

УДК 536.423.4, 535.5

Адиабатическое испарение бинарных смесей жидкости на поверхности пористого шара*

В.И. Терехов, Н.Е. Шишкин

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

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru; shishkin@itp.nsc.ru

Представлены результаты измерения температуры пористой поверхности сферы, через которую подавалась испаряющаяся бинарная смесь жидкостей. В экспериментах использовались водные растворы этилового и метилового спирта и ацетона. Концентрации компонентов смеси изменялись в максимально возможных пределах $X_L = 0-1$, а температура обтекающего сухого воздуха $t_0 = 15-300$ °С. В работе установлено сильное влияние состава смесей на температуру адиабатического испарения. Определяющую роль в процессе тепломассопереноса при этом играет и температура воздуха. Получена экспериментальная корреляция, обобщающая данные по температуре адиабатического испарения в широком диапазоне концентраций компонентов и температур для изученных в опытах бинарных смесей жидкостей.

Ключевые слова: теплообмен, бинарные смеси, адиабатическое испарение, сфера.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения температуры адиабатического испарения бинарных и многокомпонентных смесей имеет большой научный и практический интерес при расчетах процессов горения топлив сложного состава в энергетических установках различного назначения. К настоящему времени накоплена обширная информация о теплосопереносе при испарении чистых жидкостей с плоских поверхностей [1–3], а также сфер (капель) [4–6]. Однако даже для этих достаточно простых условий отсутствует единая точка зрения на правомочность использования аналогии процессов тепломассообмена. Отсутствует также к настоящему времени единая точка зрения на причины значительного отличия опытных данных по тепломассообмену от результатов расчетных методик. Отсутствует единый подход в выборе определяющего параметра, по которому необходимо рассчитывать коэффициенты теплообмена. По этому вопросу в литературе продолжается дискуссия [7–10].

Испарение смесей может происходить по двум принципиально отличающимся режимам. Для изолированных капель жидкости из-за отличия фугитивности компонентов, вначале испаряются более легколетучие составляющие, в результате чего в объеме капли происходит диффузия компонентов, которая может лимитировать в целом процесс испарения [11–14]. Циркуляционное движение жидкости

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 06–08–39002 — ГФЕН).

внутри капли может оказать сильное влияние на интегральный тепломассоперенос [15–17].

В другом случае к испаряющейся поверхности смесь может подаваться непрерывно. Поскольку на поверхности не может происходить накопление какого-либо из компонентов, тепловые и диффузионные условия на границе раздела фаз будут формироваться таким образом, чтобы испарение компонент происходило равномерно, и задача в отличие от предыдущей является стационарной. В настоящей работе исследуется именно этот случай, когда через проницаемую стенку непрерывно подается бинарный раствор различных жидкостей.

Значение температуры испаряющейся поверхности, измерению которого уделено основное внимание в работе, является одним из важных, определяющих процесс тепломассопереноса при испарении параметров. Его зависимость от термогазодинамических и диффузионных параметров позволяет провести тестирование различных моделей тепломассопереноса на поверхности с фазовым переходом, проверить наличие или отсутствие аналогии между ними, рассчитать соотношение компонентов тепловых потоков и т. д.

1. БАЛАНС ПОТОКОВ ТЕПЛА И МАССЫ НА ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается испарение бинарной смеси жидкостей с массовой концентрацией компонентов K_{L1} и $K_{L2} = 1 - K_{L1}$ (рис. 1). Суммарный поток испаряющегося вещества на поверхности складывается из потоков компонентов, составляющих раствор:

$$J_w = J_{w1} + J_{w2} = J_w K_{L1} + J_w (1 - K_{L1}). \quad (1)$$

Уравнение неразрывности i -й компоненты смеси записывается в виде

$$J_{w1} = J_w \frac{K_{1w}}{1 - K_{aw}} - \rho D \left(\frac{\partial K_1}{\partial y} \right)_w. \quad (2)$$

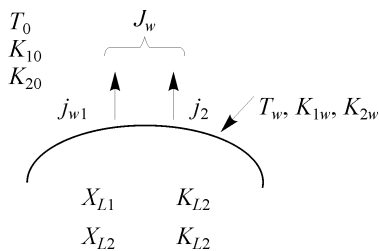
В режиме адиабатического испарения бинарной смеси баланс тепловой энергии на поверхности имеет вид

$$\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)_w = j_w (K_{L1} r_1 + K_{L2} r_2 - K_{L1} R), \quad (3)$$

где r_1 и r_2 — значения скрытой теплоты парообразования компонентов, а R — теплота их растворения.

Решение (1) и (3) при условии подобия процессов тепломассообмена $St_T/St_d = Le^{-n}$ имеет соотношение

$$\frac{\bar{C}_p (T_0 - T_w)}{K_{L1} r_1 + K_{L2} r_2} = Le_1^n \frac{K_{1w} - K_{10}}{K_{L1} - \frac{K_{1w}}{1 - K_{aw}}}. \quad (4)$$

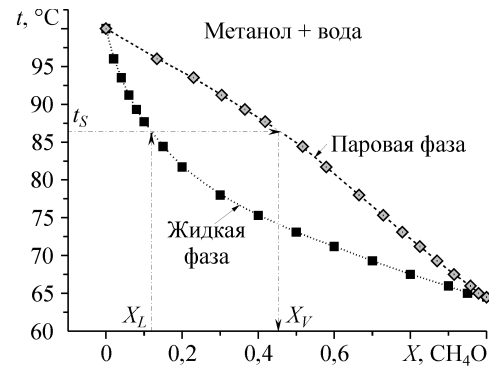


Здесь K_{aw} — концентрация воздуха на стенке, $Le = D/a$ — число Льюиса. Для однокомпонентной жидкости выражение (4) переходит в известное соотношение [1].

Рис. 1. Соотношение тепловых и массовых потоков при испарении бинарных растворов.

Рис. 2. Диаграмма фазового равновесия смеси вода + метанол.

Совместное решение (4) с кривой насыщения пар–жидкость позволяет рассчитать температуру на межфазной границе, а также парциальные давления пара и воздуха. При испарении многокомпонентных и, как наиболее простых, бинарных смесей жидкостей задача существенно усложняется и кривая фазового равновесия имеет сложный вид. Особые трудности возникают при испарении неазеотропных смесей. В качестве примера на рис. 2 показана диаграмма фазового равновесия смеси вода + метанол при атмосферном давлении [18]. Концентрации компонентов паровой фазы на испаряющейся границе могут сильно отличаться от состава жидкой смеси. При этом диаграмма изменяется при вариации давления, например, при испарении бинарной смеси в потоке инертного газа, и над испаряющейся поверхностью смесь газов состоит из трех компонентов — инертного воздуха и паров смеси. В общем случае отсутствия азеотропии соотношения для компонентов в жидкой и паровой фазах имеют вид [19]



$$\begin{cases} X_{L1} = F_1(T_w, P_w) \\ X_{V1} = \Phi_1(T_w, P_w), \end{cases} \quad (5)$$

где X_{L1} , X_{V1} — объемные концентрации компонента 1 в жидкой и паровой фазе соответственно, а P_w — суммарное давление смеси газов.

Решение задачи о совместном тепло-массообмене при испарении многокомпонентных и, как частный случай, бинарных смесей в строгой постановке представляет большие трудности. Поэтому наиболее приемлемым подходом в решении поставленной задачи является проведение экспериментального исследования, результаты которого могут быть использованы для создания инженерных методов расчета и верификации численных моделей.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Опыты проводились на аэродинамическом стенде с нагревом воздуха в интервале температур от 15 до 300 °С и практически с нулевой влажностью ($\varphi < 3\%$). На выходе канала диаметром ~ 52 мм располагалась исследуемая пористая сфера диаметром 6 мм, изготовленная спеканием порошка полиметилметакрилата Л-1 с диаметром частиц 0,1 мм (рис. 3). Исследуемый раствор поступал по трубке в центр пронизываемой сферы, а специальная схема подачи жидкости обеспечивала условия постоянной смоченности ее поверхности во время эксперимента.

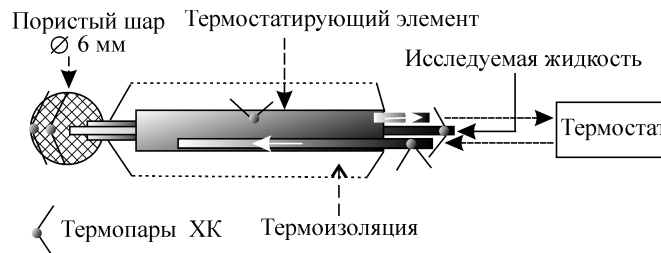


Рис. 3. Схема измерительного зонда.

Как известно [20], с отбором теплоты парообразования жидкости температура на поверхности фазового перехода в равновесных условиях будет понижаться до температуры насыщения жидкости в обтекающем газовом потоке. Эта температура насыщения при отсутствии дополнительного теплопритока за счет лучистого или кондуктивного теплообмена (случай адиабатического испарения) носит название температуры “мокрого” термометра.

Температура испаряющейся сферы (“мокрого” термометра) измерялась микротермопарой, заделанной вровень с поверхностью. Еще одна термопара, контролирующая адиабатичность процесса испарения, была установлена внутри сферы на расстоянии $\sim 1,5$ мм от основной. Известно [1, 2], что в экспериментах по испарению достаточно сложно добиться условий адиабатичности за счет теплоподвода теплопроводностью непосредственно от подводимой жидкости и поддерживающих сферу конструкций, а также за счет лучистого теплообмена. Для минимизации теплотерь подающаяся на испарение смесь термостатировалась и поддерживалась равной температуре адиабатического испарения. Радиационные теплотери были снижены за счет установки на стенку трубы теплоотражающих экранов. Как показали тестовые эксперименты с чистыми жидкостями, максимальная относительная погрешность измерения температуры испаряющейся сферы не превышала 2,6 %. Опыты проводились при скоростях потока $u_0 = 1 \div 15$ м/с. Как показали измерения в указанном диапазоне, скорость обтекания влияет на интенсивность испарения, температура же поверхности не меняется. Числа Рейнольдса обдуваемого воздухом шара соответствовали диапазону $Re_D = 50 \div 1000$.

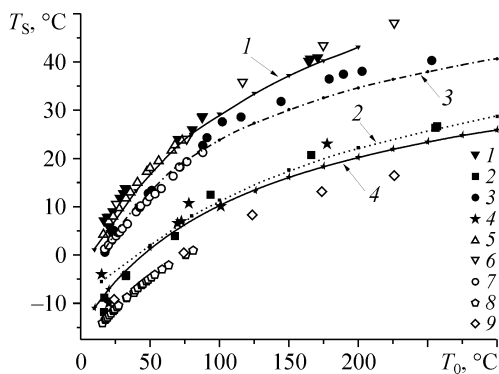
3. ТЕСТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ. ИСПАРЕНИЕ ЧИСТЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Программа экспериментальных исследований включала в себя изучение испарения воды, этилового, метилового спирта и ацетона. По всем упомянутым чистым жидкостям были проведены измерения температуры “мокрого” термометра в зависимости от температуры сухого воздуха. Результаты экспериментов представлены на рис. 4. Кривые на этом рисунке представляют собой расчетные зависимости для адиабатического испарения различных жидкостей, полученные из следующего соотношения, являющегося предельным случаем (4) для испарения однокомпонентной жидкости:

$$\frac{r}{C_{p0}(t_0 - t_s)} = Le_s^{0,66} \frac{1 - K_s}{K_s - K_0}. \quad (6)$$

Здесь t_0 , K_0 и C_{p0} — параметры набегающего потока, а Le_s , t_s , K_s — параметры на линии насыщения.

Как видно из рис. 4, опытные данные для всех жидкостей хорошо согласуются с расчетами по формуле (6) и опытными данными других авторов [8, 21] в достаточно широком диапазоне изменения температур воздуха. Исключение составляют только данные по испа-



рению составляют только данные по испа-

Рис. 4. Температура адиабатного испарения чистых жидкостей.

Опытные данные: настоящей работы — для воды (1), метанола (2), этанола (3), ацетона (4); для воды (5, [8], 6 [21]), для этанола (7, [8]), для ацетона (8, [8]), (9, [21]). Расчетные кривые 1–4 для воды, метанола, этанола и ацетона соответственно.

рению ацетона, причины расхождения которых требуют более детального рассмотрения. При этом температура “мокрого” термометра при фиксированной температуре воздуха сильно зависит от рода жидкости и, например, для воды и ацетона она может достигать $20^\circ \div 30^\circ$.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное исследование проводилось во всем диапазоне изменения концентраций компонентов бинарной смеси жидкостей. Изменение температуры “мокрого” термометра в зависимости от объемного содержания этанола и метанола показано на рис. 5. Для чистых жидкостей ($X_L = 0$, вода и $X_L = 1$, этанол или метанол) температуры соответствуют адиабатному испарению при заданных температурах окружающего воздуха. Несовпадение температур при испарении воды объясняется как раз некоторым отличием в температуре воздуха. Для метанола, как более легкокипящего компонента, понижение температуры “мокрого” термометра более сильное, чем у этанола.

Влияние температуры набегающего потока на температуру адиабатического испарения смеси вода + метанол представлено на рис. 6. Как и следовало ожидать, увеличение t_0 ведет к возрастанию t_s во всем диапазоне температур. Подобную тенденцию имеют данные и для других смесей с той лишь разницей, что будет соответственно изменяться абсолютный уровень температур в зависимости от используемых чистых жидкостей, составляющих исследуемый раствор.

Поскольку температуры “мокрого” термометра чистых жидкостей, содержащихся в данном растворе в соответствии с изложенной выше методикой, могут быть найдены из соотношения (6) с привлечением кривых насыщения, то удобно их использовать в качестве характерных величин для составления обобщающего параметра

$$\theta = (T_M - T_{M2}) / (T_{M1} - T_{M2}), \quad (7)$$

где T_M — температура “мокрого” термометра при произвольной концентрации компонентов смеси, а T_{M1} и T_{M2} — температуры адиабатического испарения для первого и второго чистого компонентов соответственно.

Результаты обработки опытных данных с использованием параметра θ представлены на рис. 7. Здесь нанесены результаты экспериментов для всех исследуемых растворов в широком интервале температур воздуха. Концентрации компонентов

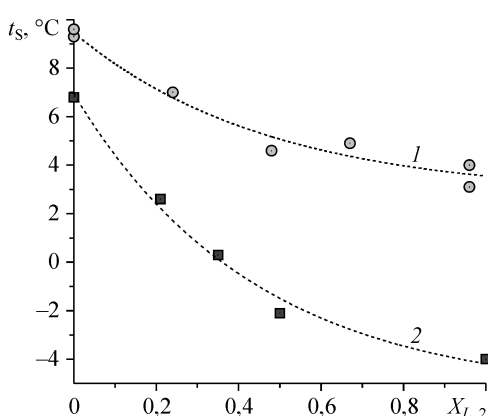


Рис. 5. Влияние концентрации спирта на температуру адиабатного испарения. Этанол, $T_0 \sim 23,5^\circ\text{C}$ (1), метанол, $T_0 \sim 15,2^\circ\text{C}$ (2).

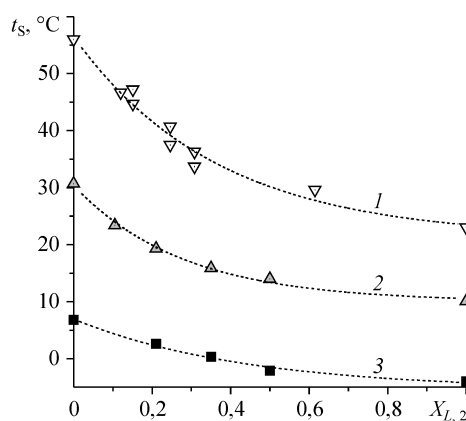


Рис. 6. Влияние температуры воздушного потока на испарение водного раствора метанола, $t_0 \sim 180$ (1), 106 (2), 15,2 (3) $^\circ\text{C}$.

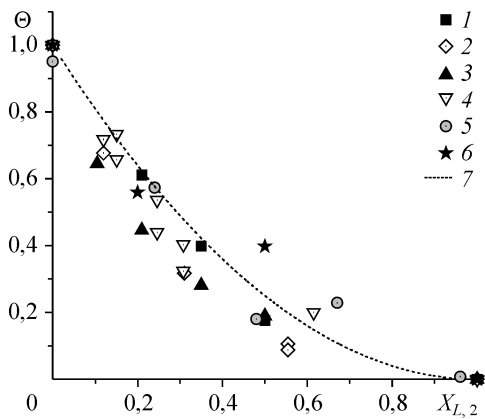


Рис. 7. Обобщение опытных данных по температуре испарения смесей различных жидкостей.

Метанол, $t_0 \sim 15,2$ (1), 75 (2), 106 (3), 180 (4) °С, этанол, $t_0 \sim 23,5$ °С (5), ацетон, $T_0 \sim 83$ °С (6);

$$7 — \Theta = (1 - X_{L,2})^2.$$

также изменялись во всем диапазоне $X = 0 \div 1,0$. Как видно, опытные данные имеют тенденцию к обобщению и описываются эмпирической зависимостью

$$\theta = (1 - X_{L,2})^2. \quad (8)$$

Это соотношение может быть использовано для инженерных оценок тепломассопереноса в исследованных бинарных растворах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены систематические экспериментальные исследования температуры адиабатического испарения в воздух водных бинарных растворов этанола, метанола и ацетона в режиме непрерывной подачи жидкой фазы к испаряемой поверхности. Установлены зависимости температуры “мокрого” термометра от состава смеси жидкостей и температуры воздуха. С использованием в качестве характерных температур адиабатического испарения чистых жидкостей получена обобщающая зависимость для безразмерной температуры адиабатического испарения бинарных смесей жидкостей.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$b_{1д}, b_{1т}$ — диффузионный и тепловой параметры проницаемости,

C_p — удельная теплоемкость смеси газов, Дж/кг·град,

D — коэффициент диффузии компонента газа, m^2/c ,

J_w — поток испаряющегося вещества, $kg/m^2 c$,

K — массовая концентрация компонента,

$Le = \rho D C_p / \lambda$ — число Льюиса газа,

r — теплота парообразования, Дж/кг,

$St = \alpha / C_p \rho_0 W_0$ — число Стентона,

t — температура, °С,

X — объемная концентрация компонента,

α — коэффициент теплоотдачи, $Вт/м^2 C^\circ$,

λ — коэффициент теплопроводности газа, $Вт/м C^\circ$;

ρ — плотность газа, kg/m^3 ,

θ — безразмерная температура “мокрого” термометра

ИНДЕКСЫ

M — “мокрый”,

L — жидкая фаза,

$1, 2$ — компоненты бинарного раствора.

0 — ядро потока,

S — линия насыщения,

w — поверхность сферы,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И. Конвективный теплообмен при испарении жидкости в газовый поток // Известия СО АН СССР. — 1985. — Вып. 3, № 16. — С. 13–22.
2. Кумада Т., Хирота Т., Тамура Н. и др. Тепло- и массообмен при испарении жидкости в турбулентный поток воздуха // Теплопередача. — 1986. — Т. 108, № 1. — С. 1–6.
3. Лыков А.В. Тепло- массообмен в процессах испарения // Инженерно-физический журнал. — 1962. Т. 5, № 11. — С. 12–24.
4. Ренкисбулут М., Юань М.С. Экспериментальное исследование испарения капли в высокотемпературном воздушном потоке // Теплопередача. — 1983. — Т. 105, № 2. — С. 149–159.
5. Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation from drops // Chemical Engng Progress. — 1952. Vol. 48. — P. 141-146 and 173-180.

6. **Yuen M.C., Chen L.W.** Heat transfer measurement of evaporation liquid droplets // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. — 1978. — Vol. 21, No. 9. — P. 537–542.
7. **Волчков Э.П., Лукашов В.В., Терехов В.В.** О подобии процессов тепло- и массопереноса в пограничном слое с инородным вдувом // *Тр. XII Школы-семинара под рук. ак. А.И. Леонтьева*. — М.: Изд-во МЭИ, 1999. — С. 348–353.
8. **Лукашов В.В.** К определению температуры поверхности испаряющейся жидкости // *Теоретические основы химической технологии*. — 2003. — Т. 37, № 4. — С. 351–355.
9. **Terekhov V.I., Shishkin N.E.** An experimental heat and mass transfer study of binary liquid mixture droplets evaporating into air stream // *Proc. of the 5th Baltic Heat Transfer conf. "Advances in Heat Transfer"*, Saint-Petersburg, Russia, September 19-21, 2007. — Vol. 2. — P. 317–326.
10. **Hager J., Hermansson V., Wimmerstedt R.** Modelling steam drying of a single porous sphere: experiments and simulations // *Chemical Engng. Sci.* — 1997. — Vol. 52. — P. 1253–1264.
11. **Sirignano W.A.** Fuel droplet vaporization and spray combustion theory // *Prog. Energy Combustion Science*. — 1983. — Vol. 9. — P. 291–322.
12. **Law C.K.** Recent advances in droplet vaporization and combustion // *Prog. Energy Combustion Science*. — 1982. — Vol. 8. — P. 169–199.
13. **Сметанюк В.А., Фролов С.М.** Испарение и горение канала углеводородного топлива. III. Прогрев капли в газовом потоке с учетом внутренних движений жидкости // *Химическая физика*. — 2004. — Т. 23, № 7. — С. 40–48.
14. **Lage P.L.C., Rangel R.H., Hackenberg C.M.** Multicomponent heat and mass transfer for flow over a droplet // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. — 1993. — Vol. 34, No. 14. — P. 3573–3581.
15. **Sazhin S.S.**, Advanced models of fuel droplet heating and evaporation // *Prog. Energy Combustion Science*. — 2006. — Vol. 32. — P. 162–214.
16. **Prakash S., Sirignano W.A.**, Theory of convective droplet vaporization with unsteady heat transfer in the circulating liquid phase // *Inter. J. Heat. Mass. Trans.*, 1980. — Vol. 23. — P. 253–268.
17. **Tong A.Y., Sirignano W.A.**, Multycomponent transient droplet vaporization with internal circulation: integral equation formulation and approximate solution // *Num. Heat. Trans.* — 1986. — Vol. 10. — P. 253–278.
18. **Коган В.Б., Фридман В.М.** Справочник по равновесию между жидкостью и паром / Под ред. В.В. Кафарова. — М.: ГосНТИХЛ, 1957. — 500 с.
19. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1982. — 592 с.
20. **Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.** Техническая термодинамика. — М.: Наука, 1979. — 512с.
21. **Downing C.G.** The evaporation of droplets of pure liquids at elevated temperatures: rate of evaporation and wet-bulk temperatures. // *AIChE J.* — 1966. — Vol. 12. — P. 760–776.

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2008 г.