

УДК 536.423

Тепломассообмен при адиабатическом испарении бинарных зеотропных растворов*

М.С. Макаров, С.Н. Макарова

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

E-mail: snmakarova@itp.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования тепломассообмена в ламинарном потоке трехкомпонентного газа при адиабатическом испарении бинарных растворов с плоской пластины. Исследования проведены для совершенного раствора — этанол/метанол и зеотропных растворов — вода/ацетон, бензол/ацетон, этанол/ацетон. Парожидкостное равновесие описывалось законом Рауля для идеального раствора и моделью Карлсона–Кольборна для реальных растворов. Проанализировано влияние температуры газа и состава жидкости на тепловые и диффузионные потоки, а также температуру парогазовой смеси на границе раздела фаз. Предложена формула для расчета температуры поверхности испарения бинарных смесей жидкостей с использованием подобия процессов тепло- и массообмена. Данные численного моделирования хорошо согласуются с результатами расчетов по предложенной зависимости для всех исследованных смесей жидкостей в рассмотренном диапазоне температур и давлений.

Ключевые слова: тепломассообмен, пограничный слой, адиабатическое испарение, бинарный раствор.

Введение

При проектировании энергоустановок необходимо учитывать особенности протекания тепло- и массообменных процессов с фазовыми и химическими превращениями [1, 2]. Одной из актуальных задач в настоящее время является описание процесса испарения смесей жидкостей, поскольку данная проблема представляет интерес для целого ряда современных технологий. В топливной промышленности для получения нового энергоносителя (альтернативного нефтяному) используются смеси жидкостей этилового и метилового спиртов с бензолом [3]. Сокращение промышленных запасов нефти делает актуальной разработку биотоплива, преимущество которого состоит в возобновляемости сырьевой базы. Повышение устойчивости и скорости горения паров жидких биотоплив во многом определяется интенсификацией процесса испарения. В химической промышленности испарительное охлаждение играет важную роль при получении пересыщенных водных растворов в высокоэффективном методе получения наночастиц [4, 5]. Совершенствование аппаратов химических технологий для выработки чистых компонентов жидких смесей напрямую зависит от оптимизации процесса испарения, который в свою

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-31116).

очередь зависит от геометрии поверхности испарения, давления, температуры, состава жидкой и газовой фаз и т.д.

На сегодняшний день накоплена обширная информация о тепломассопереносе при испарении чистых (однокомпонентных) жидкостей с плоских, цилиндрических и сферических поверхностей. Современное состояние проблемы изложено в ряде обзоров и монографий [6–8]. В то же время эффекты тепло- и массообмена при испарении двухкомпонентных жидкостей остаются малоизученными, несмотря на их широкую распространенность в технологических процессах. При испарении бинарной жидкости задача существенно усложняется, поскольку необходим учет отклонения от идеальности смеси, азеотропии, взаимной смешиваемости жидких компонентов, которые в свою очередь неоднозначно зависят от температуры, давления и состава. Кроме того, при нестационарном режиме испарения происходит более интенсивное снижение концентрации легколетучего вещества в растворе за счет разности фугитивности компонентов. При испарении капель водных растворов этанола, метанола и ацетона это приводит к температурной неравномерности поверхности капли с течением времени [9]. Для стационарного режима испарения принимаются специальные меры, обеспечивающие постоянство состава жидкой смеси во времени. В работах [10, 11] экспериментально изучено стационарное испарение водных бинарных растворов этанола, метанола и ацетона с поверхности пористой сферы в режиме непрерывной подачи жидкой фазы. Предложена корреляция для безразмерной температуры адиабатического испарения бинарных смесей жидкостей с использованием в качестве характерных температур адиабатического испарения чистых жидкостей. Влияние состава двухкомпонентной жидкой пленки, стекающей по внутренней стенке вертикального цилиндра, на интенсивность тепло- и массообмена численно исследовано в работе [12]. Показано, что добавление метилового спирта к бензолу, даже в очень малых количествах, приводит к существенному увеличению интенсивности испарения жидкости. Влияние геометрии поверхности испарения на коэффициенты теплоотдачи при течении пленки бинарной смеси фреонов представлено в экспериментальных работах [13–15]. Получено, что изменение характера волнового течения пленки при числах Рейнольдса $Re > 400$ приводит к интенсификации теплообмена в режиме испарения на поперечно оребренной поверхности по сравнению с гладкой и ромбовидной поверхностями. В режиме испарения и в области развития пузырькового кипения коэффициент теплоотдачи для поверхности с сетчатым покрытием заметно выше, чем для гладкой и структурированных поверхностей.

Моделирование тепломассопереноса при испарении смесей жидкостей зачастую ведется с использованием допущения об идеальности раствора. Так, в работах [16–18] выполнено численное исследование закономерностей стационарного испарения бесконечно тонкой пленки идеализированного водного раствора этиленгликоля в ламинарный пограничный слой на вертикальных и горизонтальных поверхностях. Модель бесконечно тонкой пленки жидкости является хорошим приближением для задач испарения из пористого тела (сушка древесины, теплоизоляционных материалов). Показано, что с увеличением концентрации этиленгликоля в растворе температура поверхности испарения возрастает из-за меньшей летучести его паров. Подтверждено существование температуры инверсии при испарении бинарной жидкости, наблюдавшееся ранее только при испарении чистых жидкостей [19, 20].

В настоящей работе выполнено численное моделирование тепломассообмена в ламинарном пограничном слое на плоской пластине при стационарном адиабатическом испарении бинарных смесей жидкостей. Рассмотрено испарение смесей со свойствами, близкими к совершенному раствору и реальному зеотропному раствору с положительным отклонением от закона Рауля. Для реальных растворов равновесие между жидкостью и паром описывается с использованием корреляции Карлсона–Кольборна. Проведен анализ влияния состава жидкости на интенсивность испарения с плоской адиабатной пластины и температуру поверхности испарения при различных температурах набегающего газового потока.

1. Постановка задачи и методы ее решения

Исследовалось стационарное течение трехкомпонентного газа в ламинарном пограничном слое на плоской пластине при адиабатическом испарении бесконечно тонкой пленки двухкомпонентной жидкости. Схема течения и основные параметры задачи представлены на рис. 1. Расчеты проведены при атмосферном давлении, скорости набегающего потока азота 10 м/с и температуре от 20 до 100 °С во всем диапазоне концентраций легкокипящего компонента в бинарных растворах: этанол/метанол, бензол/ацетон, этанол/ацетон и вода/ацетон.

Задача решалась численными методами на основе системы дифференциальных уравнений двумерного пограничного слоя в физических координатах (x, y) . Для течения многокомпонентного газа система уравнений неразрывности, движения, энергии и диффузии записывалась следующим образом [21]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\rho u c_P \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v c_P \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^2 \rho \left(D_{(i)}^0 c_{P(i)} - D_{(N_2)}^0 c_{P(N_2)} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \frac{\partial K_{(i)}}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\rho u \frac{\partial K_{(i)}}{\partial x} + \rho v \frac{\partial K_{(i)}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_{(i)}^0 \frac{\partial K_{(i)}}{\partial y} \right), \quad \text{при } i=1, 2, \quad K_{(N_2)} = 1 - \sum_{i=1}^2 K_{(i)}. \quad (4)$$

Вторичные эффекты, такие как термодиффузия и диффузионный термоэффект, не учитываются. В работе [22] подтверждено незначительное влияние термодиффузии на процессы переноса при испарении жидкости. Получено, что при испарении бензола в воздух при атмосферном давлении и температуре 1000 К термодиффузия повышает температуру поверхности испарения не более чем на 2,5 градуса.

Для замыкания системы дифференциальных уравнений задавались граничные условия на поверхности раздела фаз и в набегающем потоке. Исходя из условия прилипания вязкого газа продольная составляющая скорости на поверхности испарения $u_w = 0$. Поперечная составляющая скорости выражается из баланса потоков вещества:

$$v_w = - \frac{\sum_{i=1}^2 D_{w(i)}^0 \partial K_{w(i)} / \partial y}{1 - \sum_{i=1}^2 K_{w(i)}}. \quad (5)$$

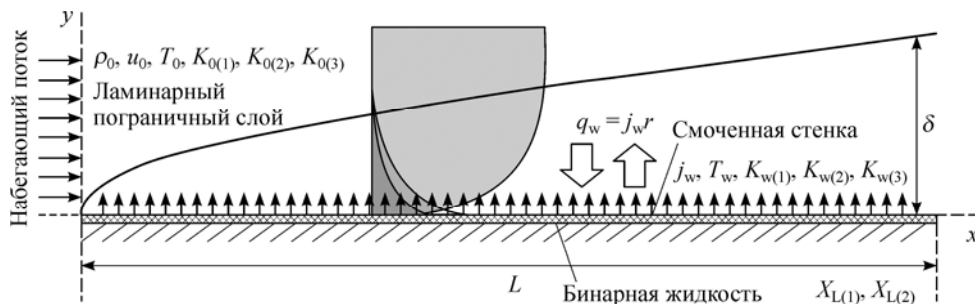


Рис. 1. Схема ламинарного пограничного слоя на плоской стенке при адиабатическом испарении двухкомпонентной жидкости.

Адиабатическое испарение со смоченной пластины происходит только за счет конвективного подвода тепла от внешнего газового потока. Тонкий слой жидкости имеет температуру, равную температуре поверхности испарения, пластина теплоизолирована, а теплопритоки за счет излучения к жидкости пренебрежимо малы. В этом случае из баланса тепла следует:

$$-\lambda_w \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w + \rho_w v_w r = 0, \quad (6)$$

где r — теплота парообразования смеси, которая определялась, исходя из теплоты парообразования компонентов при температуре поверхности по формуле:

$$r = \sum_{i=1}^2 r_{(i)} K_{L(i)}.$$

Состав парогазовой смеси на границе раздела фаз определялся из закона Дальтона и уравнения состояния идеального газа

$$K_{w(i)} = \frac{M_{(i)} P_{S(i)}}{\sum_{j=1}^3 M_{(j)} P_{S(j)}},$$

где $P_{S(3)} = P_0 - P_{S(1)} - P_{S(2)}$ — парциальное давление азота над раствором. Парциальное давление насыщенного пара каждого компонента бинарной жидкости на поверхности испарения определялось кривой фазового равновесия, модели расчета которой описаны ниже.

Теплофизические и переносные свойства трехкомпонентной парогазовой смеси, зависящие от температуры и концентрации, рассчитывались по данным для чистых компонентов [23] с использованием моделей, представленных в работе [24].

Решение системы дифференциальных уравнений (1–4) проводилось неявным конечно-разностным методом в физических переменных на прямоугольной сетке сжатой к поверхности испарения и передней кромке пластины. Нелинейность дифференциальных уравнений устранялась методом простых итераций на каждом шаге интегрирования с относительной точностью 10^{-5} .

2. Методы расчета парожидкостного равновесия

Кривая фазового равновесия жидкой и газообразной фаз позволяет рассчитать парциальные давления компонентов смеси и состав паровой фазы. Для совершенного (идеализированного) раствора давление насыщенного пара компонента смеси согласно закону Рауля имеет вид:

$$P_{S(i)} = P_{(i)}^0 X_{L(i)}, \quad (7)$$

где $P_{(i)}^0$ — давление насыщенного пара над чистой (однокомпонентной) жидкостью, $X_{L(i)}$ — мольная доля компонента в растворе.

Для неидеальных жидких систем давление насыщенного пара можно представить, используя закон Рауля с учетом коэффициента активности жидкой фазы:

$$P_{S(i)} = P_{(i)}^0 X_{L(i)} e^{\ln \gamma_{(i)}}. \quad (8)$$

Наиболее распространенным методом расчета фазового равновесия является метод, разработанный на основе уравнений Маргулеса, в которых $\ln \gamma$ представляется в виде

Рис. 2. Кривая фазового равновесия для двухкомпонентной системы этанол/метанол ($C_2H_5OH + CH_3OH$).

1 — расчет по закону Рауля (7), 2 — расчет по корреляции Карлсона–Кольборна (8), 3, 4 — экспериментальные данные для жидкой и паровой фазы соответственно [27].

степенного ряда по составу жидкости. Как правило, для двухкомпонентных смесей используют линейные перегруппировки этих рядов, предложенные Карлсоном и Кольборном [25]:

$$\ln \gamma_{(1)} = (A + 2(B - A)X_{L(1)})X_{L(2)}^2,$$

$$\ln \gamma_{(2)} = (B + 2(A - B)X_{L(2)})X_{L(1)}^2,$$

где при бесконечном разбавлении растворов $A = \ln \gamma_{(1)}^\infty$ и $B = \ln \gamma_{(2)}^\infty$.

На практике совершенные растворы довольно распространены, к ним относятся смеси некоторых жидких углеводородов. На основе измерений общего и парциального давлений при $40^\circ C$ в работе [26] было найдено, что бинарная смесь этанол/метанол подчиняется закону Рауля. Рассчитанная по формулам (7) и (8) кривая фазового равновесия для этой смеси и экспериментальные данные работы [27] представлены на рис. 2. Видно, что результаты расчетов температуры кипения, выполненные по модели идеального (7) и реального растворов (8), действительно совпадают между собой и описывают экспериментальные данные.

На рис. 3 представлены данные о парциальных давлениях ацетона и бензола в смеси на линии насыщения при температуре $t = 50^\circ C$, полученные по корреляции Карлсона–Кольборна (8), а также их суммарное давление, которое сопоставляется с результатами экспериментов [28]. Здесь же приведены результаты расчета давления насыщенного пара смеси по модели идеального раствора (7). Из рисунка видно, что бинарная жидкость — бензол/ацетон — по свойствам близка к совершенному раствору, и для ее описания можно использовать наиболее простую модель. Аналогичный вывод можно сделать и для смеси этанол/ацетон.

Существенное отличие от закона Рауля наблюдается для бинарной жидкости вода/ацетон. На рис. 4 показан равновесный состав паровой и жидкой фазы водного раствора ацетона при температуре $t = 25^\circ C$ в сравнении с экспериментальными данными [27]. Видно, что значительное расхождение экспериментальных и расчетных данных

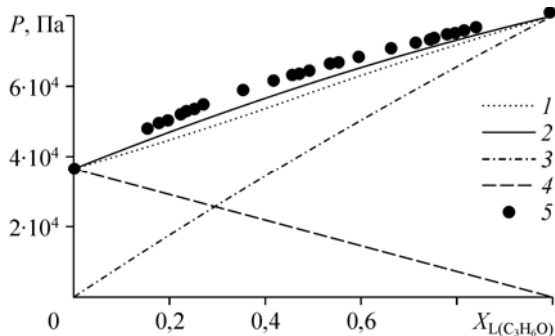
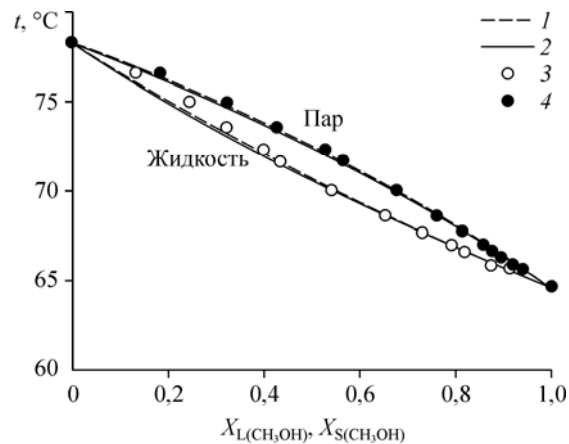


Рис. 3. Давление насыщенного пара смеси бензол/ацетон ($C_6H_6 + C_2H_6O$) и парциальные давления компонентов в зависимости от мольной доли ацетона в растворе при постоянной температуре $t = 50^\circ C$. 1, 2 — давление смеси по (7) и (8) соответственно, 3, 4 — парциальное давление паров ацетона и бензола по (8) соответственно, 5 — экспериментальные данные [28].



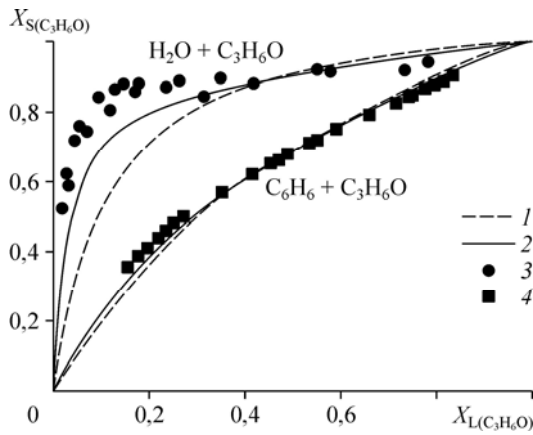


Рис. 4. Составы равновесных жидкости и пара для бинарных систем: вода/ацетон, бензол/ацетон.

1, 2 — расчет по формулам (7), (8) соответственно, 3 — экспериментальные данные при $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ [27], 4 — экспериментальные данные при $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ [28].

состав паровой фазы сильно отличается от состава жидкости. Расчет по модели Карлсона–Кольборна лучше соответствует эксперименту. На том же рисунке представлены данные о равновесном составе смеси бензол/ацетон.

3. Тепломассообмен при адиабатическом испарении бинарных растворов

На основе результатов моделирования проведен анализ влияния состава жидкой фазы на температуру поверхности испарения, тепловой поток к стенке и интенсивность испарения с плоской пластины при различных температурах газового потока. На рис. 5 приведены зависимости температуры поверхности испарения для исследованных бинарных смесей жидкостей. Показано, что для смесей бензол/ацетон и этанол/ацетон добавление легкокипящего компонента в раствор приводит к монотонному снижению температуры поверхности испарения вплоть до значений, соответствующих однокомпонентной жидкости. Из фазовой диаграммы (рис. 4) видно, что для раствора вода/ацетон при мольном содержании ацетона в жидкости более 0,15, что соответствует массовой доле 0,36, концентрация ацетона в парах значительно превышает концентрацию воды. Это приводит к резкому снижению температуры поверхности испарения практически до значения, соответствующего адиабатному испарению чистого ацетона, уже при малом содержании ацетона в водном растворе. В теории растворов подобные смеси относятся к тангенциальным зетропным системам. Дальнейшее увеличение концентрации легкокипящего компонента в растворе слабо влияет на температуру поверхности испарения.

На рис. 6 и 7 представлены данные о тепловом потоке к поверхности и интенсивности испарения для рассматриваемых жидкостей. Получено, что для бинарных жидкостей бензол/ацетон и этанол/ацетон добавление легкокипящего компонента к раствору приводит к монотонному повышению плотности теплового потока вплоть до значений, соответствующих однокомпонентной жидкости. Для водного раствора ацетона в распределении теплового потока от состава испаряемой жидкости наблюдается максимум, соответствующий минимуму температуры поверхности испарения. Минимальная температура поверхности при $K_{L(C_3H_6O)} = 0,6$

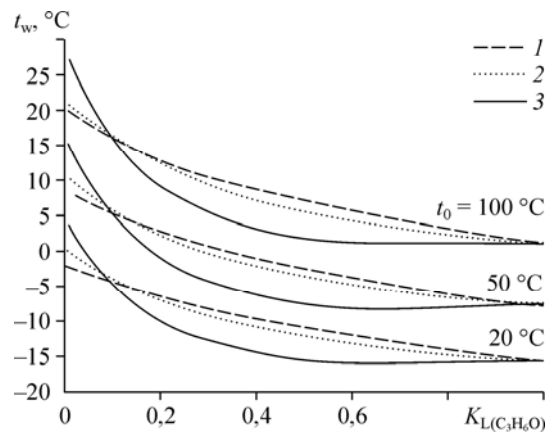
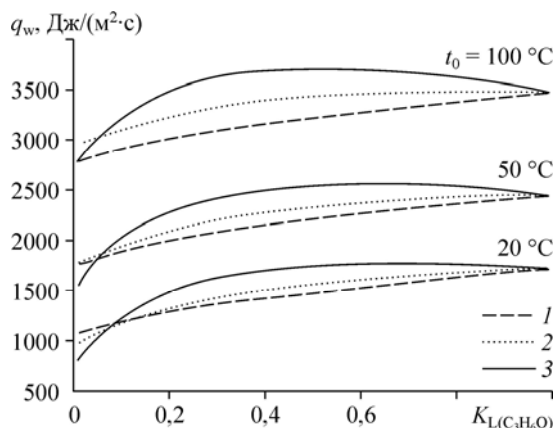


Рис. 5. Влияние состава бинарной жидкости на температуру поверхности испарения при различных температурах внешнего газового потока.

1 — бензол/ацетон, 2 — этанол/ацетон, 3 — вода/ацетон.

Рис. 6. Влияние состава бинарной жидкости на тепловой поток к поверхности испарения при различных температурах внешнего газового потока.

1 — бензол/ацетон, 2 — этанол/ацетон,
3 — вода/ацетон.



на 1 градус меньше температуры адиабатического испарения чистого ацетона. Увеличение теплового потока связано со снижением температуры стенки, а последующее его уменьшение — с ростом интенсивности поперечного потока вещества (рис. 7) и уменьшением теплоты фазового перехода смеси.

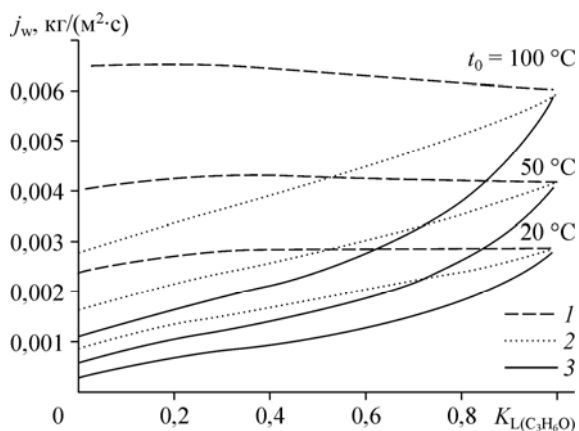
Интересно отметить, что состав бинарной жидкости бензол/ацетон практически не влияет на интенсивность испарения раствора. Несмотря на то, что давление насыщения ацетона выше давления насыщения бензола (рис. 3), интенсивность испарения этих жидкостей одинакова из-за меньшей теплоты парообразования бензола. Для растворов вода/ацетон и этанол/ацетон выявлено, что с увеличением концентрации ацетона в растворе интенсивность испарения возрастает из-за большей летучести его паров.

4. Методика расчета температуры поверхности испарения бинарных растворов

Как показано в работах [29, 30], при адиабатическом испарении однокомпонентных жидкостей температура стенки может быть определена исходя из подобия процессов тепло- и массообмена, которое обычно представляется в виде функции от числа Льюиса $St_T/St_D = 1/Le_w^n$. Полагая, что при испарении двухкомпонентной жидкости подобие между процессами тепло- и массообмена сохраняется в том же виде для каждого из компонентов смеси, из соотношений (5) и (6) температуру поверхности испарения можно определить как:

$$t_w = t_0 - \frac{r}{c_{p0}} \cdot \frac{Le_w^n(1)K_{w(1)} + Le_w^n(2)K_{w(2)}}{1 - K_{w(1)} - K_{w(2)}}. \quad (9)$$

В данном соотношении учтено, что испарение смеси происходит во внешний газовый поток азота, т.е. концентрации паров $K_{0(1)} = K_{0(2)} = 0$. Концентрации паров на поверх-



ности испарения $K_{w(1)}$ и $K_{w(2)}$ связаны с температурой поверхности t_w по корреляции Карлсона–Кольборна (8) через давления насыщенных паров чистых компонентов $P_{(1)}^0$ и $P_{(2)}^0$,

Рис. 7. Влияние состава бинарной жидкости на интенсивность испарения при различных температурах внешнего газового потока.

1 — бензол/ацетон, 2 — этанол/ацетон, 3 — вода/ацетон.

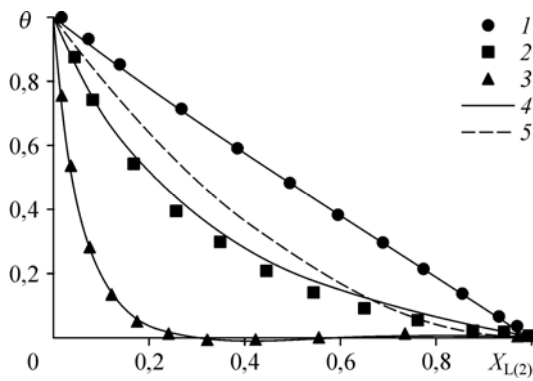


Рис. 8. Безразмерная температура адиабатического испарения бинарных жидкостей. 1 — этанол/метанол, 2 — этанол/ацетон, 3 — вода/ацетон, 4 — расчет по формулам (9) и (10), 5 — корреляция из работы [11].

которые для рассмотренных жидкостей достаточно точно описываются известной корреляцией Антуана [20].

Обобщение данных по температуре поверхности испарения различных бинарных смесей удобно представить в виде

$$\theta = \frac{T_w - T_{w(2)}}{T_{w(1)} - T_{w(2)}}, \quad (10)$$

где $T_{w(1)}$ и $T_{w(2)}$ — температуры поверхности при адиабатическом испарении первого и второго чистых компонентов [11]. Интересно отметить, что при выполнении полной аналогии между процессами тепло- и массообмена, когда справедливо допущение $Le_w = 1$, безразмерная температура адиабатического испарения смеси θ , рассчитанная с использованием соотношения (9), является функцией только теплот парообразования смеси и чистых компонентов:

$$\theta = \frac{r - r_{(2)}}{r_{(1)} - r_{(2)}}.$$

На рис. 8 представлены результаты расчета θ по предложенной методике в зависимости от мольной доли второго компонента в растворе. При ламинарном режиме течения показатель степени при числе Льюиса в формуле (9) можно принять равным 2/3. Здесь же приведены результаты численного моделирования настоящей работы и экспериментальная корреляция $\theta = (1 - X_{L(2)})^2$ из работы [11]. Из анализа соотношения (9)

очевидно, что безразмерная температура адиабатического испарения смеси определяется не только составом жидкости. Кроме состава важную роль играют свойства компонентов смеси, определяющие фазовое равновесие жидкость-пар. Значительное отличие числа Льюиса от единицы для компонентов парогазовой смеси, характеризующее степень неподобия между процессами тепло- и массообмена, также имеет существенное влияние на температуру поверхности испарения. Результаты расчетов по формулам (9) и (10) совпадают с данными численного моделирования, что говорит о пригодности предложенного метода расчета температуры поверхности испарения бинарных жидкостей для использования в инженерной практике.

Заключение

На основе результатов моделирования проведен анализ влияния состава жидкой фазы и температуры газового потока на интенсивность испарения с плоской адиабатической пластины, тепловой поток к стенке и температуру поверхности испарения.

При испарении смесей этанол/метанол, этанол/ацетон, вода/ацетон получено, что добавление легкокипящего компонента в раствор приводит к росту интенсивности испарения за счет большей летучести его паров. Однако в смеси бензол/ацетон интенсивность

испарения практически не зависит от состава, что можно объяснить меньшей теплотой парообразования бензола по сравнению с ацетоном.

Добавление легкокипящего компонента к раствору этанол/метанол, этанол/ацетон и бензол/ацетон приводит к монотонному снижению температуры поверхности испарения и монотонному повышению плотности теплового потока к смоченной поверхности вплоть до значений, соответствующих однокомпонентной жидкости. Для раствора вода/ацетон получено, что при массовой доле ацетона более 0,35 температура поверхности испарения смеси практически соответствует температуре адиабатного испарения чистого ацетона, что объясняется особенностями фазовой диаграммы для этого тангенциального зеотропного раствора. Полученный максимум теплового потока при массовой доле ацетона 0,6 соответствует минимуму температуры поверхности испарения.

Проведенные исследования показали, что для описания парожидкостного равновесия бинарных зеотропных растворов на границе раздела фаз можно использовать модель Карлсона–Кольборна. Закон Рауля применим только для смесей, по свойствам близким к совершенному раствору — этанол/ацетону и бензол/ацетону. Показано, что при адиабатическом испарении двухкомпонентных жидкостей температура стенки может быть определена исходя из подобия процессов тепло- и массообмена для каждого компонента смеси. Предложенная методика расчета может быть рекомендована для инженерного анализа процессов адиабатического испарения бинарных смесей жидкостей в технических устройствах.

Список обозначений

c_p — удельная массовая теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении, Дж/(кг·град),	$St_T = q_w / (\rho_0 u_0 c_{p0} (T_0 - T_w))$ — тепловое число Стантона,
$D_{(i)}^0$ — эффективный коэффициент диффузии i -го компонента в газовую смесь, м ² /с,	$St_{D(i)} = (J_{D(i)})_w / (\rho_0 u_0 (K_{w(i)} - K_{0(i)}))$ — диффузионное число Стантона для i -го компонента газовой смеси,
$J_{D(i)} = -\rho D_{(i)}^0 (\partial K_{(i)} / \partial y)$ — диффузионный поток i -го компонента газовой смеси, кг/(м ² ·с),	T — температура, К,
$j = \rho v$ — поперечный массовый поток газовой смеси, кг/(м ² ·с),	t — температура, °С,
K — массовая доля компонента в смеси,	u, v — скорости потока соответственно вдоль и поперек пластины, м/с,
$Le_{(i)} = \rho D_{(i)}^0 c_p / \lambda$ — число Льюиса для i -го компонента газовой смеси,	X — мольная доля компонента в смеси,
M — молекулярный вес, кг/кмоль,	x, y — координаты вдоль и поперек пластины соответственно, м,
P — давление, Па,	δ — толщина пограничного слоя, м,
$q = -\lambda (\partial T / \partial y)$ — удельный тепловой поток, Вт/м ² ,	γ — коэффициент активности компонента в жидкой фазе,
r — удельная теплота парообразования бинарной жидкости, Дж/кг,	λ — коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·град),
	μ — коэффициент динамической вязкости газовой смеси, Па·с,
	ρ — плотность газовой смеси, кг/м ³ .

Индексы

i — номер компонента смеси,	w — условия на поверхности испарения,
L — жидкая фаза,	0 — условия на внешней границе пограничного слоя,
S — паровая фаза,	$1, 2$ — компоненты бинарного раствора.

Список литературы

1. **Handbook** of industrial drying / Ed. by A.S. Mujumdar. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007. 1280 p.
2. **Башаров М.М., Лаптев А.Г.** Энергосбережение на ректификационных установках в производстве фенола и ацетона // Химическая промышленность сегодня. 2014. № 4. С. 15–19.
3. **Марков В.А., Патрахальцев Н.Н.** Спиртовые топлива для дизельных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 1. С. 22–26.

4. **Ефименко Ю.А., Фисенко С.П.** Испарительное охлаждение бинарных капель в проточном реакторе при пониженном давлении // Инж.-физ. журнал. 2008. Т. 81, № 2. С. 256–263.
5. **Fisenko S.P., Khodyko J.A.** Low pressure evaporative cooling of micron-sized droplets of solutions and its novel applications // Int. J. Heat Mass Transf. 2009. Vol. 52. P. 3842–3849.
6. **Erbil H.Y.** Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: a review // Advances in Colloid and Interface Sci. 2012. Vol. 170. P. 67–86.
7. **Eames I.W., Marr N.J., Sabir H.** The evaporation coefficient of water: a review // Int. J. Heat Mass Transf. 1997. Vol. 40. P. 2963–2973.
8. **Шпаковский Р.П.** Тепломассоперенос при испарении в газовый поток: моногр. Н. Новгород: НГТУ, 2013. 256 с.
9. **Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Температура поверхности испаряющихся капель бинарных растворов // Ползуновский вестник. 2010. № 1. С. 55–59.
10. **Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Экспериментальное исследование температуры адиабатического испарения бинарных смесей жидкости // Тр. 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: МЭИ, 2006. Т. 5. С. 183–186.
11. **Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Адиабатическое испарение бинарных смесей жидкости на поверхности пористого шара // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 2. С. 253–258.
12. **Baumann W.W., Thiele F.** Heat and mass transfer in evaporating two-component liquid film flow // Int. J. Heat Mass Transf. 1990. Vol. 33. P. 267–273.
13. **Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Володин О.А.** Теплоотдача при испарении стекающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхностях // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 4. С. 605–616.
14. **Володин О.А., Павленко А.Н., Печеркин Н.И.** Теплообмен и волновые характеристики при течении пленки бинарной смеси фреонов по поверхности с трехмерной текстурой // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 6. С. 864–874.
15. **Володин О.А., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Сердюков В.С.** Испарение и кипение пленки бинарной смеси фреонов на вертикальном цилиндре с сетчатым покрытием // Вестник НГУ: Физика. 2014. Т. 9, № 1. С. 70–78.
16. **Nasr A., Belhadj A.M., Orfi J., Debissi C., Ben Nasrallah S.** Evaporation of a thin binary liquid film covering one plate of a vertical channel // Revue des Energies Renouvelables. 2008. Vol. 11, No. 4. P. 611–622.
17. **Nasr A., Debissi C., Ben Nasrallah S.** Evaporation of a thin binary liquid film by forced convection into air and superheated steam // J. Thermal Sci. 2010. Vol. 19, No. 4. P. 346–356.
18. **Nasr A., Debissi C., Ben Nasrallah S.** Evaporation of a binary liquid film by forced convection // Thermal Sci. 2011. Vol. 15, No. 3. P. 773–784.
19. **Volchkov E.P., Leontiev A.I., Makarova S.N.** Finding the inversion temperature for water evaporation into an air-steam mixture // Int. J. Heat Mass Transf. 2007. Vol. 50. P. 2101–2106.
20. **Волчков Э.П., Леонтьев А.И., Макарова С.Н.** Температура инверсии при адиабатическом испарении жидкости в паровоздушную смесь // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 4. С. 521–533.
21. **Kays M.W., Crawford M.E.** Convective heat and mass transfer. N.Y.: McGraw-Hill, 1980. 420 p.
22. **Питерских Г.П.** Испарение жидкости в газе при высокой температуре // Химическая промышленность. 1955. № 2. С. 98–102.
23. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
24. **Gordon S., McBride V.J.** Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. Washington: NASA, RP1311, 1994. Vol. 1. 58 p.
25. **Уэйлес С.** Фазовые равновесия в химической технологии. М.: Мир, 1989. 664 с.
26. **Morris A.C., Munn L.T., Anderson G.** The system ethanol-methanol at 40 °C // Canadian J. Research. 1942. Vol. 20b, No. 10. P. 207–211.
27. **Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В.** Равновесие между жидкостью и паром. М.-Л.: Наука, 1966. 1428 с.
28. **Людмирская Г.С., Барсукова Т.А., Богомольный А.М.** Равновесие жидкость-пар. Л.: Химия, 1987. 336 с.
29. **Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И.** Конвективный тепломассообмен при испарении жидкости в газовый поток // Изв. СО АН СССР: Серия техн. наук. 1985. Вып. 3, № 16. С. 13–22.
30. **Лукашов В.В.** К определению температуры поверхности испаряющейся жидкости // ТОХТ. 2003. Т. 37, № 4. С. 351–355.

Статья поступила в редакцию 31 марта 2015 г.