchur, Evaporation and fluid dynamics of a sessile drop of capillary size / Phys. Rev. 2009. E 79, 046301.
7. K. Sefiane, L. Tadrist, M. Douglas Experimental study of evaporating water–ethanol mixture sessile drop: influence of concentration / Int. J. Heat Mass Transf. 2003. 46, pp. 4527-4534.
8. Sanchit K. Singh, Dheeraj Pratap, S. Anantha Ramakrishna, Sameer Khandekar Evaporation of Sessile Droplets on Nano-porous Alumina Surfaces / 7th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion Xi'an, China, 2012 pp. 1-9.
9. Choi C.H., Kim C.J. Droplet evaporation of pure water and protein solution on nanostructured superhydrophobic surfaces of varying heights / Langmuir. 2009. 25(13), pp. 7561-7567.
10. Леонтьев А.И., Волчков Э.П., Лебедев В.П. и др. Тепловая защита стенок плазмотронов / Низкотемпературная плазма. Т. 15. Новосибирск: ИТ СО РАН, 1995. 335 с.

    Leont'ev A.I., Volchkov Je.P., Lebedev V.P. i dr. Thermal protection of the walls of the plasmatron / Low-temperature plasma. T. 15. Novosibirsk: IT SO RAN, 1995. 335 s.

© Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Шлюпиков М.Ю.