

УДК 536.423

ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДНОГО РАСТВОРА ЭТАНОЛА

© 2021 г. В. Ю. Бородулин¹, В. Н. Летушко¹, М. И. Низовцев¹, А. Н. Стерлягов¹. *

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090 Россия

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

Поступила в редакцию 17.09.2020 г.

После доработки 16.11.2020 г.

Принята к публикации 19.11.2020 г.

Экспериментально исследовано испарение капель водных растворов этанола разной концентрации при различной относительной влажности окружающего воздуха. С использованием скоростной микрофотосъемки прослежена динамика изменения размеров испаряющихся капель. Установлено, что относительная влажность окружающего воздуха существенно влияет на изменение диаметра капель водных растворов этанола. С использованием инфракрасной термографии исследовано изменение температуры испаряющихся капель. Показано, что уменьшение температуры испаряющихся капель с увеличением концентрации этанола характерно для всех исследованных значений относительной влажности воздуха. С увеличением относительной влажности воздуха минимальные значения температуры поверхности испаряющихся капель возрастают, а время испарения увеличивается. Выполнено обобщение полученных экспериментальных данных, которое может быть использовано при расчетах тепломассопереноса испаряющихся капель водных растворов этанола.

DOI: 10.31857/S0023291221030022

ВВЕДЕНИЕ

Испарение капель бинарных растворов лежит в основе различных технологических процессов, поэтому данному вопросу посвящено значительное количество экспериментальных и расчетных работ. По сравнению с чистыми жидкостями процесс испарения бинарных растворов существенно усложняется вследствие различий в теплофизических характеристиках компонентов и их сложного взаимного влияния при испарении капель. В большинстве экспериментальных и численных исследований испарения капель бинарных растворов изучается влияние концентрации раствора на интенсивность процесса испарения [1–6]. В работах [7–9] показано существенное влияние концентрации водно-спиртовых растворов на изменение объема и краевого угла лежащих капель. В ряде исследований выполнен анализ изменения геометрических параметров и температуры подвешенных капель различных бинарных растворов в зависимости от температуры воздушного потока [10–14]. Следует отметить, что значительная доля этих исследований проведена при высоких температурах и при фиксированной относительной влажности окружающего воздуха. В ряде работ [15–17] отмечено, что помимо концентрации раствора решающим фактором, определяющим динамику процесса испарения

капель водно-спиртовых растворов, является влажность окружающей среды. Однако в данных работах рассматривается только влияние влажности на испарение лежащих капель. В то же время определенный научный и практический интерес представляет процесс испарения свободных капель бинарных растворов. Таким образом, актуальной является задача изучения испарения свободных капель водно-спиртовых растворов при разной относительной влажности воздуха.

Цель данной работы заключалась в комплексном экспериментальном исследовании влияния относительной влажности окружающего воздуха на изменение геометрических параметров и температуры поверхности свободных капель водных растворов этанола различной концентрации.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Настоящая работа является продолжением экспериментальных исследований испарения подвешенных капель водных растворов этанола [18]. Для проведения экспериментов использовалась нить из полипропилена диаметром 150 мкм. Малая толщина нити и низкий коэффициент ее теплопроводности ($\lambda = 0.19 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$) позволили минимизировать влияние нити и получить хорошее приближение к условиям испарения свободных

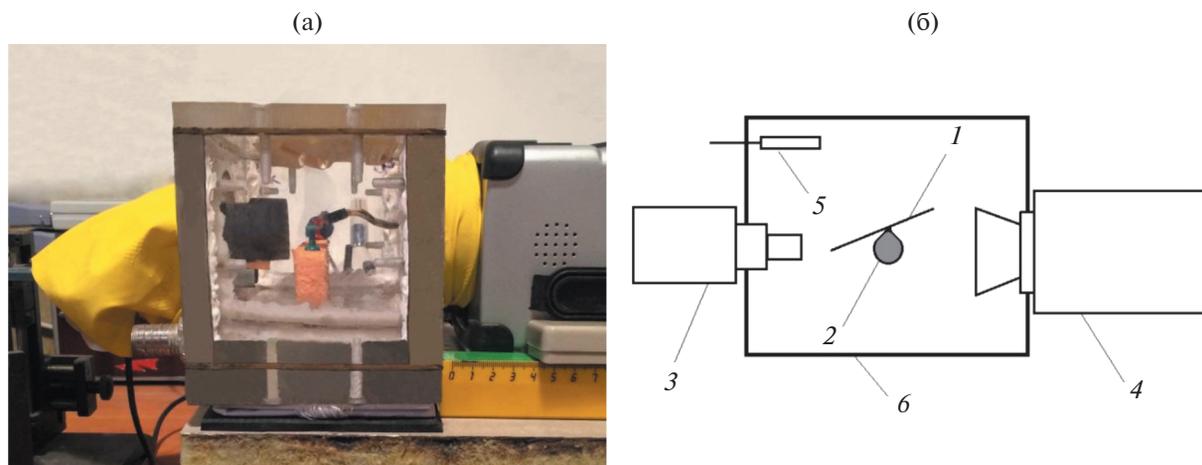


Рис. 1. Фотография (а) и схема (б) экспериментальной установки: 1 – нить из полипропилена, 2 – капля водного раствора этанола, 3 – цифровой микроскоп, 4 – тепловизор, 5 – датчик термогигрометра, 6 – герметичная камера.

капель. В отличие от предыдущих исследований, в данной работе было рассмотрено испарение капель при различной относительной влажности воздуха. С этой целью рабочий участок экспериментальной установки с подвешенной каплей был помещен внутрь герметичной камеры (рис. 1).

В ходе эксперимента в герметичной камере поддерживалась постоянная температура. При помощи сорбента и воды в камере устанавливалось заданное постоянное значение относительной влажности воздуха. Контроль температуры и влажности воздуха в камере выполнялся с помощью термогигрометра. Сбоку от подвешенной капли располагались тепловизионная камера и цифровой микроскоп. С помощью цифрового микроскопа фиксировалось изменение размеров капель в процессе испарения. В экспериментах определялось время испарения капель. Температура поверхности капель находилась из тепловизионных измерений. В целях калибровки и для определения коэффициента излучения поверхности капель дополнительно измерялась температура капель с помощью микротермопары с диаметром спая 50 мкм.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. На нить одновременно рядом подвешивались 2 капли одного размера с одинаковой концентрацией этанола. При этом в одной из капель находилась микротермопара для контактного измерения температуры. Обе капли в процессе испарения наблюдались с помощью тепловизора. Следует отметить, что во всех проведенных экспериментах было обнаружено, что капли с помещенной внутрь термопарой имели температуру в среднем на 0.4–0.9°C выше, чем капли без термопары. Очевидно, это объясняется подводом тепла к капле через микротермопару. Поэтому данные, полученные для капель с мик-

ротермопарой, были использованы только для калибровки и определения коэффициента излучения поверхности капель. При дальнейшем анализе рассматривались значения температуры, полученные с помощью тепловизора для капель без термопары.

На собранной экспериментальной установке были выполнены исследования испарения капель водных растворов этанола с разной объемной долей c_v : 0 (вода), 0.25, 0.5, 0.75 и 0.96 (этанол). Изучалось испарение капель объемом 5 мкл при постоянной температуре $t = 25^\circ\text{C}$ и различной относительной влажности воздуха ($\varphi = 5, 25, 55$ и 95%).

2. ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАПЕЛЬ

На основании полученных в экспериментах последовательностей микрофотографий определялось изменение диаметра капель в процессе испарения.

На рис. 2 представлены полученные после обработки экспериментальных результатов зависимости квадрата относительного диаметра капель $(d/d_0)^2$ (d_0 – начальный диаметр капли, d – ее текущий диаметр) от времени испарения τ при разной относительной влажности воздуха для капель с различной концентрацией этанола.

Приведенные на рис. 2а экспериментальные данные показывают, что квадрат относительного диаметра $(d/d_0)^2$ капель воды линейно уменьшался с течением времени при всех значениях относительной влажности воздуха. При этом, чем меньше была относительная влажность воздуха, тем больше был угол наклона линейной зависимости $(d/d_0)^2$ от τ , что свидетельствовало об интенсификации испарения капель. Данная линейная

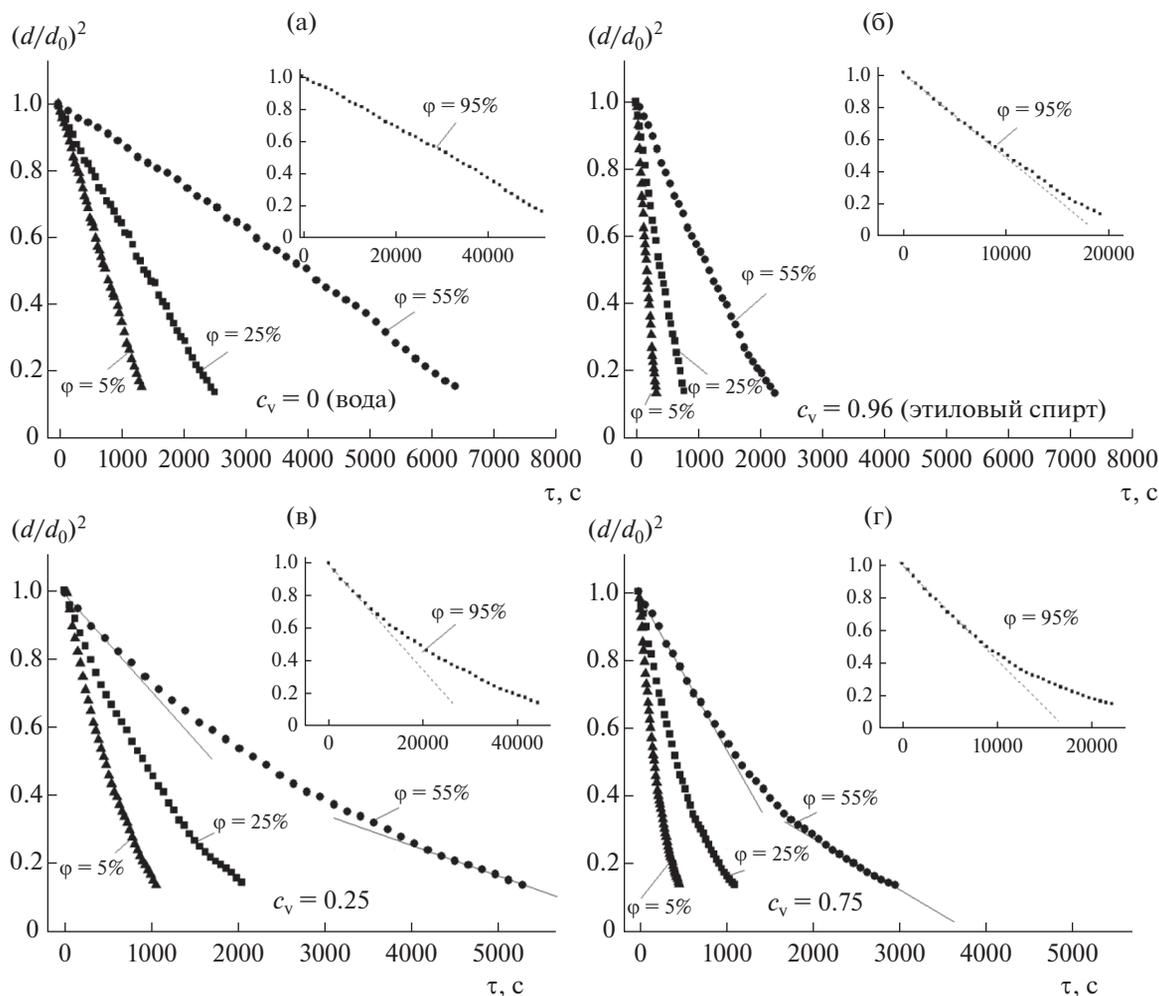


Рис. 2. Изменение во времени относительного диаметра подвешенных капель водных растворов этанола разной концентрации, испаряющихся при различной относительной влажности воздуха: (а) $c_v = 0$ (вода), (б) $c_v = 0.96$ (этанол), (в) $c_v = 0.25$, (г) $c_v = 0.75$.

зависимость, известная как “закон Срезневского”, широко используется при описании процесса испарения капель чистых жидкостей [6, 10–12] и характеризует изменение площади поверхности капли.

Для капель этанола (рис. 2б) при относительной влажности воздуха 95% на заключительном этапе испарения наблюдалось заметное отклонение зависимости $(d/d_0)^2 - \tau$ (т.е. изменения площади поверхности капли со временем) от линейной. Это связано с гигроскопичностью этанола и конденсацией влаги из воздуха на поверхности капли при ее охлаждении за счет испарения.

Приведенные на рис. 2в, 2г данные показывают, что для капель водных растворов с объемной долей этанола 0.25 и 0.75 изменение квадрата относительного диаметра со временем носит более ярко выраженный нелинейный характер. Чем больше была концентрация этанола в капле, тем характер изменения безразмерного диаметра был

ближе к его изменению для капли этанола, а при уменьшении концентрации этанола – к его изменению для капли воды. При испарении капель бинарных растворов одновременно испаряются оба компонента, но при этом интенсивность испарения каждого компонента зависит от его летучести и концентрации в растворе [19]. На начальном этапе капли преимущественно испаряется более летучий компонент, которым является этанол, а на заключительном этапе – менее летучий, т.е. вода. Поэтому на рис. 2в и 2г можно наблюдать постепенное снижение темпа изменения площади поверхности капель при их испарении. Снижение скорости испарения капель водных растворов этанола при высокой относительной влажности было отмечено ранее в работах [13–15], однако это касалось только лежащих капель.

На рис. 3 представлены зависимости времени испарения капель водно-этанольных растворов от содержания (объемной доли) спирта при раз-

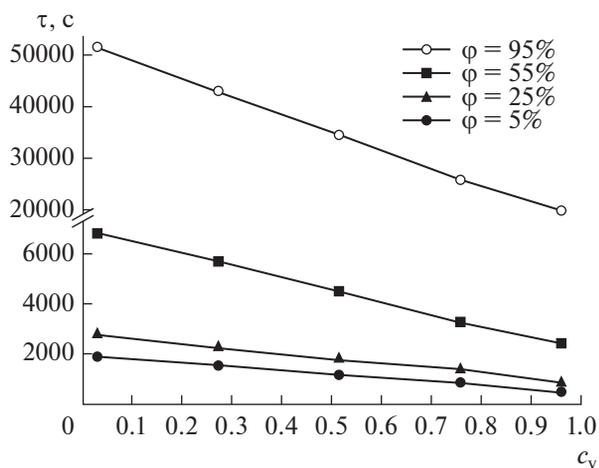


Рис. 3. Зависимости времени испарения капель водно-этанольных растворов от концентрации спирта при различной относительной влажности воздуха.

личных значениях относительной влажности воздуха.

Полученные данные показывают, что при всех исследованных значениях относительной влажности воздуха (5–95%), чем больше была концентрация этанола в капле, тем меньше было время ее испарения. Такое влияние концентрации на время испарения бинарных водных растворов было отмечено ранее в работах [6, 10]. Однако результаты этих работ были получены только при фиксированной относительной влажности воздуха. Приведенные в настоящей работе данные показывают, что подобная закономерность уменьшения времени испарения с увеличением концентрации этанола характерна для различных значений ϕ . Также следует отметить, что с увели-

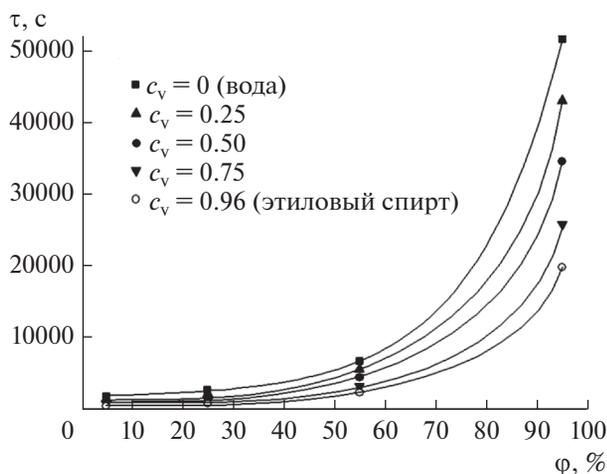


Рис. 4. Зависимости времени испарения капель водно-этанольных растворов разной концентрации от относительной влажности воздуха.

чением относительной влажности воздуха время испарения капель возрастало при всех исследованных концентрациях этанола.

На рис. 4 приведены зависимости времени испарения подвешенных капель водно-этанольных растворов разной концентрации от относительной влажности воздуха. Из рисунка следует, что наибольший темп увеличения времени испарения с ростом относительной влажности воздуха наблюдается для капель воды, а наименьший — для капель этанола. Для капель с концентрацией этанола $c_v = 0.25, 0.5, 0.75$ имела место промежуточная ситуация.

На рис. 5 приведена зависимость безразмерного времени испарения капель $\bar{\tau} = \tau/\tau_\phi$ от относительной влажности воздуха, где τ_ϕ — время испарения капли раствора соответствующей концентрации при $\phi = 95\%$. В таком представлении все полученные при температуре воздуха 25°C экспериментальные данные хорошо описываются экспоненциальной зависимостью $\bar{\tau} = 0.034 + 0.004e^{\phi/17.5}$. Таким образом, эта зависимость может быть использована для определения времени испарения капель водно-этанольных растворов разной концентрации при различной относительной влажности воздуха.

3. ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ

На основании обработки экспериментальных данных были определены зависимости температуры поверхности капель от времени испарения при различной относительной влажности возду-

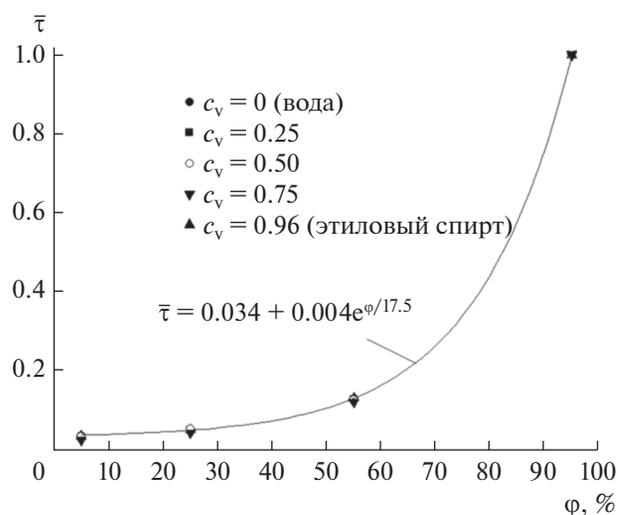


Рис. 5. Зависимость безразмерного времени испарения капель водно-этанольных растворов разной концентрации от относительной влажности воздуха.

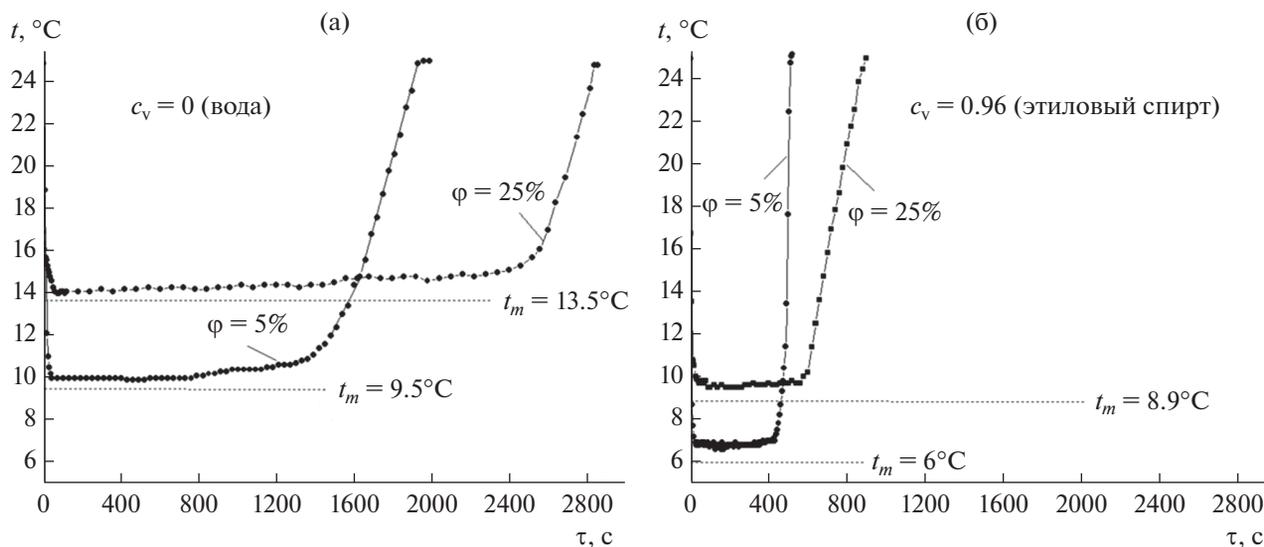


Рис. 6. Временные зависимости температуры поверхности подвешенных капель воды (а) и этанола (б), испаряющихся при различной относительной влажности воздуха.

ха. На рис. 6 представлены характерные зависимости температуры поверхности от времени, полученные для капель воды ($c_v = 0$) и этанола ($c_v = 0.96$) при значениях $\phi = 5$ и 25% .

Приведенные на рис. 6а данные показывают, что для капли воды при относительной влажности воздуха 25% на начальном этапе испарения наблюдалось резкое понижение температуры до 14.2°C . В дальнейшем температура капли практически не изменялась в течение основного времени испарения, а затем наблюдалось ее повышение до температуры окружающего воздуха. При относительной влажности воздуха 5% характер изменения температуры капли был схожим, но охлаждение капли происходило до более низких значений (около 10°C) и процесс испарения капли проходил существенно быстрее. Это свидетельствовало о более интенсивном испарении капли воды при меньшей влажности окружающего воздуха.

На рис. 6 горизонтальными пунктирными линиями показаны значения температуры адиабатного испарения t_m для воды и спирта при соответствующих условиях испарения. Значения температуры адиабатного испарения капель определялись численными расчетами по эмиссионно-диффузионной модели [20, 21], а также из экспериментальных данных [22]. В условиях проведения наших экспериментов ($t = 25^{\circ}\text{C}$) значения t_m для воды составляло 9.5°C при влажности воздуха 5% и 13.5°C при влажности воздуха 25% .

Таким образом, полученные в экспериментах данные показывают, что при испарении капель воды, подвешенных на нити из полипропилена, минимальные значения температуры капель пре-

вышали соответствующие значения t_m примерно на 0.5°C . Очевидно, это было обусловлено подводом тепла по нити и радиационным теплообменом капли с окружающей средой [13]. Согласно выполненным оценкам, подвод тепла по нити к каплям являлся несущественным и в условиях выполненных экспериментов приводил к повышению температуры на 0.1°C . В данном случае наибольшее влияние оказывал радиационный теплообмен капли с окружающей средой [14, 15].

Приведенные на рис. 6б данные показывают, что изменение температуры подвешенных капель этанола ($c_v = 0.96$) также зависело от относительной влажности окружающего воздуха. При влажности воздуха 5% температура капли спирта понижалась до более низких значений, чем при влажности 25% , и испарение капли происходило быстрее. При этом характер полученных зависимостей температуры поверхности от времени, как и для капель воды, включал 3 стадии, отмеченные ранее в работе [16]. Однако, в отличие от капель воды, в аналогичных условиях подвешенные капли этанола испарялись быстрее, и их температура опускалась до более низких значений: при влажности воздуха 5% – до 6.6°C , при влажности воздуха 25% – до 9.5°C . Для условий проведения экспериментов ($t = 25^{\circ}\text{C}$) температура адиабатного испарения спирта t_m составляла 6.0°C при влажности воздуха 5% и $t_m = 8.9^{\circ}\text{C}$ при влажности воздуха 25% . Таким образом, минимальная температура поверхности испаряющихся капель спирта также превышала соответствующие значения температуры адиабатного испарения, вследствие влияния радиационного теплообмена.

Из анализа данных, представленных на рис. 6а и 6б, следует, что относительная влажность воз-

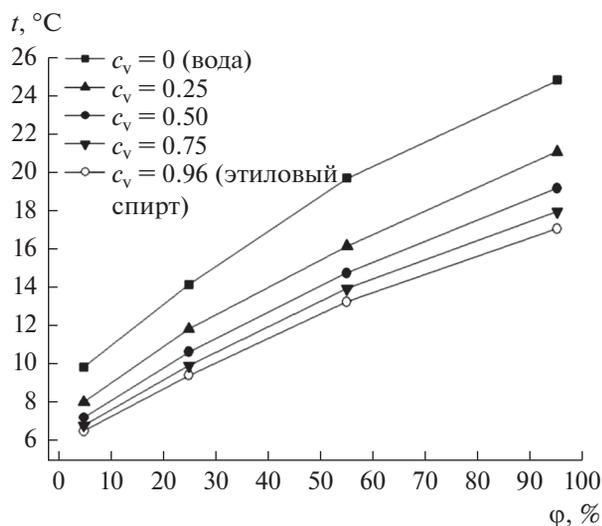


Рис. 7. Зависимости минимальной температуры испаряющихся капель водно-этанольных растворов разной концентрации от относительной влажности воздуха.

духа существенно влияет на время испарения и минимальную температуру капель воды и спирта. Аналогичное влияние относительной влажности воздуха было обнаружено и в экспериментах по испарению капель водно-этанольных растворов с объемной долей спирта $c_v = 0.25, 0.5, 0.75$.

На основании полученных экспериментальных данных были построены зависимости минимальной температуры испаряющихся капель водных растворов с разной концентрацией этанола от относительной влажности воздуха (рис. 7).

Данные, представленные на рис. 7, показывают, что с увеличением относительной влажности воздуха минимальные значения температуры капель возрастали для всех рассмотренных концентраций этанола. При этом наибольший темп увеличения температуры наблюдался для капель воды, а наименьший — для этанола ($c_v = 0.96$). Для капель с концентрацией этанола $c_v = 0.25, 0.5, 0.75$ имела место промежуточная ситуация. Следует также отметить, что при одном и том же значении относительной влажности воздуха минимальная температура капли в процессе испарения опускалась тем ниже, чем больше была концентрация этанола. Этот эффект наглядно демонстрирует рис. 8.

Такое влияние концентрации на температуру адиабатного испарения капель различных бинарных водных растворов было отмечено ранее в работе [11] и продемонстрировано для капель водного раствора этанола в работе [13]. Однако результаты этих работ были получены только в условиях низкой относительной влажности окружающего воздуха. Наши данные свидетельствуют о том, что подобная закономерность уменьшения

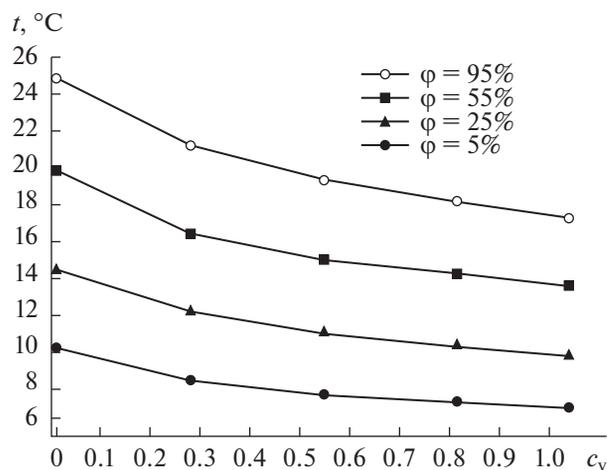


Рис. 8. Зависимости минимальной температуры испаряющихся капель водно-этанольных растворов от концентрации спирта при различной относительной влажности воздуха.

минимальной температуры испаряющейся капли с увеличением концентрации этанола характерна для очень широкого диапазона значений относительной влажности воздуха ($\phi = 5-95\%$). С целью их обобщения на рис. 9 представлена зависимость безразмерной минимальной температуры испаряющихся капель водного раствора этанола от объемной доли спирта, $\bar{t} = t/t_b$, где t_b — минимальная температура капли чистой воды такого же начального размера, как и капля воды, при соответствующей относительной влажности воздуха. В таком представлении полученные при температуре воздуха 25°C экспериментальные данные хорошо описываются зависимостью $\bar{t} = 1 - 0.88c_v + c_v^2 - 0.47c_v^3$. Следовательно, эту зависимость можно использовать для определения минимальной температуры испаряющихся капель водных растворов этанола разной концентрации при различной относительной влажности воздуха.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовано испарение подвешенных капель водных растворов этанола различной концентрации и определено изменение диаметра капель при разной относительной влажности воздуха. Полученные данные показали, что для испаряющихся капель воды квадрат относительного диаметра $(d/d_0)^2$ линейно уменьшался с течением времени при различной относительной влажности воздуха. Для капель водных растворов этанола разной концентрации выделены два участка на зависимости $(d/d_0)^2$ от времени испарения: начальный участок обусловлен преимущественным испарением этанола, заключительный — преимущественным испарением воды.

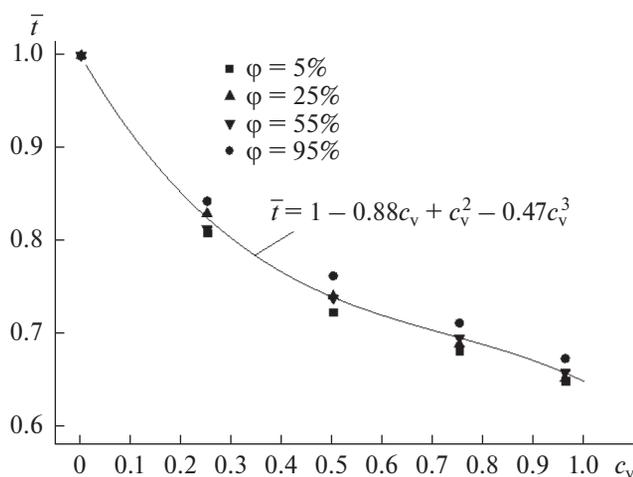


Рис. 9. Зависимость безразмерной минимальной температуры испаряющихся при различной относительной влажности воздуха капелек водно-этанольных растворов от концентрации спирта.

Установлено, что с увеличением относительной влажности воздуха время испарения капелек возрастает для всех рассмотренных концентраций водного раствора этанола.

Проведено обобщение полученных экспериментальных данных, которое может быть использовано в расчетах времени испарения капелек водных растворов этанола разной концентрации при комнатной температуре и различной относительной влажности воздуха.

Получены данные по изменению температуры поверхности испаряющихся капелек водных растворов этанола различной концентрации, подвешенных на нити из полипропилена, при разной относительной влажности воздуха. Установлено, что при испарении капелек в воздушной среде концентрация этанола и влажность воздуха являются решающими факторами, определяющими динамику процесса испарения. Показано также, что с увеличением относительной влажности воздуха минимальная температура испаряющейся капли возрастает для всех рассмотренных концентраций этанола. Установлено, что закономерность уменьшения температуры испаряющихся капелек с увеличением концентрации этанола характерна для всех исследованных значений относительной влажности воздуха. Выполнено обобщение полученных экспериментальных данных, которое может быть использовано для определения минимальной температуры испаряющихся капелек водных растворов этанола разной концентрации при комнатной температуре и различной относительной влажности воздуха.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Методики экспериментальных измерений разработаны в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800217-8, экспериментальные исследования выполнены за счет средств мегагранта №2020-220-08-1436.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chandra S., Di Marzo M., Qiao Y.M., Tartarini P. // Fire Saf. J. 1996. V. 27. P. 141.
2. Sefiane K., David S., Shanahan M.E.R. // J. Phys. Chem. B. 2008. V. 112. P. 11317.
3. Zhang H., Law C. K. // Combust. Flame. 2008. V. 153. P. 593.
4. Саверченко В.И., Фисенко С.П., Ходыко Ю.А. // Коллоид. журн. 2015. Т. 77. С. 79.
5. Кучма А.Е., Есипова Н.Е., Михеев А.А., Шекин А.К., Ицков С.В. // Коллоид. журн. 2017. Т. 79. С. 747.
6. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. С. 17.
7. Sefiane K., Tadriss L., Douglas M. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 4527.
8. Cheng A.K.H., Soolaman D.M., Yu H.Z. // J. Phys. Chem. B. 2006. V. 110. P. 11267.
9. Shi L., Shen P., Zhang D., Lin Q., Jiang Q. // Surf. Interface Anal. 2009. V. 41. P. 951.
10. Hallett W.L.H., Beauchamp-Kiss S. // Fuel. 2010. V. 89. P. 2496.
11. Терехов В.И., Шишкин Н.Е. // Ползуновский вестник. 2010. № 1. С. 55.
12. Han K., Song G., Ma X., Yang B. // Appl. Thermal Eng. 2016. V. 101. P. 568.
13. Bochkareva E.M., Terekhov V.V., Nazarov A.D., Miskiv N.B. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. 012010.
14. Al Qubeissi M., Al-Esawi N., Sazhin S.S., Ghaleeh M. // Energy Fuels. 2018. V. 32. P. 6498.
15. Liu C., Bonaccorso E., Butt H.J. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2008. V. 10. P. 7150.
16. Кучма А.Е., Есипова Н.Е., Шекин А.К., Ицков С.В. // Коллоид. журн. 2018. Т. 80. С. 679.
17. Oztürk T., Erbil H.Y. // Colloids Surf. A. 2018. V. 553. P. 327.
18. Бородулин В.Ю., Летушко В.Н., Низовцев М.И., Стерлягов А.Н. // Коллоид. журн. 2019. Т. 81. С. 289.
19. Borodulin V.Y., Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1382. 012106.
20. Borodulin V.Y., Letushko V.N., Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 109. P. 609.
21. Левашов В.Ю., Крюков А.П. // Коллоид. журн. 2017. Т. 79. С. 606.
22. Терехов В.И., Шишкин Н.Е. // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. С. 253.